TESIS DOCTORAL

Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación

Fabricación de electrodos EDM micro-texturizados por electroconformado



Autora: Mariana Hernández Pérez

Director: Pedro M. Hernández Castellano

Las Palmas de Gran Canaria
mayo de 2025

ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍAS QUÍMICA, MECÁNICA Y DE FABRICACIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

FABRICACIÓN DE ELECTRODOS EDM MICRO-TEXTURIZADOS POR ELECTROCONFORMADO

Tesis doctoral presentada por **Mariana Hernández Pérez**

Dirigida por el **Dr. D. Pedro Manuel Hernández Castellano**

El director

HERNANDEZ CASTELLANO PEDRO MANUEL - 42847217B

Firmado digitalmente por HERNANDEZ CASTELLANO PEDRO MANUEL - 42847217B
Fecha: 2025.05.24 20:04:26 +01'00'

El autor

HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H

Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H
Fecha: 2025.05.24 15:02:26 +01'00'

Las Palmas de Gran Canaria, a 24 de mayo de 2025

Tesis cofinanciada por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información de la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo y por el Fondo Social Europeo (FSE) Programa Operativo Integrado de Canarias 2014-2020, Eje 3 Tema Prioritario 74 (85%)

Mi alegría de vivir y crear continuamente me la ha dado el haber estudiado, contemplado y amado la gran sabiduría de la naturaleza.

César Manrique, 1988

Agradecimientos

Durante los últimos años en los que se ha desarrollado este trabajo, he tenido la fortuna de contar con personas excepcionales que, de una forma u otra, han contribuido a que esta Tesis Doctoral sea una realidad. A todos ellos, quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi director de tesis, Pedro Hernández, por haber sido mi guía en este camino académico y por brindarme la oportunidad de adentrarme en esta línea de investigación.

A las entidades colaboradoras —el Servicio de Metrología y Calibración de la ULPGC, el Servicio de Microscopía de la ULL y el Jardín Botánico Viera y Clavijo— cuya participación ha sido fundamental para el desarrollo de esta tesis,

En especial al grupo de Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la UCA, por su constante apoyo durante esta investigación y por ser los impulsores de mi vocación académica.

A los compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, por su disposición y colaboración en todo momento.

A Carlos Sánchez y José Ignacio, por su colaboración en la realización de los experimentos, sus conocimientos han enriquecido este trabajo.

A mis amigos, por acompañarme en los momentos buenos y en los difíciles, por hacerme crecer como persona y por ser un pilar esencial durante este proceso. Su apoyo incondicional ha sido vital para seguir adelante.

Y por supuesto a mi familia:

A mis padres y hermanos, por enseñarme con su ejemplo que todo esfuerzo tiene su recompensa, y que nunca hay que rendirse. Sin su amor, valores y apoyo constantes, nada de esto habría sido posible.

A Óscar, por tu infinita paciencia, comprensión y aliento incondicional. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en los que yo dudaba.

Y a quienes ya no están, pero cuya presencia sigue viva en mi memoria y cuyo apoyo sentí en los momentos más duros. Siempre estarán conmigo.

Resumen

La ingeniería de superficies ha emergido como un campo interdisciplinario de vital importancia en el mundo contemporáneo, donde la texturización superficial desempeña un papel crítico en la optimización de propiedades funcionales para aplicaciones avanzadas. La texturización superficial, entendida como aquellas modificaciones topográficas a escalas micro o nanométricas, provocan en la superficie de los materiales, alteraciones respecto a sus propiedades y su comportamiento. Estas alteraciones permiten conferir características específicas a los materiales, tales como reducción de la fricción, mejora de la adhesión, control de la humectabilidad. Estas propiedades no son inherentes al material base, sino que surgen de la interacción sinérgica entre sus propiedades y su morfología superficial, lo que subraya la relevancia de diseñar y controlar estratégicamente dichas texturas. En este contexto, surge la necesidad de métodos innovadores para fabricar patrones complejos con alta precisión, combinando versatilidad geométrica, fidelidad de réplica y capacidad de transferencia de textura.

En procesos de fabricación no convencionales, como es la electroerosión por penetración (SEDM), los electrodos representan componentes clave cuyo desempeño está intrínsecamente ligado a su arquitectura superficial. La texturización mediante este proceso ofrece numerosas ventajas, no obstante, la fabricación de las microtexturas presentes en los electrodos con precisión, sigue siendo un desafío tecnológico, especialmente cuando se persiguen geometrías complejas y patrones multiescala.

La tesis propone una metodología híbrida que integra dos tecnologías complementarias para la producción de estos electrodos microtexturizados. En primer lugar, se emplea fabricación aditiva MSLA (estereolitografía por máscara) para crear pieza modelo con microtexturas complejas. Esta técnica ofrece una gran versatilidad geométrica y alta resolución en el diseño de patrones, permitiendo generar estructuras superficiales detalladas difíciles de lograr con métodos tradicionales. A continuación, mediante electroconformado se deposita metal sobre la pieza modelo previamente obtenida, replicando de forma fiel en cobre las texturas del patrón. El electroconformado posibilita la replicación fidedigna de texturas en metales conductores, garantizando uniformidad y estabilidad estructural.

Finalmente, esa cáscara de cobre resultante se refuerza y se transforma en un electrodo texturizado listo para usarse en SEDM, transfiriendo así la microtextura al material de la pieza final. Este proceso resulta idóneo para mecanizar geometrías complejas sin contacto mecánico directo, lo que minimiza deformaciones y asegura una transferencia precisa del patrón. De este modo, la combinación de MSLA, electroformado y SEDM aprovecha las ventajas técnicas de cada etapa: flexibilidad de diseño tridimensional, fidelidad de réplica superficial y generación de texturas exactas sobre la pieza de trabajo.

Entre los logros principales de esta tesis destacan el rediseño del proceso híbrido completo y su validación experimental. Se diseñaron diversas microtexturas (geométricas y biomiméticas) y se fabricaron los correspondientes electrodos de cobre mediante el procedimiento descrito. El análisis metrológico mostró que las microestructuras fabricadas presentan la precisión y repetibilidad requeridas. Además, en pruebas de SEDM los electrodos produjeron superficies texturizadas con alta fidelidad geométrica, confirmando su eficacia práctica. Cabe señalar que la propuesta mejora la sostenibilidad del proceso: en línea con estudios previos, se obtuvo electrodos de alto detalle a bajo costo y con una reducción significativa de residuos tóxicos y tiempos de producción respecto a métodos convencionales.

En síntesis, esta investigación aporta un valor añadido notable. Desde el punto de vista científico, amplía el conocimiento sobre procesos híbridos de microfabricación, identificando parámetros críticos en electroconformado, como efecto de la recirculación del electrolito o la distancia ánodo-

cátodo y en la fabricación aditiva por MSLA, conseguir el mayor nivel de detalle gracias a protocolos de limpieza que mejoran la reproducibilidad. En el ámbito técnico, se demuestran que los electrodos SEDM por electroconformado son eficientes para crear microtexturas funcionales precisas. Por último, a nivel industrial se ofrece una alternativa más rápida, versátil y sostenible para producir herramientas microtexturizadas con aplicaciones potenciales en sectores de alta tecnología. A través de este enfoque multidisciplinar, se ha pretendido proponer una metodología para la fabricación escalable de electrodos SEDM para que la texturización superficial pueda convertirse en una herramienta de ingeniería precisa y cuantificable.

Abstract

Surface engineering has emerged as a vital interdisciplinary field in the contemporary world. Surface texturing plays a critical role in optimizing functional properties for advanced applications. Surface texturing involves topographical modifications at the micro or nanometric scale that alter the properties and behavior of materials. These alterations enable specific characteristics to be conferred upon materials, such as reduced friction, improved adhesion, and controlled wettability. These properties are not inherent to the base material but rather arise from the interaction between the material's properties and its surface morphology. This interaction underscores the importance of strategically designing and controlling such textures. Thus, there is a need for innovative methods to fabricate complex patterns with high precision, combining geometric versatility, replication fidelity, and texture transfer capability.

In unconventional manufacturing processes such as sinker EDM (SEDM), the performance of the electrodes is intrinsically linked to their surface architecture. Although texturization offers numerous advantages, manufacturing precise microtextures on electrodes remains a technological challenge, particularly when complex geometries and multiscale patterns are involved.

The thesis presents a hybrid methodology integrating two complementary technologies to produce these microtextured electrodes. First, MSLA (mask stereolithography) additive manufacturing is used to create model parts with complex microtextures. MSLA offers great geometric versatility and high-resolution pattern design, enabling the generation of detailed surface structures that are difficult to achieve with traditional methods. Then, electroforming deposits metal on the previously obtained model part, faithfully replicating the textures of the pattern in copper. Electroforming enables the faithful replication of textures in conductive metals, ensuring uniformity and structural stability.

Finally, the resulting copper shell is reinforced and transformed into a textured electrode, ready for use. This process, known as SEDM, transfers the microtexture to the final part material. This process is ideal for machining complex geometries without direct mechanical contact, which minimizes deformation and ensures accurate pattern transfer. The combination of MSLA, electroforming, and SEDM exploits the technical advantages of each stage, including three-dimensional design flexibility, surface replication fidelity, and accurate texture generation on the workpiece.

This thesis's main achievements include redesigning the entire hybrid process and experimentally validating it. Several microtextures (geometric and biomimetic) were designed, and the corresponding copper electrodes were fabricated using the described procedure. Metrological analysis showed that the fabricated microstructures have the necessary accuracy and repeatability. Furthermore, SEDM tests confirmed the practical effectiveness of the electrodes by showing that they produced textured surfaces with high geometrical fidelity. It should be noted that this proposal improves the sustainability of the process. In line with previous studies, high-detail electrodes were obtained at a low cost, significantly reducing toxic waste and production time compared to conventional methods.

In summary, this research provides significant added value. From a scientific perspective, it expands our understanding of hybrid microfabrication processes by identifying critical parameters in electroforming, such as the effect of electrolyte recirculation and the anode-cathode distance. It also improves our knowledge of additive manufacturing by MSLA, enabling the highest level of detail to be achieved thanks to cleaning protocols that enhance reproducibility. From a technical perspective, it demonstrates the efficiency of creating precise functional microtextures using SEDM electrodes by electroforming. Finally, from an industrial perspective, a faster, more versatile and sustainable alternative has been developed for producing microtextured tools with potential applications in high-tech sectors. This multidisciplinary approach intends to propose a scalable fabrication methodology for SEDM electrodes, making surface texturing a precise and quantifiable engineering tool.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. Introducción ..... **I - 3**

1.1. Antecedentes, Motivación y Alcance ..... I - 4
1.2. Contexto de aplicación ..... I - 6
1.3. Hipótesis y Objetivos de la investigación ..... I - 6
1.3.1. Hipótesis ..... I - 7
1.3.2. Objetivos ..... I - 7
1.4. Metodología ..... I - 8
1.4.1. Fase Inicial ..... I - 8
1.4.2. Fase Experimental ..... I - 8
1.4.3. Fase Final ..... I - 9
1.5. Organización de la Tesis Doctoral (Estructura del documento) ..... I - 10

CAPÍTULO II. Estado de la cuestión en texturizado por electroerosión ..... **II - 2**

2.1. Superficies en la ingeniería ..... II - 3
2.1.1. Tipologías de superficies ..... II - 4
2.1.1.1. Ingeniería de superficies ..... II - 5
2.1.1.2. Superficies estructuradas ..... II - 6
2.1.2. Acabado superficial ..... II - 8
2.1.3. Texturización ..... II - 12
2.1.4. Superficies bioinspiradas: fundamentos, estrategias y aplicaciones ..... II - 14
2.1.4.1. Ejemplos de superficies bioinspiradas y sus aplicaciones ..... II - 14
2.1.4.2. Estrategias de diseño biomimético ..... II - 16
2.1.5. Caracterización superficial: estructura y métodos de evaluación ..... II - 16
2.1.5.1. Fundamentos estructurales de una superficie técnica ..... II - 17
2.1.5.2. Técnicas de caracterización metrológica ..... II - 17
2.1.5.3. Evaluación de la integridad superficial ..... II - 18
2.2. Procesos de modificación superficial ..... II - 19
2.2.1. Procesos y tecnologías de microfabricación ..... II - 20
2.3. Procesos relevantes en el desarrollo de texturizados en esta Tesis ..... II - 22
2.3.1. Fabricación aditiva ..... II - 23
2.3.1.1. Definición de fabricación aditiva ..... II - 24
2.3.1.2. Clasificación procesos de FA ..... II - 24
2.3.1.3. Capacidades y limitaciones ..... II - 26
2.3.1.4. Estereolitografía por máscara ..... II - 27
2.3.1.5. Comparativa entre Tecnologías SLA, DLP y LCD ..... II - 28
2.3.1.6. Materiales empleados ..... II - 30

2.3.1.7. Capacidades y limitaciones específicas de la tecnología SLA y MSLA ..... II - 31
2.3.1.8. Texturizado mediante fabricación aditiva ..... II - 32
2.3.2. Electroconformado ..... II - 34
2.3.2.1. Fundamentos del electroconformado ..... II - 36
2.3.2.2. Etapas del proceso ..... II - 37
2.3.2.3. Parámetros operativos del proceso que influyen en la electrodeposición ..... II - 38
2.3.2.4. Metalizado de las piezas modelo ..... II - 39
2.3.2.5. Baños electrolíticos de cobre ..... II - 40
2.3.2.6. Relación ánodo-cátodo ..... II - 40
2.3.2.7. Capacidades y limitaciones ..... II - 40
2.3.2.8. Aplicaciones ..... II - 42
2.3.2.9. Microfabricación mediante electroconformado ..... II - 43
2.3.3. Mecanizado por descarga eléctrica (SEDM) ..... II - 45
2.3.3.1. Fundamentos del proceso ..... II - 47
2.3.3.2. Electrodo ..... II - 50
2.3.3.3. Tolerancias y acabados superficiales ..... II - 52
2.3.3.4. Capacidades y limitaciones ..... II - 54
2.3.3.5. μ - EDM ..... II - 54
2.3.3.6. Diferencias entre EDM y μ-EDM ..... II - 56
2.4. Fabricación de electrodos para SEDM combinando MSLA y electroforming ..... II - 56
2.4.1. Marco existente ..... II - 56
2.4.2. Empleo de técnicas de fabricación rápida para generar electrodos EDM ..... II - 59
2.4.2.1. Electrodos de materiales no conductores ..... II - 61
2.4.2.2. Espesor de la electroforma ..... II - 62
2.4.2.3. Refuerzo de la electroforma ..... II - 63
2.4.3. Comparativa entre electrodos mecanizados y electroconformados ..... II - 63
2.5. Conclusiones ..... II - 64

CAPÍTULO III. Metodología aplicada y equipamiento empleado ..... **III - 2**

3.1. Proceso de elaboración de electrodos microtexturizados ..... III - 3
3.1.1. Fase 1: Diseño de texturas ..... III - 4
3.1.2. Fase 2: Fabricación de la pieza modelo ..... III - 5
3.1.2.1. Preparación digital del modelo (slicing) ..... III - 5
3.1.2.2. Fabricación mediante impresión MSLA ..... III - 6
3.1.2.3. Postprocesado del modelo impreso ..... III - 6
3.1.3. Fase 3: Inspección y medición de las piezas modelo ..... III - 6
3.1.4. Fase 4: Metalización de la pieza modelo ..... III - 7
3.1.5. Fase 5: Electroconformado de las piezas modelo ..... III - 8
3.1.5.1. Preparativo del equipo y conexiones ..... III - 8

3.1.5.2. Ejecución del programa ... III - 9
3.1.5.3. Descarga de datos ... III - 9
3.1.6. Fase 6: Extracción, inspección y medición de las electroformas ... III - 9
3.1.7. Fase 7: Preparación del electrodo ... III - 10
3.1.8. Fase 8: Proceso SEDM ... III - 12
3.1.9. Fase 9: Inspección y medición de la superficie erosionada y del electrodo ... III - 12
3.2. Equipamiento empleado ... III - 14
3.2.1. Diseño de texturas ... III - 14
3.2.2. Fabricación de la pieza modelo ... III - 15
3.2.2.1. Fabricación MSLA ... III - 15
3.2.2.2. Materiales ... III - 16
3.2.2.3. Postprocesado ... III - 17
3.2.3. Electroconformado ... III - 18
3.2.3.1. Metalización por pulverización catódica ... III - 18
3.2.3.2. Electroconformado ... III - 19
3.2.4. Electroerosión por penetración ... III - 20
3.2.5. Inspección y medición durante el proceso ... III - 20

CAPÍTULO IV. Diseño y fabricación de piezas modelo ... **IV - 2**

4.1. Diseño de partida ... IV - 3
4.2. Consideraciones de diseño y rediseño del electrodo ... IV - 3
4.2.1. Consideraciones de diseño ... IV - 4
4.2.2. Rediseño pieza modelo ... IV - 5
4.3. Diseño de microtexturas ... IV - 6
4.3.1. Selección de texturas ... IV - 7
4.3.1.1. Geometrías geométricas ... IV - 7
4.3.1.2. Geometrías bioinspiradas ... IV - 9
4.3.1.3. Geometrías estéticas ... IV - 10
4.4. Rediseño de microtexturas empleando herramientas paramétricas ... IV - 11
4.4.1. Herramientas paramétricas ... IV - 12
4.4.1.1. Software paramétrico: Rhinoceros 7 +plug-in Grasshopper ... IV - 12
4.4.2. Diseño de metodología ... IV - 13
4.4.3. Colección de texturas parametrizadas ... IV - 17
4.4.3.1. Texturas geométricas ... IV - 18
4.4.3.2. Texturas bioinspiradas ... IV - 24
4.4.3.3. Texturas estéticas ... IV - 27
4.5. Rediseño de textura mediante simplificación del diseño ... IV - 28
4.6. Selección de texturas a estudiar ... IV - 31
4.7. Mejoras externas al diseño de las micro texturas ... IV - 33

4.7.1. Optimización del equipo de FA ..... IV - 33
4.7.1.1. Fabricación de las primeras piezas modelo ..... IV - 33
4.7.1.2. Fabricación de piezas modelo finales ..... IV - 35
4.7.1.3. Comparativa entre equipos MSLA ..... IV - 36
4.7.2. Optimización de resina fotosensible ..... IV - 38
4.7.3. Optimización del postprocesado ..... IV - 40
4.8. Conclusiones ..... IV - 42

CAPÍTULO V. Electroconformado de cáscaras de cobre microtexturizadas ..... **V - 2**

5.1. Preparativos previos a la generación de cáscaras de cobre ..... V - 3
5.2. Análisis del equipo de partida ..... V - 4
5.2.1. Fuente de alimentación ..... V - 6
5.2.2. Dispositivo de control automático (DCAB) ..... V - 7
5.2.3. Puente para sujeción del cátodo o pieza modelo ..... V - 8
5.2.4. Retroiluminación ..... V - 9
5.2.5. Sistema de agitación del baño ..... V - 10
5.2.6. Tanque de microelectroconformado ..... V - 11
5.2.7. Fijación del ánodo ..... V - 12
5.2.8. Máscara protectora para la pieza modelo ..... V - 12
5.2.9. Cámara de vigilancia ..... V - 13
5.2.10. Fase experimental de operación con equipo de partida ..... V - 14
5.3. Rediseño equipo electroconformado ..... V - 17
5.3.1. Tanque de electroconformado ..... V - 18
5.3.2. Separación entre tanques ..... V - 20
5.3.3. Tapa para colocación de elementos de sujeción ..... V - 21
5.3.4. Recirculación y filtrado del baño ..... V - 21
5.3.4.1. Filtro ..... V - 23
5.3.4.2. Elemento de agitación ..... V - 23
5.3.5. Sistema de sujeción del cátodo ..... V - 24
5.3.5.1. Protección del cátodo ..... V - 26
5.3.6. Sujeción del ánodo ..... V - 27
5.3.7. Sistema de retroiluminación ..... V - 28
5.3.8. Equipo definitivo ..... V - 28
5.4. Programa de deposición ..... V - 29
5.4.1. Programa de deposición de partida ..... V - 30
5.4.2. Programa de deposición implementado ..... V - 30
5.5. Efecto de diferentes parámetros sobre el crecimiento de las electroformas ..... V - 31
5.5.1. Distancia ánodo-cátodo ..... V - 32
5.5.1.1. Estudio distancia ánodo-cátodo con equipo rediseñado ..... V - 34

5.5.2. Efecto de la renovación del baño y su intensidad ..... V - 40
5.5.2.1. Definición de factores experimentales ..... V - 40
5.5.2.2. Diseño experimental ..... V - 41
5.5.2.3. Cálculo del caudal y número de renovaciones del baño ..... V - 41
5.5.2.4. Estudio con electrodos reutilizados ..... V - 42
5.5.2.4.1. Análisis del voltaje de los buffers ..... V - 42
5.5.2.4.2. Análisis del peso de las electroformas ..... V - 45
5.5.2.5. Análisis con piezas modelo nuevas ..... V - 45
5.5.2.5.1. Análisis del voltaje de los buffers ..... V - 46
5.5.2.5.2. Analisis del peso de las electroformas ..... V - 48
5.5.2.5.3. Análisis de la distribución de espesores de las electroformas ..... V - 49
5.5.2.6. Reutilización de las piezas modelo ..... V - 51
5.5.3. Análisis del efecto del desgaste del baño en el depósito de cobre ..... V - 52
5.5.4. Análisis del efecto de la pantalla y el tipo de textura sobre la distribución del espesor ..... V - 54
5.6. Conclusiones ..... V - 56

CAPÍTULO VI. Validación de superficies microtexturizadas ..... **VI - 2**

6.1. Metodología ..... VI - 3
6.2. Estudios experimentales ..... VI - 4
6.2.1. Estudio de acumulación de error durante el proceso de generación de electrodos SEDM microtexturizados ..... VI - 4
6.2.1.1. Metodología y equipamiento ..... VI - 4
6.2.1.2. Resultados ..... VI - 7
6.2.2. Evaluación de la mejora en el proceso MSLA ..... VI - 9
6.2.2.1. Metodología y equipamiento ..... VI - 10
6.2.2.2. Resultados ..... VI - 11
6.2.3. Inspección visual de las cáscaras obtenidas ..... VI - 13
6.2.3.1. Inspección de la cáscara adherida a la pieza modelo ..... VI - 14
6.2.3.2. Inspección de la cáscara desmontada ..... VI - 14
6.2.4. Electroerosión de las texturas estudiadas ..... VI - 17
6.2.4.1. Refuerzo de cáscaras e incorporación al portaelectrodos ..... VI - 18
6.2.4.2. Ensayos con electrodos iniciales ..... VI - 20
6.2.4.2.1. Metodología y equipamiento ..... VI - 21
6.2.4.2.2. Resultados ..... VI - 22
6.2.4.3. Ensayos con electrodos finales microtexturizados ..... VI - 23
6.2.4.3.1. Metodología y equipamiento ..... VI - 24
6.2.4.3.2. Resultados ..... VI - 25
6.2.4.3.3. Comparativa con electrodo macizo mecanizado convencionalmente. VI - 29

6.2.5. Funcionalidad de las texturas obtenidas ..... VI - 31
6.2.5.1. Estudio del comportamiento de las texturas en piezas MSLA ..... VI - 33
6.2.5.2. Influencia del material en la texturización de superficies ..... VI - 40
6.2.5.3. Comparativa entre material y acabado superficial ..... VI - 41
6.2.5.4. Caracterización de las piezas erosionadas ..... VI - 43
6.2.5.4.1. Metodología y equipamiento ..... VI - 44
6.2.5.4.2. Resultados de la inspección visual ..... VI - 46
6.2.5.4.3. Resultados sobre la rugosidad superficial ..... VI - 47
6.3. Impacto económico del proceso ..... VI - 48
6.4. Conclusiones ..... VI - 50

CAPÍTULO VII. Conclusiones y líneas de trabajo futuras ..... VII - 2

7.1. Conclusiones ..... VII - 3
7.1.1. Conclusiones relacionadas con la fabricación aditiva ..... VII - 4
7.1.2. Conclusiones relacionadas con el proceso de electroconformado ..... VII - 4
7.1.3. Conclusiones relacionadas con el proceso SEDM ..... VII - 5
7.1.4. Conclusiones relacionadas con el comportamiento superficial ..... VII - 5
7.2. Líneas futuras ..... VII - 6

Bibliografía ..... **B - 1**

Anexos ..... **I**

Índice de Figuras

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Metodología empleada en la realización de la Tesis. ..... I - 10
Figura 1.2. Esquema de los capítulos relacionados con los objetivos y las hipótesis planteadas. I - 10

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Clasificación de las superficies. Adaptada de [9]. ..... II - 4
Figura 2.2. Clasificación de las superficies de ingeniería. Adaptada de [20]. ..... II - 7
Figura 2.3. Esquemas geométricos: a) superficie teselada; b) superficie patrón lineal; c) superficies patrón rotacional; d) superficies multipatrón. ..... II - 7
Figura 2.4. Características generales del acabado superficial de una superficie [22]. ..... II - 8
Figura 2.5. Desviaciones usadas en la rugosidad [22]. ..... II - 9
Figura 2.6. Características de la rugosidad superficial [26]. ..... II - 10
Figura 2.7. Rugosidad media aritmética (Ra). ..... II - 10
Figura 2.8. Altura media de la rugosidad (Rz). ..... II - 11
Figura 2.9. Altura máxima de la cresta (Rp). ..... II - 11
Figura 2.10. Altura máxima del perfil (Rv). ..... II - 11
Figura 2.11. Altura máxima del perfil (Rv). ..... II - 11
Figura 2.12. Ilustración esquemática de los posibles mecanismos responsables de la mejora del comportamiento tribológico de superficies texturizadas [39]. ..... II - 12
Figura 2.13. Desarrollo tecnológico del texturizado de superficies [43]. ..... II - 13
Figura 2.14. Biomímesis de un capullo. Obtenido de [47]. ..... II - 14
Figura 2.15. Texturizados hidrofóbicos: a) hojas de loto; b) piel de tiburón. Obtenido de [51]. . II - 15
Figura 2.16. Texturizados funcionales: a) pie de Gecko; b) ojo de mosquito. Obtenido de [52]. . II - 15
Figura 2.17. Sección transversal magnificada de una superficie [22]. ..... II - 17
Figura 2.18. Diferentes métodos de evaluación del acabado superficial [62]. ..... II - 18
Figura 2.19. Cuota de mercado estimada de la FA global [82]. ..... II - 23
Figura 2.20. Clasificación de las tecnologías de FA. Modificado de [93]. ..... II - 25
Figura 2.21. Representación esquemática de una típica configuración SLA. ..... II - 28
Figura 2.22. Comparativa entre los diferentes tipos de impresión 3D [101]. ..... II - 28
Figura 2.23. Clasificación tipologías de resinas fotosensibles para impresión 3D. ..... II - 30
Figura 2.24. (a) Estructura de cabello impresa con SLA basado en rayo láser. (b) Foto SEM de (a). (c) Forma ovalada del rayo láser. Obtenido de [123]. ..... II - 33
Figura 2.25. Uniformidad y consistencia de los desplazamientos de vértices. Obtenido de [128]. ..... II - 33
Figura 2.26. Proceso de electroconformado. ..... II - 35
Figura 2.27. Principios del proceso de electroconformado [148]. ..... II - 36
Figura 2.28. Crecimiento del cobre de tipo nucleado y arborescente. Obtenido de [150]. ..... II - 37
Figura 2.29. Electrodo generado por electroconformado. Obtenido de [154]. ..... II - 42
Figura 2.30. Imágenes SEM de micromallas electroconformadas hechas de níquel [166]. ..... II - 43
Figura 2.31. Esquema del proceso de replicación de la estructura jerárquica. Obtenido de [169]. ..... II - 44
Figura 2.32. Clasificación procesos convencionales y procesos no convencionales. ..... II - 45
Figura 2.33. Número de publicaciones de EDM a lo largo de los últimos años [181]. ..... II - 46
Figura 2.34. Número de publicaciones sobre EDM en los diferentes campos de aplicación [181]. ..... II - 46
Figura 2.35. Esquema del funcionamiento del proceso EDM [184]. ..... II - 47
Figura 2.36. "Viruta" del proceso de electroerosión. ..... II - 48

Figura 2.37. Resumen del proceso de una descarga eléctrica y el comportamiento de V e I [188]..... II - 49
Figura 2.38. Parámetros de EDM..... II - 50
Figura 2.39. Electrodos de grafito..... II - 51
Figura 2.40. Electrodos de cobre..... II - 51
Figura 2.41. Formación de cráteres: a) y b) en una sola descarga; c)en múltiples descargas. ..... II - 53
Figura 2.42. Zonas afectadas por el proceso EDM. ..... II - 53
Figura 2.43. Áreas problemáticas en el μ-EDM. ..... II - 55
Figura 2.44. Mapa relacionando publicaciones que investigan el desarrollo de electrodos para SEDM. ..... II - 58
Figura 2.45. Factores que afectan al rendimiento del electrodo. Adaptada de [183]. ..... II - 60
Figura 2.46. Clasificación fabricación de electrodos. Adaptada de [192]..... II - 60
Figura 2.47. Representación de los procesos básicos de fabricación de electrodos mediante FA directa e indirecta. Adaptada de [193]. ..... II - 61

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Gráfico con el procedimiento de fabricación de herramientas SEDM electroconformadas. ..... III - 3
Figura 3.2. Configuración básica de la pieza modelo..... III - 4
Figura 3.3. Ejemplo de pieza modelo con textura de piel de tiburón empleando Fusion360. ..... III - 4
Figura 3.4. Optimización de la textura de piel de tiburón mediante parametrización. ..... III - 5
Figura 3.5. Pieza modelo metalizada lista para el proceso de electroforming. ..... III - 7
Figura 3.6. Esquema del montaje del equipo de electroforming. ..... III - 8
Figura 3.7. Pantalla de gestión de los buffers del KEITHLEY 2460 SourceMeter®. ..... III - 9
Figura 3.8. Medición de las electroformas obtenidas. ..... III - 10
Figura 3.9. Plano del porta electrodos EROWA_ER-009222. ..... III - 10
Figura 3.10. Porta electrodos EROWA_ER-009222. ..... III - 11
Figura 3.11. Despiece del soporte donde se aloja la cáscara de cobre. Obtenido de [163]. ..... III - 11
Figura 3.12. Portaelectrodos adaptado al equipo de la ULPGC..... III - 12
Figura 3.13. Inspección visual de las cáscaras tras la erosión. ..... III - 13
Figura 3.14. Caracterización tras la erosión de textura de semiesferas entrantes..... III - 14
Figura 3.15. Interfaz del programa Chitubox. ..... III - 16
Figura 3.16. Equipos para el postprocesado en MSLA: a) Phrozen Wash Station (ULPGC); b) Phrozen Ultra-Sonic Cleaner (ULPGC); c) Phrozen Cure Kit (ULPGC)..... III - 17
Figura 3.17. Equipos de sputtering: a) SC7620 Mini Sputter Coater (ULPGC); b) Cressington 108 Auto Sputter Coater (Jardín botánico Viera y Clavijo); c) Q150R ES Plus (ULL). ..... III - 19
Figura 3.18. Equipo de microelectroconformado de partida. Obtenido de [1]. ..... III - 19
Figura 3.19. Equipo de electroconformado desarrollado..... III - 20
Figura 3.20. Equipos SEDM: a) ONA Serie “DB 300” (ULPGC); b) ONA Serie “NX3” (UCA). ..... III - 20
Figura 3.21. Ejemplo de uso del programa MountainsMap® con textura de semiesferas. ..... III - 22
Figura 3.22. a) Banco con el comparador; b) Vista inferior del conector modelado; c) Aguja hipodérmica adaptada como palpador de contacto. ..... III - 23

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Modelo funcional Evo 4 de partida: a) vista de perspectiva de la pieza; b) ilustración de la cara posterior con perforaciones pasantes. ..... IV - 3
Figura 4.2. Pieza modelo rediseñada con espesor reducido. ..... IV - 5
Figura 4.3. Pieza modelo plana (Modelo EMT_P_0). ..... IV - 6

Figura 4.4. Pieza modelo: a) geometría base sin textura (Modelo EMT_C_0); b) Pieza modelo texturizada (Modelo EMT_T1). ..... IV - 6
Figura 4.5. Pieza modelo definitiva. ..... IV - 6
Figura 4.6. Combinaciones de texturizados aplicando semiesferas: a) semiesferas de 1 mm; b) semiesferas de 1 mm y 0.5 mm; c) semiesferas de 1 mm; d) semiesferas de 1 mm y 0.5 mm. ..... IV - 9
Figura 4.7. Características de los pies de los geckos. Imagen modificada de [15]. ..... IV - 9
Figura 4.8. Plug-in de Grasshopper integrado en Rhinoceros. ..... IV - 13
Figura 4.9. Metodologías empleadas para diseño biomiméticos. Basado en [19,20]. ..... IV - 14
Figura 4.10. Aplicación de texturización de superficies. a) Envase; b) Protector modular para motoristas. Obtenido de [19]. ..... IV - 15
Figura 4.11. Metodología desarrollada para el diseño bioinspirado. ..... IV - 15
Figura 4.12. Metodología simplificada desarrollada para el diseño bioinspirado. ..... IV - 16
Figura 4.13. Metodología para el diseño paramétrico con Rhinoceros y Grasshopper. Desarrollado en [18]. ..... IV - 16
Figura 4.14. Código de colores en Grasshopper. Desarrollado en [18]. ..... IV - 17
Figura 4.15. Separación de la pieza modelo en dos elementos para facilitar el trabajo de texturización. ..... IV - 17
Figura 4.16. Dimensiones de la cuadrícula aleatoria. ..... IV - 18
Figura 4.17. Punto inicial y generación de la cuadrícula. ..... IV - 19
Figura 4.18. Variación de la altura de la geometría. ..... IV - 19
Figura 4.19. Variación de la altura de la geometría. ..... IV - 20
Figura 4.20. Previsualización del resultado final. ..... IV - 20
Figura 4.21. Pieza modelo con texturizado parametrizado en Rhinoceros. ..... IV - 21
Figura 4.22. Posibles variaciones de la cuadrícula aleatoria. ..... IV - 21
Figura 4.23. Patrón substrate. ..... IV - 22
Figura 4.24. Patrón de cuadrícula de elementos triangulares. ..... IV - 22
Figura 4.25. Texturizado de cuadrados formada por el panel "*Quad*". ..... IV - 22
Figura 4.26. Texturizado generado por el panel "*Staggered Quad*". ..... IV - 23
Figura 4.27. Texturizado generado con el panel "*Triangular C*". ..... IV - 23
Figura 4.28. a) Texturizado generado con el panel "*Triangular B*"; b) Texturizado generado con el panel "*Triangular A*". ..... IV - 23
Figura 4.29. a) Texturizado generado con el panel "*Skewed*"; b) Textura generada con el panel "*Diamond*". ..... IV - 24
Figura 4.30. a) Texturizado generado con el panel "*Hexagon*" bajo relieve; b) Textura generada con el panel "*Hexagon*" sobre relieve. ..... IV - 24
Figura 4.31. Áreas de atracción de Voronoi. Obtenido de [18]. ..... IV - 25
Figura 4.32. a) Texturizado voronoi bajo relieve; b) Texturizado voronoi sobre relieve. ..... IV - 25
Figura 4.33. Texturizado de yaka sobre relieve. ..... IV - 26
Figura 4.34. a) Abstracción de la piel del tiburón; b) Modelado de la escama. Modificado de [18] ..... IV - 26
Figura 4.35. Texturizado de piel de tiburón parametrizado. ..... IV - 26
Figura 4.36. Abstracción del elemento generador de la textura de piña canaria. ..... IV - 27
Figura 4.37. Texturizado de piña canaria. ..... IV - 27
Figura 4.38. Texturizado compuesto por ondas. ..... IV - 27
Figura 4.39. Micro textura piel de tiburón simplificada con altura de capa de veinticinco micras. ..... IV - 28
Figura 4.40. Diseño de riblets mediante uso de elementos cilíndricos. Obtenido de [22]. ..... IV - 29
Figura 4.41. Visión general de la geometría de las escamas de pez: (a) topografía de las escamas de pez típicas, y (b) diseño propuesto de riblets triangulares asimétricos. Obtenido de [23]. ..... IV - 30
Figura 4.42. Tipologías de riblets: a) riblets en forma de diente de sierra; b) riblets con forma de escamas y c) riblets tipo cuchilla. ..... IV - 30

Figura 4.43. Diseños simplificados de la textura de piel de tiburón: a) riblets triangulares; b) riblets en forma de escama; c) riblets en forma de escama cruzados.....IV - 31
Figura 4.44. Textura bajo relieve seleccionada para realizar las diversas investigaciones (EMT_SE_BR). .....IV - 32
Figura 4.45. Textura sobre relieve seleccionada para realizar las diversas investigaciones (EMT_TIB).....IV - 32
Figura 4.46. Impresora Wanhao Duplicator 7 (D7). .....IV - 33
Figura 4.47. Interfaz principal programa de impresión de la Wanhao Duplicator 7. .....IV - 34
Figura 4.48. Perfil de resina del programa de impresión de la Wanhao Duplicator 7.....IV - 35
Figura 4.49. Impresora Phrozen Mini 8K. .....IV - 35
Figura 4.50. Representación de distorsión dimensión atribuida a la resolución de la pantalla de la impresora 3D. .....IV - 36
Figura 4.51. Atrapamiento de resina en geometría entrantes. .....IV - 37
Figura 4.52. Error generado por la placa de construcción.....IV - 37
Figura 4.53. Error generado por la placa de construcción.....IV - 38
Figura 4.54. Pieza patrón para calibrar las resinas.....IV - 38
Figura 4.55. a) Estación de lavado de Phrozen; b) Equipo de limpieza ultrasónica; c) Estación de secado y curado de Phrozen.....IV - 40
Figura 4.56. Efecto de la limpieza mediante equipo de ultrasonido: a) pieza sin limpieza ultrasónica; b) pieza con limpieza ultrasónica. .....IV - 41

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Componentes del equipo de micro electroconformado de partida. Imagen tomada de [7]. .....V - 5
Figura 5.2. Equipo KEITHLEY 2460 SourceMeter®. Imagen obtenida de [8].....V - 6
Figura 5.3. a) KEITHLEY 2460 - Pantalla de medición; b) KEITHLEY 2460 - Pantalla de lectura de datos. Imágenes obtenidas de [8]. .....V - 7
Figura 5.4. Componentes principales del CDAB. Obtenido de [7].....V - 8
Figura 5.5. Modelado del puente de sujeción. Información obtenida de [7].....V - 9
Figura 5.6. Tanque de ensayos con sistema de retroiluminación activa. Obtenido de [7]. .....V - 9
Figura 5.7. Imagen de la bomba centrífuga utilizada. .....V - 10
Figura 5.8. Sistema de agitación: a) carcasa para bomba; b) colectores.....V - 11
Figura 5.9. Escalas del tanque de deposición. Imagen obtenida de [7]. .....V - 11
Figura 5.10. Elemento de fijación del ánodo. Hacer mi imagen.....V - 12
Figura 5.11. Metalizado de la pieza modelo en la parte no funcional. .....V - 12
Figura 5.12. Máscara protectora de la pieza modelo. .....V - 13
Figura 5.13. Cámara Xiaomi para control del proceso de electroconformado.....V - 13
Figura 5.14. Equipo de electroplating empleado como equipo de electroconformado. .....V - 15
Figura 5.15. Electrodos electroconformados: a) distancia 100; b) distancia 80; c) distancia 60 V - 16
Figura 5.16. Pieza modelo plana (Modelo EMT_P_0). .....V - 16
Figura 5.17. Recipientes para equipo de micro electroconformado: a) Modelo TROFAST; b) Modelo GODMORGON.....V - 19
Figura 5.18. Tanque modificado con elemento de salida para realizar el proceso de electroconformado. .....V - 19
Figura 5.19. Elemento de salida del baño en el tanque superior: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva..... .....V - 20
Figura 5.20. Tapa divisoria de ambos tanques. .....V - 20
Figura 5.21. Tapa con orificios para colocación de elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de electroconformado. .....V - 21
Figura 5.22. Diseño salida bomba 4: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.....V - 22

Figura 5.23. Uso de tubería de PCV espumado para protector de bomba: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva..... V - 22
Figura 5.24. Bomba peristáltica empleada para bombear el baño electrolítico. Obtenido de [9]..... V - 23
Figura 5.25. Filtro bobinado de polipropileno. ..... V - 23
Figura 5.26. Elemento de recirculación del baño 5: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva..... V - 24
Figura 5.27. Diseño de la pieza modelo de partida. ..... V - 24
Figura 5.28. Defecto de falta de continuidad en la pieza modelo. ..... V - 25
Figura 5.29. Diseño final de la pieza modelo. ..... V - 25
Figura 5.30. Elemento para la sujeción del cátodo 4: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva..... V - 26
Figura 5.31. Elemento final para la sujeción del cátodo, con detalle de la plancha de cobre para realizar el contacto eléctrico..... V - 26
Figura 5.32. Protección del cátodo. Protector para evitar recubrimiento en laterales y zona del mango: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva. ..... V - 27
Figura 5.33. Protección del cátodo. Pantalla para direccionar las líneas de flujo del electrolito: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva. ..... V - 27
Figura 5.34. Sujeción del cátodo con rediseño para mejora de la sujeción: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva; d) elemento de sujeción anclado al ánodo. ..... V - 28
Figura 5.35. Esquema de los pasos a seguir para incorporar lo elementos nuevos al equipo rediseñado. ..... V - 28
Figura 5.36. Montaje de nuevos elementos del equipo rediseñado..... V - 29
Figura 5.37. Equipo de electroconformado desarrollado..... V - 29
Figura 5.38. Espesor de la capa electroformada en función de la distancia a lo largo del cátodo para diferentes distancias ánodo-cátodo. Obtenido de [18]. ..... V - 33
Figura 5.39. Efecto de la distancia ánodo-cátodo y orientación. a) coeficiente de variación; b) crecimiento de borde. Obtenido de [10]. ..... V - 33
Figura 5.40. Gráfica de los valores obtenidos en el estudio distancia ánodo-cátodo con nuevo equipo. ..... V - 36
Figura 5.41. Metalizado no homogéneo de las piezas modelo: a) pieza modelo con geometría bajo relieve; b) pieza modelo con geometría sobre relieve..... V - 36
Figura 5.42. Cubre electrodo: a) protección inicial; b) protección final. ..... V - 38
Figura 5.43. Gráfica de los valores obtenidos en el estudio distancia ánodo-cátodo con nuevo equipo. ..... V - 39
Figura 5.44. Comparativa de los valores de la tensión presente en los baños usados y nuevos.. V - 39
Figura 5.45. Gráficos del comportamiento de los buffers a lo largo de los diferentes ensayos, donde RC es recirculación continua, RI es recirculación intermitente y SR es sin recirculación. ..... V - 43
Figura 5.46. Desviación promedio del espesor de las cáscaras obtenidas en la totalidad de los ensayos. ..... V - 46
Figura 5.47. Gráficos del comportamiento de los buffers durante los diferentes ensayos. ..... V - 47
Figura 5.48. Distribución de puntos para la toma de medidas de las cáscaras electroconformadas..... V - 49
Figura 5.49. Defectos observados en las cáscaras de cobre. a) Ensayo de recirculación intermitente potencia de bomba al 90%; b) Ensayo sin recirculación. ..... V - 51
Figura 5.50. Piezas modelo reutilizadas para los diferentes ensayos. ..... V - 52
Figura 5.51. Cáscara obtenida con baño contaminado: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle..... V - 53
Figura 5.52. Cáscara obtenida con baño usado: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle..... V - 53
Figura 5.53. Cáscara obtenida con baño nuevo: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle..... V - 53
Figura 5.54. Falta de relleno en la zona texturizada durante la fase 2. a) visión delantera del cátodo; b) visión trasera del cátodo. ..... V - 54

CAPÍTULO VI

Figura 6.1. Textura de semiesferas bajo relieve: a) perspectiva de la pieza modelo; b) frontal de la pieza modelo; c) lateral de la pieza modelo; d) ampliación zona funcional. ..... VI - 4
Figura 6.2. Textura de piel de tiburón: a) perspectiva de la pieza modelo; b) frontal de la pieza modelo; c) lateral de la pieza modelo; d) representación de la escama en cuadrilla de 50 x 50 micras. ..... VI - 5
Figura 6.3. Electrodo con microtextura de semiesferas entrantes. Medidas a analizar. ..... VI - 5
Figura 6.4. Electrodo con microtextura de piel de tiburón. Medidas a analizar. ..... VI - 5
Figura 6 5. Rectificación de la superficie a estudiar: a) sin rectificar; b) rectificada..... VI - 6
Figura 6 6. Toma de medidas de los elementos generadores de las texturas. ..... VI - 6
Figura 6.7. Estudio de picos y valles. ..... VI - 7
Figura 6.8. Imágenes tomadas con el microscopio estereoscópico Leica S9 E: a) Textura piel de tiburón pieza modelo; b) Textura piel de tiburón cáscara; c) Textura semiesferas pieza modelo; d) Textura semiesferas cáscara; e) Textura flores pieza modelo; f) Textura flores cáscara. ..... VI - 7
Figura 6.9. a) Diseño de la textura funcional compuesta por semiesferas; b) Diseño de la textura funcional bioinspirada en la piel de tiburón (estudio de la réplica de masilla). ..... VI - 8
Figura 6.10. Errores acumulados**:** a) textura de semiesferas; b) textura de piel de tiburón. ..... VI - 9
Figura 6.11. Resolución de la textura de semiesferas en función del protocolo de limpieza, altura de capa y resolución de equipo. ..... VI - 11
Figura 6.12. Resolución de la textura de piel de tiburón en función del protocolo de limpieza, altura de capa y resolución de equipo. ..... VI - 11
Figura 6.13. Visualización de la calidad de la deposición de sobre sobre la pieza modelo. ..... VI - 14
Figura 6.14. Inspección visual de diferentes defectos en las cáscaras de cobre. ..... VI - 15
Figura 6.15. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio. ..... VI - 15
Figura 6.16. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio 2. ..... VI - 15
Figura 6.17. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio 3. ..... VI - 16
Figura 6.18. Toma de puntos de cáscara montada sobre portaerramientas. ..... VI - 16
Figura 6.19. Extracción del perfil de la textura estudiada. ..... VI - 17
Figura 6.20. Geometría del electrodo electroconformado. Obtenido de [383]. ..... VI - 18
Figura 6.21. Refuerzo de las electroformas con el uso de masilla epóxica. ..... VI - 19
Figura 6.22. Procedimiento de relleno y colocación de la cáscara como herramienta SEDM. ..... VI - 19
Figura 6.23. Toma de referencias para el estudio del error de ángulo entre planos: a) colocación del porta con la cáscara; b) toma de medidas con el palpador de rubí. ..... VI - 19
Figura 6.24. Ensayos con equipo SEDM de la ULPGC. ..... VI - 24
Figura 6.25. Electrodos utilizados en los ensayos SEDM: a) cobre macizo; b) EMT_SE_BR_1; c) EMT_TIB_1; d) EMT_SE_SR_1. ..... VI - 25
Figura 6.26. Detalle de las semiesferas erosionadas. ..... VI - 26
Figura 6.27. Comparativa del TWR de electrodo macizo y electrodos electroconformados. ..... VI - 30
Figura 6.28. Comparativa del TWR de electrodo macizo y electrodos electroconformados. ..... VI - 30
Figura 6.29. Definición del ángulo de contacto. ..... VI - 31
Figura 6.30. Esquema y humectación de las cuatro diferentes superficies fabricadas. Obtenido de [30]. ..... VI - 31
Figura 6.31. Clasificación principal de las superficies según su ángulo de contacto. ..... VI - 32
Figura 6.32. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de semiesferas bajo relieve. ..... VI - 35
Figura 6.33. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de piel de tiburón sobre relieve. ..... VI - 37

Figura 6.34. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de piel de tiburón sobre relieve. ....VI - 39
Figura 6.35. Representación gráfica de los valores medios en la textura de piel de tiburón generada mediante SEDM....VI - 39
Figura 6.36. Gráficas donde se ilustran: a) los valores obtenidos para cada textura en términos de ángulo de contacto; b) así como los valores promedios y desviaciones estándar....VI - 42
Figura 6.37. Zonas de medición de las texturas erosionadas. ....VI - 44
Figura 6.38. Zonas de medición de las texturas erosionadas: a) Electrodo macizo; b) EMT_SE_BR_1; c) EMT_TIB_1; d) EMT_SE_SR_1. ....VI - 44
Figura 6.39. Fotografía de la gota sobre la superficie erosionada: a) textura sobre relieve; b) textura bajo relieve....VI - 45
Figura 6.40. Pieza de aluminio 7017 erosionada: a) erosión EMT_SE_BR_1; b) erosión EMT_TIB_1; c) erosión EMT_SE_SR_1 ....VI - 46

Índice de Tablas

CAPÍTULO II

Tabla 2.1. Procesos de fabricación por eliminación de material [78]. ..... II - 21
Tabla 2.2. Procesos de fabricación por deformación de material [78]. ..... II - 21
Tabla 2.3. Procesos de fabricación por autoformación de material [78]. ..... II - 22
Tabla 2.4. Procesos de fabricación por adición de material [78]. ..... II - 22
Tabla 2.5. Resumen de las técnicas de creación rápida de prototipos establecidas [95]. ..... II - 26
Tabla 2.6. Diferencias entre impresión SLA/DLP/LCD [100,101]. ..... II - 29
Tabla 2.7. Clasificación de los diferentes atributos de las resinas [103–107]. ..... II - 31
Tabla 2.8. Clasificación de propiedades mecánicas de las resinas [103–107]. ..... II - 31
Tabla 2.9. Comparativa entre EDM y µ-EDM [225,226] ..... II - 56
Tabla 2.10. Comparativa de bases de datos empleando las palabras claves del estudio. ..... II - 57
Tabla 2.11. Resultados obtenidos en la búsqueda de electrodos electroconformados. ..... II - 58
Tabla 2.12. Resultados obtenidos en la búsqueda de electrodos electroconformados microtexturizados ..... II - 59

CAPÍTULO III

Tabla 3.1. Equipos empleados en la fabricación de las piezas modelo. ..... III - 15
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas para impresión con resina Whanhao Clear. ..... III - 16
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas para impresión con resina Phrozen Aqua 8K. ..... III - 17
Tabla 3.4. Equipos empleados para inspección y medición durante el proceso. ..... III - 21
Tabla 3.4. Equipos empleados para inspección y medición durante el proceso. ..... III - 22

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Ejemplos de texturas geométricas aplicadas en las piezas modelo. ..... IV - 8
Tabla 4.2. Clasificación de las posibles texturas bioinspiradas a realizar. ..... IV - 10
Tabla 4.3. Ejemplos de texturas bioinspiradas aplicadas en las piezas modelo. ..... IV - 10
Tabla 4.4. Ejemplos de texturas estéticas aplicadas en las piezas modelo ..... IV - 11
Tabla 4.5. Comparativa entre equipos MSLA empleados en la investigación. ..... IV - 36
Tabla 4.6. Parámetros empleados para las diferentes resinas utilizadas. ..... IV - 39

CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Programa de deposición inicial. ..... V - 14
Tabla 5.2. Estudio sobre distancia ánodo-cátodo con equipo partida con electrodos texturizados bajo relieve ..... V - 15
Tabla 5.3. Estudio distancia ánodo-cátodo equipo partida con electrodos planos. ..... V - 16
Tabla 5.4. Estudio distancia ánodo-cátodo aumento de espesor en equipo industrial. ..... V - 17
Tabla 5.5. Especificaciones técnicas para impresión con resina Esun PLA Pro. ..... V - 18
Tabla 5.6. Programa de deposición de partida. ..... V - 30
Tabla 5.7. Programa de deposición 4. ..... V - 30
Tabla 5.8. Programa de deposición modificado para realizar ensayos con el nuevo equipo. ..... V - 34
Tabla 5.9. Posiciones ensayadas durante los primeros estudios de distancia con el equipo nuevo ..... V - 35
Tabla 5.10. Ensayo distancia con equipo nuevo en 3 distancias. ..... V - 35
Tabla 5.11. Programa de deposición 3. ..... V - 37

Tabla 5.12. Peso de los electrodos según sus capas de metalizado y material. ..... V - 37
Tabla 5.13. Programa de deposición 4. ..... V - 38
Tabla 5.14. Resultados obtenidos en el estudio de distancia de los electrodos metalizados con oro…. ..... V - 38
Tabla 5.15. Matriz L8 ajustada para analizar el efecto de la recirculación del baño y su potencia…... ..... V - 41
Tabla 5.16. Número de renovaciones según el tipo de ensayo. ..... V - 42
Tabla 5.17. Estudio del efecto de renovación del baño con electrodos reutilizados del ensayo de distancia. ..... V - 43
Tabla 5.18. Relación de incremento de intensidad teórica entre buffers consecutivos. ..... V - 44
Tabla 5.19. Relación obtenida entre buffers consecutivos en los diferentes ensayos. ..... V - 44
Tabla 5.20. Estudio del efecto de renovación del baño con electrodos reutilizados del ensayo de distancia. ..... V - 45
Tabla 5.21. Análisis comparativo de pesos obtenidos en los diferentes ensayos. ..... V - 46
Tabla 5.22. Valores promedio de los buffers para los diferentes ensayos. ..... V - 47
Tabla 5.23. Relación entre los buffers en los diferentes ensayos. ..... V - 48
Tabla 5.24. Valores de peso, volumen y espesor de las cáscaras de cobre en los diferentes ensayos. ..... V - 48
Tabla 5.25. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 60%. ..... V - 49
Tabla 5.26. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 75%. ..... V - 50
Tabla 5.27. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 90%. ..... V - 50
Tabla 5.28. Distribución de espesores para ensayo sin recirculación. ..... V - 50
Tabla 5.29. Tabla resumen de las desviaciones típicas del espesor de cáscara y el espesor promedio. ..... V - 51
Tabla 5.30. Análisis comparativo de pesos obtenidos en los diferentes ensayos. ..... V - 53
Tabla 5.31. Programa de deposición 5. ..... V - 54
Tabla 5.32. Estudio del efecto de la pantalla en microtexturas de semiesfera entrantes. ..... V - 55
Tabla 5.33. Estudio del efecto de la pantalla en microtexturas de semiesfera saliente y textura de piel de tiburón. ..... V - 55
Tabla 5.34. Espesores a lo largo de las cáscaras electroconformadas. ..... V - 56

CAPÍTULO VI

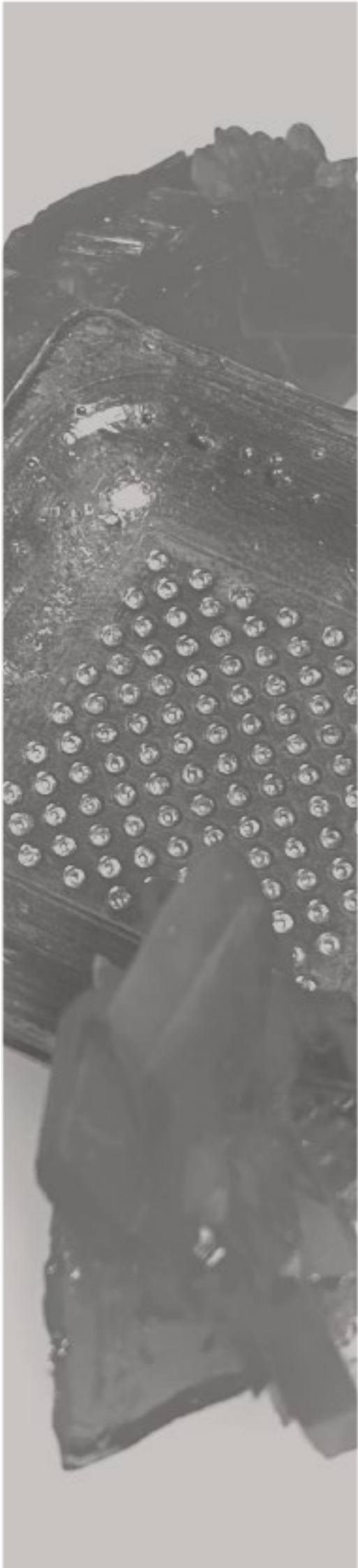
Tabla 6.1. Caracterización metrológica del proceso de generación de texturas de semiesferas de bajo relieve. ..... VI - 8
Tabla 6.2. Caracterización metrológica del proceso de generación de texturas de piel de tiburón. ..... VI - 8
Tabla 6.3. Protocolos de limpieza empleados en el estudio. ..... VI - 10
Tabla 6.4. Caracterización metrológica del proceso de limpieza de la textura de la semiesfera de bajo relieve. ..... VI - 12
Tabla 6.5. Caracterización metrológica del proceso de limpieza de la textura de piel de tiburón. ..... VI - 12
Tabla 6.6. Valores de los diferentes planos a relacionar. ..... VI - 20
Tabla 6.7. Valor de error entre planos. ..... VI - 20
Tabla 6.8. Parámetros para el proceso de SEDM. ..... VI - 21
Tabla 6.9. Parámetros de SEDM para los diferentes electrodos usando como pieza de trabajo Al7010. ..... VI - 21

Tabla 6.10. Parámetros de SEDM para los diferentes electrodos usando como pieza de trabajo Ti6AlV4. ..... VI - 22
Tabla 6.11. Análisis del desgaste de la electroforma tras erosionar de textura piel de tiburón. VI - 22
Tabla 6.12. Análisis del desgaste de la electroforma tras erosionar. ..... VI - 22
Tabla 6.13. Desgaste del electrodo tras su uso como herramienta en el proceso de electroerosión..... ..... VI - 23
Tabla 6.14. Parámetros empleados para una VDI 20 según el tipo de microtextura utilizada. ... VI - 24
Tabla 6.15. Pesos obtenidos en los electrodos tras las diferentes erosiones..... VI - 25
Tabla 6.16. Pesos obtenidos en la pieza de trabajo tras las diferentes erosiones. ..... VI - 26
Tabla 6.17. Tiempos obtenidos durante las diferentes erosiones. ..... VI - 27
Tabla 6.18. Relación entre desgate de electrodo y pieza. ..... VI - 27
Tabla 6.19. Valores de TWR en los diferentes ensayos de electroerosión. ..... VI - 27
Tabla 6.20. Valores de TWR en los diferentes ensayos de electroerosión. ..... VI - 28
Tabla 6.21. Evolución de las cáscaras durante los ensayos..... VI - 29
Tabla 6.22. Texturas bajo relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto. ..... VI - 33
Tabla 6.23. Estudio ángulo de contacto en microtexturas semiesferas. ..... VI - 34
Tabla 6.24. Texturas sobre relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto..... VI - 36
Tabla 6.25. Estudio ángulo de contacto en microtexturas piel de tiburón..... VI - 37
Tabla 6.26. Texturas sobre relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto..... VI - 38
Tabla 6.27. Resultados del ángulo de contacto de las texturas erosionadas..... VI - 45
Tabla 6.28. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_SE_BR_1..... VI - 47
Tabla 6.29. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_TIB_1. ..... VI - 47
Tabla 6.30. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_SE_SR_1. ..... VI - 48
Tabla 6.31. Valores medios de Ra para los diferentes ensayos SEDM realizados en la ULPGC.... VI - 48
Tabla 6.32. Valores de VDI obtenidos a partir de las Ra para los diferentes ensayos SEDM realizados en la ULPGC. ..... VI - 48

Glosario de términos y acrónimos

Abreviatura	Significado
FA	Fabricación aditiva
EDM	Mecanizado por descarga eléctrica
Ra	Rugosidad media aritmética
Rz	Altura media de rugosidad
Rp	Altura máxima de cresta
Rv	Altura máxima de valle
SLA	Estereolitografía
RP	Prototipado rápido
FDM	Modelado por deposición fundida
SLS	Sinterización selectiva por láser
SLM	Fusión selectiva por láser
3DP	Inyección de aglutinante
DLP	Procesamiento digital de luz
MSLA	Estereolitografía por máscara
LOM	Fabricación de objetos laminados
DED	Deposición directa de energía
UV	Láser ultravioleta
F	Frecuencia
AC	Altura de capa
CI	Capas iniciales
TE	Tiempo de exposición
TP	Tiempo parado
TA	Temperatura ambiente
TECI	Tiempo de exposición de capas iniciales
PLA	Ácido poliláctico
PVD	Deposición física de vapor
HAZ	Zonas afectadas por el calor
NIL	Litografía de nanoimpresión
MEMs	Sistemas microelectromecánicos
LIGA	(Litografía, Galvanoformación, Abformación)
EFAB	Fabricación Electroquímica
LECD	Deposición Electroquímica por Láser
GAP	Distancia de arco
t_i	Tiempo de encendido del pulso
t_0	Tiempo de apagado del pulso
I_f	Intensidad de corriente
WEDM	Electroerosión por hilo
SEDM	Electroerosión por penetración
DVEE	Desviación de Diámetro en entrada y salida
IA	Inteligencia artificial
MRR	Tasa de eliminación de material
STL	Standard Tessellation Language
TWR	Tasa de desgaste del electrodo
SLA	Estereolitografía
THJ	Tecnología de chorro térmico

CMM	Máquina de medición por coordenadas
SFF	Fabricación sólida de forma libre
ADAM	Tecnología de difusión atómica



CAPÍTULO I

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión profunda de los fenómenos que ocurren en las superficies, particularmente a escalas micro y submicrométrica, ha sido crucial en las últimas décadas para el avance en una amplia variedad de campos, como la electrónica, energía, tribología y óptica, entre otros. Las propiedades superficiales de los sólidos, incluyendo su estructura y comportamiento en la interfaz sólido-gas o sólido-líquido, desempeñan un papel esencial en la interacción con el medio ambiente y afectan variables críticas como el área real de contacto, el desgaste, la fricción y la lubricación. Estas propiedades son relevantes para aplicaciones clave, como el rendimiento óptico, eléctrico, térmico y la apariencia superficial [1]. Estos avances en la Ingeniería de Superficies han sido posibles gracias a un mayor entendimiento de los mecanismos que influyen en las superficies y cómo estas propiedades impactan el rendimiento de componentes industriales.

Las superficies, ya sean diseñadas por la ingeniería o propias de la naturaleza, presentan textura y estructura, las cuales influyen en fenómenos físicos clave [2]. Este conocimiento ha impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías de fabricación capaces de crear superficies estructuradas de manera controlada, optimizando así diferentes propiedades [2–4]. La texturización funcional, entendida como la creación de patrones geométricos precisos en superficies con el objetivo de mejorar su rendimiento, ha emergido como una solución clave en diversas aplicaciones industriales [5].

Históricamente, se han utilizado diversos métodos para generar texturas en superficies, incluyendo tecnologías avanzadas como el texturizado con láser, el chorro de iones y el ataque químico selectivo [6,7]. Sin embargo, estos métodos, aunque efectivos, presentan limitaciones en cuanto a costos y complejidad [8]. Frente a estos desafíos, técnicas no convencionales como la electroerosión por penetración y el electroconformado o la fabricación aditiva han ganado protagonismo. Estas técnicas permiten generar texturas complejas y de dimensiones micrométricas, algunas imposibles de obtener mediante otros procesos y con mayor eficiencia económica [9]. En particular, la electroerosión por penetración (SEDM) destaca por su capacidad de generar texturas precisas mediante el control de parámetros eléctricos y no eléctricos, aunque la naturaleza estocástica del fenómeno de las chispas implica un reto en su control preciso [10].

El electroconformado ha surgido como una tecnología versátil y altamente eficiente para replicar microtexturas con una precisión extraordinaria, incluso en geometrías complejas. Su capacidad para generar superficies texturizadas con alta reproducibilidad y a bajo costo lo convierte en una técnica atractiva para sectores industriales avanzados como el aeroespacial, automotriz, médico y electrónico. Además, en contraste con otros métodos que requieren la adición de capas adicionales o el uso de materiales costosos, el electroconformado permite la fabricación directa de superficies con texturas funcionales, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia de los procesos de fabricación [15].

De igual forma la fabricación aditiva ha emergido con diferentes tecnologías de gran potencial. Un ejemplo es la tecnología de estereolitografía por máscara (MSLA), la cual posibilita la creación de piezas con alta resolución y complejidad geométrica, facilitando el diseño de superficies micro y nanoestructuradas [12]. De hecho, la generación de texturas directamente en la cara funcional de los electrodos EDM mediante el electroconformado, en combinación con técnicas de fabricación aditiva ofrece un gran potencial para mejorar el rendimiento de estos componentes, tanto en términos de eficiencia como de costos.

No obstante, a pesar de las ventajas del electroconformado, persisten desafíos técnicos significativos que limitan su aplicación a gran escala. Entre ellos, se destacan el control preciso de la distribución del metal en la superficie del cátodo, la gestión de tensiones internas en los depósitos y la formación de defectos, como nódulos o irregularidades, que pueden comprometer la funcionalidad de las superficies texturizadas. En este sentido, la electroerosión por penetración está siendo objeto de

estudios para mejorar su precisión y reproducibilidad, ya que permite generar texturas micrométricas complejas de forma más económica que otros métodos.

En la actualidad, se sigue investigando para generar superficies texturizadas y simplificar la fabricación de electrodos, especialmente en procesos como SEDM. Uno de los factores clave que encarece este proceso es la dificultad de controlar las condiciones del mecanizado, lo que subraya la necesidad de seguir avanzando en el conocimiento y control de estos procesos no convencionales.

La presente investigación se enmarca en este contexto, con el objetivo de mejorar las propiedades superficiales de los electrodos SEDM mediante la incorporación de diversas texturas directamente en su cara funcional. Para ello, se hace uso de la tecnología MSLA, que permite desarrollar con gran precisión texturas de elevada complejidad a escala micrométrica, las cuales se transfieren posteriormente a las piezas modelo requeridas para el proceso de electroconformado. A partir de este proceso, se obtiene una cáscara de cobre con integridad estructural, la cual se transforma en una herramienta texturizada apta para su aplicación en electroerosión por penetración. Con la integración de estas tecnologías, se busca un proceso de fabricación mixto que permita alcanzar propiedades superficiales mejoradas.

En conclusión, esta investigación no solo aborda los desafíos técnicos inherentes a la fabricación de microtexturas, sino que también contribuye al desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes. La relevancia de esta temática radica en su impacto directo en la sociedad, al permitir la creación de productos más funcionales y duraderos que se alinean con las necesidades actuales de la industria, cada vez más dependiente de la precisión y el rendimiento de superficies estructuradas a escala microscópica. A medida que se avanza en la implementación de estas tecnologías, se espera que su adopción impulse sectores clave, mejorando la competitividad y sostenibilidad de la fabricación moderna.

1.1. Antecedentes, Motivación y Alcance

La presente Tesis se desarrolla dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Química, Mecánica y de Fabricación (QUIMEFA) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). Se enmarca en la línea de investigación “Electroconformado. Aplicación a Rapid Tooling” del grupo de investigación en Fabricación Integrada y Avanzada del departamento de Ingeniería Mecánica. Se ha realizado en colaboración con el Grupo de Investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (TEP-027), de la Universidad de Cádiz (UCA), a quien se quiere agradecer todo el apoyo prestado facilitando el acceso a sus instalaciones y al equipamiento con los que se ha podido realizar una parte importante de los ensayos de esta Tesis.

Así mismo, esta Tesis surge a partir del Trabajo Fin de Máster titulado “Texturizado mediante SEDM. Estado del arte y estudio sobre la aplicación del Electroforming en la fabricación de electrodos” que fue realizado en el Máster en Ingeniería de Fabricación de la UCA, que a su vez estaba vinculado con un proyecto de investigación que desarrollaban conjuntamente investigadores de los grupos antes mencionados. La denominación de este proyecto fue “Mejora del Rendimiento Funcional de Superficies mediante la Texturización a Diferentes Escalas” (TEXTURE, DPI2017-84935-R), concedido en la convocatoria nacional Retos de la Investigación 2017. El objetivo de este proyecto era generar estas geometrías texturizadas directamente en el material de la pieza utilizando técnicas de mecanizado no convencionales, como la electroerosión por penetración (SEDM) y el electroconformado. Para lograrlo, era necesario optimizar los parámetros de proceso y desarrollar técnicas de microfabricación relacionadas con el electroconformado, especialmente la obtención de electrodos microtexturizados para procesos SEDM, lo cual representaba un área técnica poco explorada.

En este mismo proyecto de investigación se desarrolló anteriormente otra tesis doctoral de la ULPGC titulada "***Desarrollo de un equipo de Micro-Electroconformado. Estudio experimental de aplicación a la fabricación de herramientas para el texturizado de superficies estructuradas".*** De este proyecto se obtuvieron algunas publicaciones como "*Electroconformado de superficies estructuradas a partir de patrones en SLA/DLP*" presentado en el XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (CNIM), así como una segunda contribución titulada "*Influencia del texturizado por electroerosión en el comportamiento tribológico de la aleación UNS A92024 (Al-Cu) en condiciones de deslizamiento en seco y lubricado*" en la siguiente edición del mismo congreso.

La presente Tesis Doctoral da continuidad a la línea de investigación iniciada hace muchos años por el grupo de investigación de la ULPGC y con el objetivo de complementar la tesis previa ya mencionada profundizando en el conocimiento sobre superficies microtexturizadas generadas por electroconformado y de la influencia de diferentes variables operativas de este proceso, así como el desarrollo y validación herramientas (electrodos SEDM) para la texturización mediante el proceso.

Es importante destacar que este trabajo de investigación ha implicado una componente experimental muy importante para analizar los aspectos críticos en la fabricación de esas herramientas. El electroconformado ofrece una capacidades especialmente adecuadas para la micro y nano-fabricación, como la alta precisión dimensional, la reproducción precisa de los detalles de la superficie, la producción de componentes complejos y de paredes delgadas, así como la posibilidad de complementar a otros procesos de producción [11]. Cuando se requieren tolerancias exigentes, complejidad, geometría ligera y en miniatura, el electroformado es un serio competidor y, en ciertos casos, puede ser el único proceso de fabricación posible o económicamente viable [10,12]. Este proceso consiste en un método para producir objetos sólidos de forma libre por medio de un proceso derivado de la galvanoplastia. El metal se electrodeposita en un molde o pieza modelo, de la que después se retira; por lo que, el propio recubrimiento la cáscara de metal depositado se convierte en el producto fabricado [13,14].

El proceso necesita de una pieza modelo sobre la cual depositar el material y en este caso con el fin de reducir el tiempo de desarrollo del producto y el costo de las herramientas, se han empleado la fabricación aditiva (FA) [15]. Actualmente, las tecnologías de FA se están integrando en las cadenas de valor de muchos sectores industriales logrando reducción de los plazos de entrega y los costos de desarrollo, en muchos casos participando en la fabricación de herramientas de producción [16,17].

Una de las tecnologías más extendida de FA es la estereolitografía por máscara (MSLA), que produce componentes plásticos precisos a partir de resinas fotocurables [18]. Este es un proceso en el cual un fotopolímero líquido que se encuentra en un tanque es curado de forma selectiva por la acción de luz. Este proceso es el empleado en este trabajo de investigación para la fabricación de las piezas modelo que dan lugar a las electroformas de cobre.

Esta tesis tiene el propósito de establecer el estado del arte en el proceso de texturizado mediante tecnologías de electroerosión por penetración, con un enfoque particular en la fabricación de electrodos microtexturizados. Estudia la integración de la tecnología MSLA y el electroconformado, analizando los principales parámetros que influyen en la fabricación de estos electrodos. Busca evaluar la viabilidad del electroconformado como una alternativa más eficiente y económica a los métodos convencionales de mecanizado de electrodos SEDM, contribuyendo así al avance en la microfabricación de estas herramientas.

Este estudio también pretende optimizar el diseño de microtexturas funcionales en los electrodos, un área que, pese a su creciente relevancia en la industria, ha sido poco explorada. Las microtexturas juegan un papel clave en la mejora de las propiedades de muchos productos, ya que la introducción de patrones geométricos o biomiméticos, en sus superficies puede mejorar su rendimiento en diversas aplicaciones.

Así, el estudio y desarrollo de estas texturas a través de técnicas no convencionales, como la electroerosión por penetración y el electroconformado, representan una vía prometedora para la mejora en la fabricación de estas superficies. Este trabajo, por tanto, no solo se centra en el perfeccionamiento de técnicas existentes, sino que pretende contribuir con innovaciones que incrementen la eficiencia y sostenibilidad en el ámbito de la ingeniería de superficies, lo que podría tener un impacto significativo en sectores industriales clave.

1.2. Contexto de aplicación

En la sociedad actual, la demanda de productos personalizados y la eficiencia en la producción son imperativos. En este contexto, la texturización funcional se presenta como una herramienta crucial para abordar estos desafíos, especialmente en el ámbito de los procesos industriales.

La capacidad de aplicar texturas a niveles micro y nano se convierte en un recurso para mejorar el rendimiento de componentes y dispositivos en el panorama industrial contemporáneo. La texturización funcional no solo es un motor de innovación tecnológica, sino que también aporta significativamente a la economía y a la sostenibilidad ambiental al optimizar procesos y recursos en una amplia variedad de sectores. Como ejemplo en muchas aplicaciones industriales, la texturización funcional no solo minimiza la fricción y el desgaste, lo que se traduce en ahorro de costos y mayor eficiencia en la producción, sino que también impulsa la competitividad de las empresas en mercados globalizados, generando beneficios económicos sostenibles.

En otros sectores como la electrónica, mejora el rendimiento de dispositivos; en energías renovables, aumenta la eficiencia en paneles solares y turbinas eólicas. En la industria automotriz, reduce la resistencia al aire y fomenta la eficiencia en el consumo de combustible. En la atención médica, facilita la integración de implantes y dispositivos médicos, mejorando la calidad de la atención al paciente. En la aeroespacial, optimiza la aerodinámica y garantiza la seguridad en vuelo. Impulsa avances en nanotecnología y respalda la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a la conservación de recursos naturales y la mitigación de impactos ambientales.

En resumen, la texturización funcional desempeña un papel esencial en la mejora de la eficiencia y el rendimiento en una amplia gama de aplicaciones y sectores industriales. Comprender su relevancia da la posibilidad de emplear una herramienta poderosa para abordar las cambiantes demandas de la sociedad moderna. En un contexto donde la personalización y la eficiencia son esenciales, estudiar y aplicar la texturización funcional se convierte en un paso vital para participar de forma competitiva y exitosa en el ámbito de la producción industrial actual.

1.3. Hipótesis y Objetivos de la investigación

La presente investigación se fundamenta en la identificación de una evidente brecha en el conocimiento relativo a la generación de electrodos microtexturizados mediante la integración de procesos no convencionales, en particular la fabricación aditiva y el electroconformado. La carencia de un marco teórico y experimental estandarizado que defina de manera precisa los parámetros operativos constituye el núcleo del problema abordado en esta tesis doctoral. En este contexto, se establecen las siguientes hipótesis y se formulan los objetivos que orientarán el desarrollo de la investigación.

1.3.1. Hipótesis

Con base en los antecedentes y en la revisión de la literatura, se plantean las siguientes hipótesis, las cuales se pretenden corroborar mediante el desarrollo experimental y la validación metrológica de los electrodos obtenidos:

H1. Mediante la combinación de las tecnologías de fabricación aditiva (MSLA), electroconformado y electroerosión por penetración, se pueden desarrollar herramientas innovadoras con alto valor en diseño, que también mejoren la sostenibilidad y eficiencia de estos procesos de fabricación.

H2. Es posible identificar qué etapa de este proceso de fabricación mixto es la más limitante en el desarrollo de una herramienta para SEDM en función de su tipología y geometría.

H3. Se puede analizar si las limitaciones del proceso de electroconformado a nivel macroescala, motivadas por la mayor o menor exposición de las determinadas características geométricas, se presentan con la misma importancia en aplicaciones a microescala. cuando se propongan texturas en sobre relieve o en bajo relieve.

H4. Se puede identificar los parámetros operativos del proceso de electroconformado que permiten obtener cáscaras de cobre de calidad de forma controlada y repetible a para su aplicación en el microtexturizado por SEDM

H5. Es posible identificar qué características geométricas aptas para el electroconformado pueden conseguir mejoras funcionales en superficies texturizadas mediante SEDM.

1.3.2. Objetivos

El propósito general de esta tesis es diseñar y validar una metodología de trabajo para la fabricación de electrodos SEDM microtexturizados de cobre, mediante la combinación de la tecnología MSLA y electroconformado, orientada a mejorar la eficiencia en la generación de estas herramientas. Para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

O1. Realizar una exhaustiva revisión bibliográfica de los procesos de fabricación implicados en la generación de electrodos SEDM microtexturizados, a fin de establecer un marco teórico que permita fundamentar la integración de técnicas de electroconformado y fabricación aditiva por MSLA.

O2. Establecer una metodología integrada y replicable para la fabricación de electrodos SEDM microtexturizados mediante la combinación secuencial de fabricación por MSLA y electroconformado.

O3. Identificar y clasificar los defectos más comunes durante este proceso de fabricación de los electrodos microtexturizados.

O4. Diseñar piezas modelo adecuadas para electroconformado que permitan conseguir superficies que aporten mejoras funcionales.

O5. Generar texturas de mayor complejidad geométrica mediante diseño paramétrico.

O6. Evaluar el potencial de reutilización de las piezas modelo en diversos ciclos de electroconformado, estudiando su nivel de degradación.

O7. Identificar y estudiar los parámetros críticos del proceso de electroconformado que aseguren la repetitividad y uniformidad en las cáscaras de cobre.

O8. Analizar el efecto de distintas configuraciones geométricas de texturas en la uniformidad del recubrimiento, identificando restricciones de diseño impuestas por la naturaleza del proceso de electroconformado

O9. Proponer alternativas para conseguir aumentar la rigidez en las cáscaras de cobre que eviten deformaciones en su manipulación y operación en la electroerosión.

O10. Validar experimentalmente el desempeño de los electrodos SEDM y la funcionalidad las superficies texturizadas obtenidas con ellos.

1.4. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos y validar las hipótesis planteadas, se ha diseñado un enfoque metodológico estructurado en tres fases interrelacionadas: la fase inicial, la fase experimental y la fase final (véase Figura 1.1). Cada una de estas fases contribuye de manera integral al desarrollo y la consolidación del marco de trabajo orientado a la generación de electrodos microtexturizados.

1.4.1. Fase Inicial

En esta primera fase se analizará la literatura científica relacionada con la temática de la tesis, con la que establecer las pautas de trabajo y plantear el punto de partida de la investigación. Los pasos clave de esta fase incluyen:

1. **Revisión bibliográfica:**

   Se examinarán estudios y publicaciones indexadas en bases de datos de alto impacto (Scopus, Web of Science, Elsevier), con el fin de identificar avances recientes y lagunas en el conocimiento relacionadas con el electroconformado y la fabricación aditiva aplicada a la microfabricación de electrodos. Este análisis permitirá la fundamentación teórica necesaria para la propuesta metodológica.

2. **Definición del marco de trabajo**:

   A partir del estado del arte, se establecerá un marco conceptual y experimental que guíe la integración de las tecnologías implicadas. Se determinarán los parámetros críticos a estudiar, tales como la uniformidad de la deposición, el control de espesores y la fidelidad en la reproducción de microtexturas.

3. **Diseño de piezas modelo y microtexturas**:

   Se definirán las características geométricas y funcionales de las piezas modelo, así como de los patrones texturizados. Esta etapa incluye la aplicación de herramientas de diseño paramétrico para generar modelos ajustables y replicables, con el objetivo de optimizar tanto la estética como la funcionalidad de las superficies a fabricar.

1.4.2. Fase Experimental

La fase experimental se centra en la aplicación práctica del marco de trabajo definido, abarcando el desarrollo, mejora y validación de los procesos de fabricación. En esta fase se contemplan las siguientes actividades:

1. **Evaluación y rediseño del equipo de electroconformado:**

   Se llevó a cabo una revisión y el rediseño del equipamiento de laboratorio, con el fin de garantizar un control preciso de las variables del proceso (por ejemplo, parámetros eléctricos, tiempo de deposición y recirculación del baño). Esta optimización fue crucial para asegurar la repetitividad y uniformidad de las electroformas.

2. **Diseño de experimentos y ensayos preliminares**:

   Se implementó un diseño experimental riguroso que permitió identificar la influencia de los parámetros operativos sobre la calidad de los electrodos. Los ensayos preliminares sirvieron para ajustar variables críticas y establecer condiciones óptimas de operación.

3. **Ensayos finales:**

   Una vez optimizados los parámetros operativos en las fases preliminares, se procedió a la realización de ensayos finales que permitieron evaluar de forma integral la viabilidad y el rendimiento de la metodología propuesta.

4. **Generación de cáscaras electroconformadas óptimas**:

   Se fabricaron las cáscaras electroconformadas utilizando los parámetros óptimos definidos en las fases anteriores. Se llevó a cabo una caracterización metrológica detallada de las piezas resultantes, enfocándose en la uniformidad del espesor, la fidelidad en la replicación de las microtexturas y el acabado superficial.

5. **Validación de las cáscaras de cobre como herramientas en SEDM**:

   Posteriormente, se utilizó las cáscaras electroconformadas como electrodos en procesos de SEDM. Se evaluó el rendimiento de dichos electrodos en condiciones de operación reales, analizando su capacidad de reproducir patrones microtexturizados de alta precisión, su durabilidad durante múltiples ciclos de uso y la eficiencia global.

1.4.3. Fase Final

La fase final se orientó al análisis de los resultados obtenidos y a la evaluación de la aplicabilidad industrial de la metodología propuesta. Las actividades en esta fase comprenden:

1. **Análisis y validación de resultados:**

   Se realizó un análisis de los datos experimentales, con el objetivo de corroborar la relación entre los parámetros operativos y la calidad de las electroformas.

2. **Elaboración de conclusiones y propuestas de mejora:**

   Con base en el análisis de resultados, se han establecido las conclusiones sobre la efectividad del enfoque integrado y se han propuesto posibles líneas de mejora para futuras investigaciones. Se ha destacado, asimismo, el impacto ambiental positivo de la metodología.

La Figura 1.1 ilustra de manera esquemática la secuencia y la interrelación entre las fases descritas, ofreciendo una visión global del proceso metodológico adoptado. Este enfoque, sustentado en rigurosos criterios experimentales, se alinea con los estándares de calidad y precisión requeridos en el ámbito de la microfabricación de herramientas para procesos avanzados de electroerosión por penetración.



Figura 1.1. Metodología empleada en la realización de la Tesis.

1.5. Organización de la Tesis Doctoral (Estructura del documento)

El presente documento se estructura de manera sistemática en siete capítulos y una serie de anexos, cada uno de los cuales ha sido desarrollado con la intención de organizar la amplia información disponible para facilitar su interpretación e intentando mantener todo el rigor científico y tecnológico requerido en un trabajo de investigación (véase Figura 1.2). Se considera que esta organización permite una exposición coherente y progresiva del marco teórico, metodológico y experimental, facilitando la comprensión integral del trabajo.



Figura 1.2. Esquema de los capítulos relacionados con los objetivos y las hipótesis planteadas.

- **Capítulo I – Introducción:**

  Se presenta el planteamiento del problema, la justificación de la investigación, la formulación de hipótesis y objetivos, las fases del trabajo y la organización del documento.

- **Capítulo II. Estado de la cuestión en texturizado por electroerosión:**

  Se realiza una revisión crítica y exhaustiva de la literatura, enfocándose en los avances teóricos y tecnológicos en la texturización de superficies, y en particular, en los procesos de electroconformado, fabricación aditiva y electroerosión por penetración. Se identifican las lagunas existentes y se establece el contexto en el que se inscribe la investigación. Además, se analizan los trabajos previos en el campo de la generación de electrodos mediante métodos no convencionales, sirviendo como puente entre la revisión del estado del arte y el desarrollo experimental de la tesis.

- **Capítulo III. Metodología aplicada y equipamiento empleado:**

  Se describe la metodología que se ha aplicado agrupando los diferentes estudios realizados no por orden cronológico sino por afinidad temática en tres bloques: Diseño y fabricación de piezas modelo, Electroconformado de cáscaras de cobre y Validación de las superficies microtexturizadas. Se describe el equipamiento empleado en el desarrollo de esta tesis.

- **Capítulo IV. Diseño y fabricación de piezas modelo:**

  En este capítulo se profundiza en el diseño y rediseño de los electrodos microtexturizados, abordando tanto aspectos geométricos como funcionales. Se presentan consideraciones clave de diseño, incluyendo la selección de microtexturas y el uso de herramientas paramétricas para optimizar dichas texturas. Asimismo, se discuten mejoras adicionales relacionadas con la optimización del equipo de fabricación aditiva y del postprocesado.

- **Capítulo V. Electroconformado de cáscaras de cobre:**

  Este capítulo describe el equipo de electroconformado utilizado en los experimentos. Se comienza con el equipo de partida, analizando sus principales características y posteriormente se detallan los ajustes y rediseños implementados en el mismo para mejorar su operatividad, fiabilidad y la calidad de las electroformas. Se describe el programa de control del proceso de electrodeposición y cómo ha evolucionado en función de la problemática encontrada y las soluciones aportadas. Además, se exploran los efectos de varios parámetros clave, como la distancia entre ánodo y cátodo, la renovación y recirculación del baño.

- **Capítulo VI. Validación de superficies microtexturizadas:**

  En este capítulo se integran diferentes estudios abordados en la tesis dirigidos al análisis de las superficies texturizadas. Por una parte, se presenta la caracterización metrológica de las piezas modelo y de las cáscaras de cobre, evaluando la precisión dimensional, el acabado superficial y la fidelidad en la replicación de las microtexturas. Por otra parte, se exponen los estudios de electroerosión por penetración, donde se analiza el rendimiento de las electroformas cuando se utilizan como herramientas en condiciones reales de operación.

- **Capítulo VII. Conclusiones y líneas de trabajo futuras:**

  Se sintetizan los hallazgos más relevantes de la investigación y se plantean posibles líneas de mejora y futuras investigaciones.

- **Anexos:**

  Se incluirá documentación complementaria que abarca desde fichas técnicas y certificados de los equipos utilizados, protocolos experimentales detallados, resultados adicionales, entre otra información relevante del trabajo realizado.

Mencionar que, en el desarrollo de esta Tesis se han empleado herramientas de inteligencia artificial como soporte para una búsqueda más exhaustiva del estado de la cuestión, así como también se han empleado para modificar imágenes y para la traducción y síntesis de algún texto.



CAPÍTULO II

Estudio de la cuestión en texturizado por electroerosión

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN EN TEXTURIZADO POR ELECTROEROSIÓN

La ingeniería de superficies ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, consolidándose como un área fundamental en el diseño y desarrollo de componentes funcionales. Este campo multidisciplinar se centra en la modificación de las características superficiales de los materiales para optimizar su desempeño en aplicaciones específicas, lo que incluye propiedades, ópticas, hidrofóbicas, mecánicas y atributos estéticos entre otros [1,2]. La relevancia de estas modificaciones se amplifica en el ámbito de la fabricación avanzada, donde la interacción entre las superficies y los entornos operativos juega un papel crucial en la funcionalidad y longevidad de los componentes.

En este contexto, la texturización de superficies emerge como una estrategia clave para implementar soluciones de diseño avanzado, lo que ha generado aplicaciones innovadoras en áreas como la óptica, la biomédica y la mecánica de fluidos [3,4]. En particular, la microtexturización ha demostrado ser esencial en procesos como la electroerosión por descarga eléctrica (EDM), donde las propiedades topográficas de los electrodos determinan directamente parámetros clave como la calidad del mecanizado, la precisión y la eficiencia energética del proceso [5].

La fabricación de electrodos microtexturizados para EDM plantea desafíos técnicos específicos que exigen la integración de tecnologías avanzadas. La combinación de procesos de fabricación aditiva (FA), recubrimientos mediante *sputtering* y técnicas de electroconformado permite obtener estructuras de alta precisión con geometrías complejas y propiedades optimizadas para aplicaciones de EDM. Estos procesos no solo ofrecen versatilidad en el diseño, sino que también posibilitan la reproducción de texturas funcionales inspiradas en fenómenos naturales, como el efecto loto o la piel de tiburón, adaptándolas a requerimientos industriales específicos, lo que se conoce como ingeniería biomimética [6,7].

Adicionalmente, la correcta caracterización metrológica de las superficies microtexturizadas es indispensable para garantizar su funcionalidad. Las técnicas de metrología de superficies, como la perfilometría óptica ha demostrado ser una herramienta crítica en la evaluación de parámetros como la rugosidad, la anisotropía y la frecuencia espacial de las texturas, permitiendo correlacionar las características topográficas con el desempeño funcional de las superficies [8].

El objetivo de este capítulo es proporcionar un marco conceptual y técnico que contextualice la investigación desarrollada en esta tesis. Se aborda, en primer lugar, la texturización de superficies desde una perspectiva integral, explorando su impacto en aplicaciones funcionales y su relevancia en la ingeniería biomimética. Posteriormente, se realiza un análisis de las principales técnicas de modificación superficial, con un enfoque particular en los procesos involucrados en la fabricación de electrodos para EDM. Finalmente, se revisan las herramientas de caracterización metrológica empleadas para evaluar la calidad y funcionalidad de las superficies microtexturizadas, destacando su importancia en la validación de procesos de fabricación avanzada.

2.1. Superficies en la ingeniería

En la actualidad, el estudio y diseño de superficies funcionales representa un campo estratégico dentro de la ingeniería, debido a su influencia directa en el rendimiento, durabilidad y comportamiento de materiales y componentes. La superficie de un material, entendida como la región que interactúa con el entorno externo, es determinante en diversos procesos. Por tanto, comprender su estructura, composición y funcionalidad es esencial para el desarrollo de soluciones tecnológicas avanzadas.

Este apartado se centra en el análisis de la ingeniería de superficies, una disciplina dedicada a la modificación controlada de las capas superficiales de los materiales con el objetivo de mejorar o adaptar sus propiedades a requerimientos funcionales específicos. Además, se abordarán las técnicas de caracterización superficial, esenciales para evaluar y cuantificar parámetros como la rugosidad, la topografía, la energía superficial o la composición química, los cuales son fundamentales para correlacionar la estructura con el comportamiento funcional. Y por último se explorará el papel de la biomímesis como enfoque inspirador en la ingeniería moderna.

2.1.1. Tipologías de superficies

En la ingeniería moderna es posible encontrar una gran variedad de superficies, cuya clasificación depende del modo en que han sido generadas y del propósito que cumplen. En el contexto de este trabajo, se emplea la definición de superficies de ingeniería como aquellas que han sido generadas deliberadamente, mediante procesos diseñados para modificar tanto su geometría superficial como sus capas subsuperficiales, con el objetivo de conferirles propiedades funcionales concretas [9].

El investigador Stout propuso una clasificación ampliamente aceptada para las superficies de ingeniería (Figura 2.1), basada en el grado de control ejercido sobre su generación, su patrón geométrico y su funcionalidad [9].

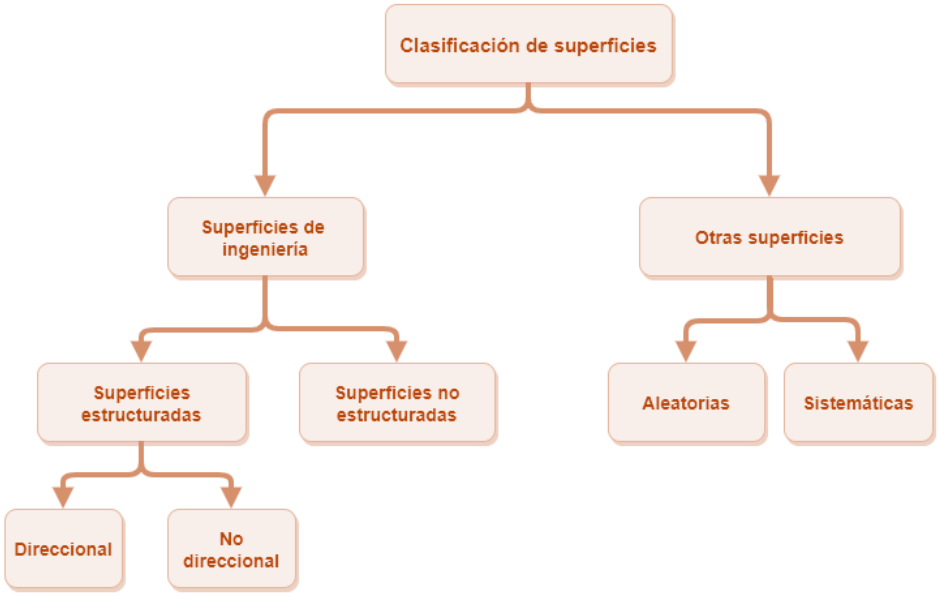


Figura 2.1. Clasificación de las superficies. Adaptada de [9].

Esta clasificación permite distinguir entre distintos tipos de superficies según su origen y estructura:

- Superficies de ingeniería: aquellas generadas de forma intencionada, alterando su superficie y subcapas para proporcionar un rendimiento funcional definido.
- Superficies estructuradas: superficies de ingeniería que presentan un patrón geométrico regular, diseñado específicamente para cumplir una función determinada. Suelen caracterizarse por una elevada relación de aspecto.
- Superficies direccionales: subconjunto de las estructuradas, cuyo patrón geométrico presenta una orientación definida, que influye en su comportamiento funcional.

- Superficies no direccionales: superficies estructuradas con un patrón determinista, pero sin una orientación dominante.
- Superficies no estructuradas: superficies en las que se ha intentado generar textura mediante un control parcial del proceso de fabricación, sin llegar a formar un patrón geométrico regular.
- Otras superficies: aquellas que no se han generado con criterios funcionales explícitos, resultando directamente del proceso de fabricación sin control sobre su carácter superficial.
- Superficies aleatorias: derivadas de procesos aleatorios o pseudoaleatorios, a menudo diseñadas para evitar características sistemáticas o repetitivas.
- Superficies sistemáticas: presentan elementos repetitivos, consecuencia de limitaciones inherentes al proceso de fabricación empleado.

Esta clasificación resulta fundamental para entender el enfoque que sigue la ingeniería de superficies, ya que permite diferenciar entre superficies tratadas específicamente con objetivos funcionales, y aquellas que resultan del proceso sin un control detallado de sus propiedades. A continuación, se describirán en mayor profundidad, aquellas en las que se centra esta investigación.

2.1.1.1. Ingeniería de superficies

En el ámbito de la estandarización internacional, se define la superficie real como el conjunto de elementos geométricos físicamente existentes que delimitan un cuerpo y lo separan del medio que lo rodea [10]. Esta definición, aparentemente simple, adquiere una dimensión compleja en el campo de la ingeniería, donde las superficies no solo son límites geométricos, sino también zonas de interacción crítica con el entorno.

Desde el punto de vista funcional, el diseño y fabricación de superficies está orientado a satisfacer requisitos específicos, lo que da origen a las llamadas superficies de ingeniería. Estas superficies no surgen de forma fortuita, sino que son resultado de un diseño deliberado que contempla no solo la geometría superficial, sino también las propiedades estructurales y fisicoquímicas de las capas más externas del material [10].

El desarrollo de la ingeniería de superficies como campo independiente se remonta a los avances en tribología durante la década de 1980, cuando investigadores como N.P. Suh y N. Saka demostraron que las propiedades funcionales de un componente podían mejorarse significativamente mediante la modificación de su topografía superficial, más allá de las propiedades intrínsecas del material [11]. Este descubrimiento marcó un cambio de paradigma, consolidando la noción de que la superficie es un factor de diseño clave.

Autores como K.J. Stout y C.J. Evans [12,13] contribuyeron a establecer las bases teóricas de esta disciplina, siendo Stout quien en 2001 propuso una definición formal del concepto de superficie de ingeniería como aquella que ha sido modificada de forma deliberada —tanto en su geometría como en sus capas subsuperficiales— para mejorar su rendimiento funcional [9].

La ingeniería de superficies tiene como finalidad principal la modificación controlada de las propiedades de una superficie para adaptarla a su entorno de operación. Esta adaptación busca mejorar el rendimiento funcional, la durabilidad, la eficiencia energética y la estética del componente [14–16]. En muchas aplicaciones, la superficie actúa como barrera protectora o como interfaz activa en fenómenos de intercambio de calor, electricidad, carga mecánica o transferencia química [15,17].

Entre las mejoras más buscadas se encuentra la protección frente a la corrosión, ya sea mediante el uso de barreras físicas o a través de mecanismos de protección electroquímica. Asimismo, se busca el control de las propiedades eléctricas, permitiendo tanto el aislamiento como la conducción. En el plano mecánico, las superficies pueden ser modificadas para incrementar la dureza, la tenacidad y la resistencia a la fatiga, mejorando así la integridad estructural del componente. Otra mejora fundamental es la reducción del desgaste por fricción, no solo incrementando la vida útil de los sistemas, sino también contribuyendo al ahorro energético. Además, se trabaja en el control del comportamiento térmico para facilitar o inhibir la transferencia de calor. A nivel visual y sensorial, la ingeniería de superficies también permite mejoras estéticas, a través de acabados definidos, efectos cromáticos o funcionalidades avanzadas como la repelencia a líquidos. Finalmente, en el ámbito médico, estas tecnologías permiten la adaptación biomédica de los materiales, favoreciendo la biocompatibilidad, la adhesión celular o la resistencia a la colonización bacteriana.

Gracias a esta versatilidad, la ingeniería de superficies se ha consolidado como una tecnología transversal, aplicable a sectores muy diversos. En el sector aeroespacial, se utiliza para mejorar la resistencia al desgaste y el rendimiento térmico de componentes como álabes de turbina o estructuras sometidas a entornos hostiles [16,17]. En la industria manufacturera, su aplicación en herramientas de corte permite prolongar su vida útil y reducir significativamente la fricción y el desgaste [14]. En el campo de la biomedicina, el diseño de superficies funcionalizadas ha posibilitado avances en implantes capaces de fomentar la regeneración celular o de inhibir la proliferación microbiana [15]. Finalmente, en ámbitos como la estética y el deporte, estas técnicas permiten aplicar funcionalidades a componentes de alto rendimiento y generar acabados visuales atractivos para sectores como la joyería, la arquitectura o el diseño industrial [18].

2.1.1.2. Superficies estructuradas

Las superficies estructuradas se definen como aquellas que presentan una organización geométrica deliberada, con patrones deterministas caracterizados habitualmente por una alta relación de aspecto. Según Wang, Jian [19], estas estructuras se diseñan con el propósito de conferir funcionalidades específicas, permitiendo modificar el comportamiento de películas delgadas, polímeros y componentes técnicos.

La estructuración de la superficie, especialmente a micro y nanoescala, permite ajustar propiedades funcionales no ópticas, tales como la humectabilidad, la adhesión, o el coeficiente de fricción, lo cual es fundamental en numerosas aplicaciones de ingeniería avanzada. En efecto, las superficies de ingeniería incorporan tanto textura como estructura, según señala la literatura [12].

En la Figura 2.2 se muestra una clasificación adaptada de [20], que organiza las superficies estructuradas atendiendo a la escala de análisis. Esta distinción es fundamental, ya que el diseño y el efecto funcional de una superficie varían considerablemente entre la escala micrométrica (donde predomina el estudio del texturizado) y la nanométrica (donde se analizan principalmente las formas estructurales y su disposición).

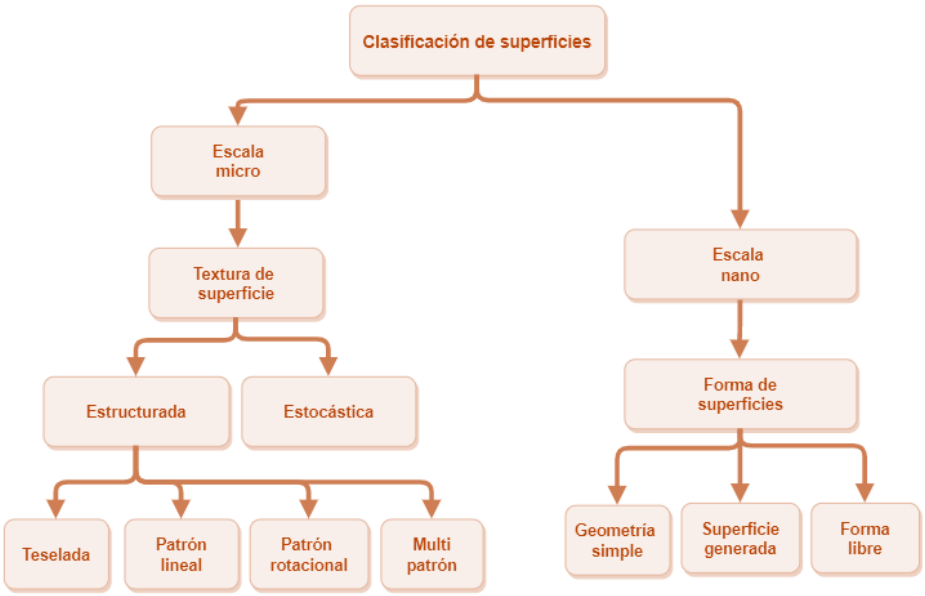


Figura 2.2. Clasificación de las superficies de ingeniería. Adaptada de [20].

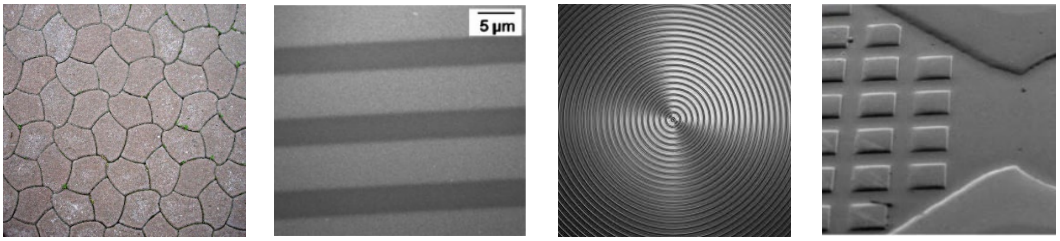
En este trabajo se centrará el análisis en la escala micrométrica, especialmente en lo que respecta a la textura superficial. En este nivel, el diseño se basa en patrones geométricos definidos, cuya repetición o distribución condiciona propiedades como el deslizamiento, la retención de fluidos o la interacción con otros cuerpos. Dentro de este conjunto se pueden distinguir varias tipologías, representadas esquemáticamente en la Figura 2.3:

- **Superficies teseladas**: presentan una organización periódica en coordenadas cartesianas, basada en la repetición de unidades geométricas (teselas) que llenan el plano sin dejar huecos ni solapamientos. Este tipo de superficies puede clasificarse matemáticamente mediante el sistema de *grupos wallpaper* [19,21].

- **Superficies con patrón lineal**: constituyen un caso particular de las teseladas, en las que una celda unidimensional de alta relación de aspecto se repite en una única dirección, generando una textura lineal continua.

- **Superficies con patrón rotacional**: organizadas en coordenadas polares, presentan una repetición radial alrededor de un punto central, generando patrones simétricos de rotación [19].

- **Superficies multipatrón**: carecen de una estructura periódica definida, mostrando una disposición compleja o mixta que no se ajusta a los patrones anteriores.



a) b) c) d)

Figura 2.3. Esquemas geométricos: a) superficie teselada; b) superficie patrón lineal; c) superficies patrón rotacional; d) superficies multipatrón.

En los procesos de fabricación tradicionales, la organización de las microestructuras superficiales suele ser estocástica. Este término, más amplio que "aleatorio", se utiliza para describir superficies generadas por fenómenos que no siguen un patrón determinista, pero sí presentan ciertas características estadísticas reproducibles. Un ejemplo típico de superficie con esta naturaleza estocástica es la generada mediante EDM, un proceso que será analizado en detalle a lo largo de este trabajo.

2.1.2. Acabado superficial

El acabado superficial es un parámetro esencial en la evaluación funcional y estética de un componente. A diferencia del texturizado, que introduce estructuras con fines funcionales específicos, el acabado superficial se refiere a la condición geométrica final de la superficie tal como resulta del proceso de fabricación y sus tratamientos posteriores.

Todos los procesos de fabricación dejan marcas distintivas en las piezas, generando un patrón superficial asociado al tipo de mecanizado, herramienta utilizada o condiciones del proceso. Estas características, si bien eran inicialmente una consecuencia del proceso, han sido cada vez más controladas y optimizadas mediante tratamientos de postprocesado con el objetivo de cumplir especificaciones técnicas y visuales precisas [22].

El acabado superficial se caracteriza mediante una serie de parámetros que incluyen la rugosidad, la ondulación, la orientación y la presencia de defectos (véase Figura 2.4) [12,22].

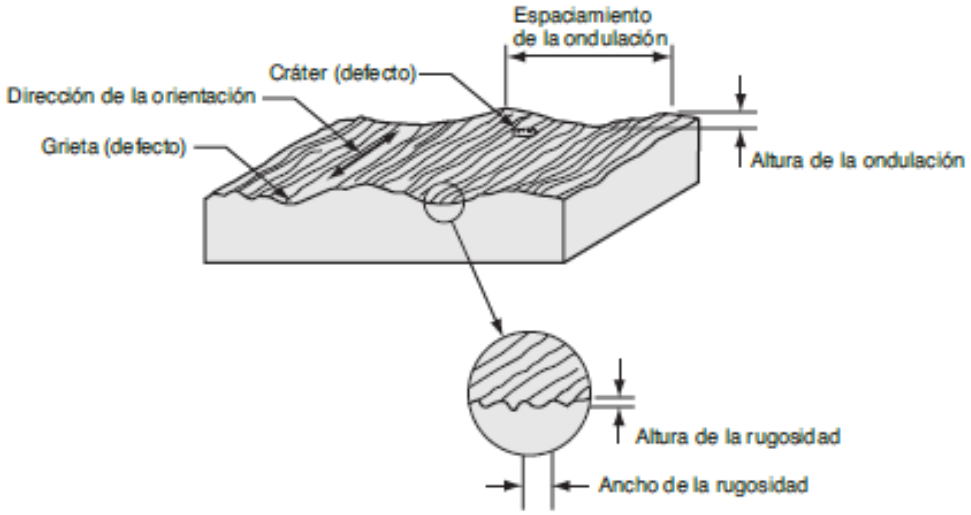


Figura 2.4. Características generales del acabado superficial de una superficie [22].

A continuación, se detallan los conceptos básicos que conforman el acabado [22,23]:

- **Ondulación**: desviaciones espaciales amplias, generadas comúnmente por vibraciones, deflexiones durante el mecanizado o tratamientos térmicos.

- **Rugosidad**: pequeñas irregularidades superpuestas a la ondulación, que dependen tanto del material como del proceso de fabricación. La Figura 2.5 representa cómo se cuantifica esta rugosidad mediante la desviación vertical promedio respecto a una línea media sobre una longitud de evaluación [22].

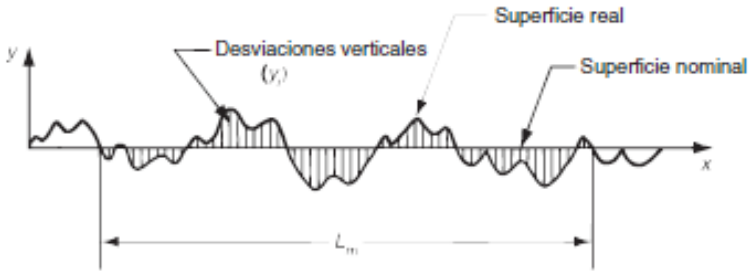


Figura 2.5. Desviaciones usadas en la rugosidad [22].

- **Orientación**: dirección predominante del patrón superficial, directamente relacionada con la trayectoria de la herramienta durante el mecanizado.
- **Defectos**: imperfecciones puntuales como grietas, poros, hendiduras o deformaciones locales, generalmente no periódicas.

El acabado superficial no debe entenderse únicamente desde un punto de vista estético. En planos de ingeniería, su especificación responde a la necesidad de garantizar especificaciones funcionales entre superficies. Un acabado excesivamente fino puede suponer un coste innecesario si no aporta beneficios reales, mientras que un acabado deficiente puede comprometer el rendimiento del producto [24].

En este contexto, se distinguen dos niveles en el estudio de la superficie: la textura superficial, asociada a la topografía observable, y la integridad superficial, que engloba las características del material justo por debajo de la superficie y que pueden verse alteradas por los procesos de fabricación [22].

Desde el punto de vista metrológico, las irregularidades superficiales se dividen en errores macrogeométricos (como planicidad, rectitud o circularidad), y microgeométricos, correspondientes a la rugosidad propiamente dicha [25]. Al cortar la superficie con un plano perpendicular, se obtiene el perfil real que describe su geometría. Este perfil, al ser evaluado mediante instrumentos palpadores, es suavizado debido a las limitaciones físicas del palpador, dando lugar al denominado perfil primario P [26].

De acuerdo con la norma UNE-EN-ISO 4287:1999, este perfil primario puede filtrarse para obtener dos curvas fundamentales (véase Figura 2.6):

- **El perfil de rugosidad R**, obtenido al aplicar un filtro de longitud de onda corta (λc), eliminando así las ondulaciones de baja frecuencia.
- **El perfil de ondulación W**, se obtiene del perfil primario al suprimir las componentes de gran longitud de onda aplicando el filtro λf y las componentes de pequeña longitud de onda (alta frecuencia) mediante el filtro λc.

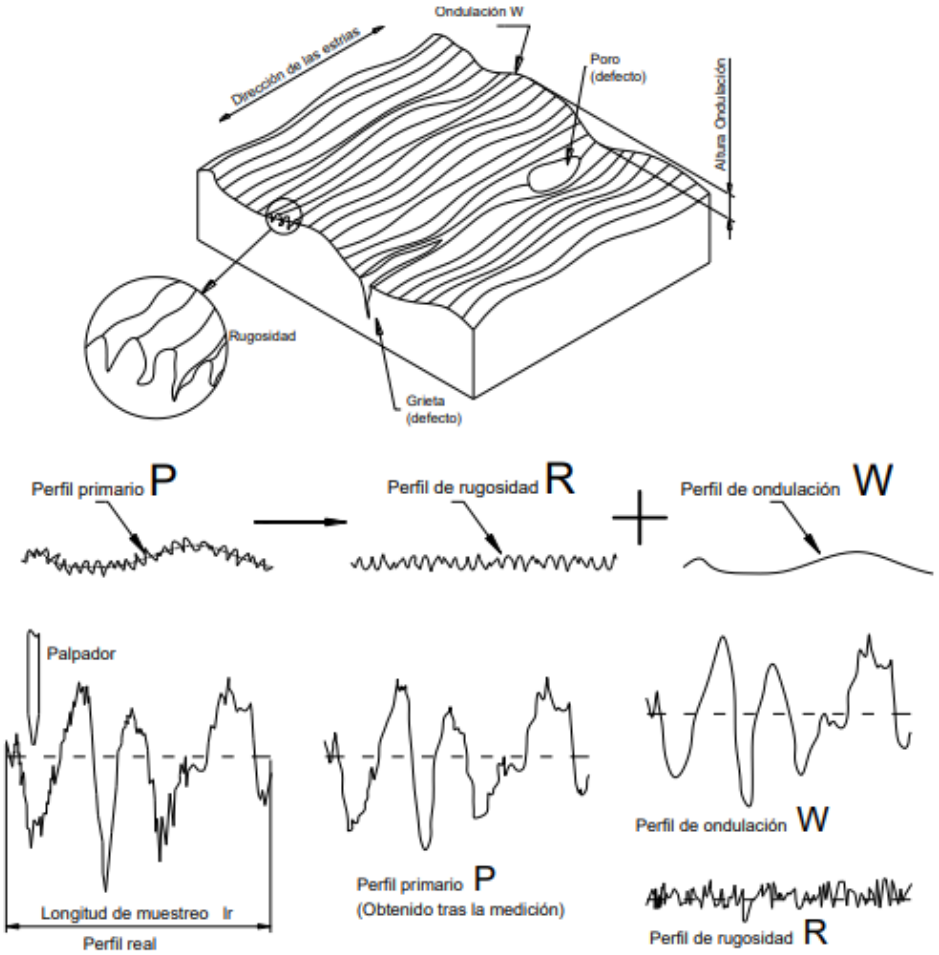


Figura 2.6. Características de la rugosidad superficial [26].

La distancia que permite distinguir la rugosidad de la ondulación se denomina longitud de corte o *cut-off*. Para una correcta evaluación, se analizan cinco longitudes de muestreo, añadiendo secciones de entrada y salida que permiten compensar posibles perturbaciones introducidas por el instrumento.

Existen diversas normativas que regulan la evaluación de rugosidad. Entre los parámetros más empleados para cuantificar la rugosidad destacan los siguientes [27]:

- **Ra (rugosidad media aritmética)**: valor promedio de las desviaciones absolutas respecto a la línea media, calculado sobre la curva R. Es el parámetro más utilizado por su simplicidad y carácter representativo (véase Figura 2.7).

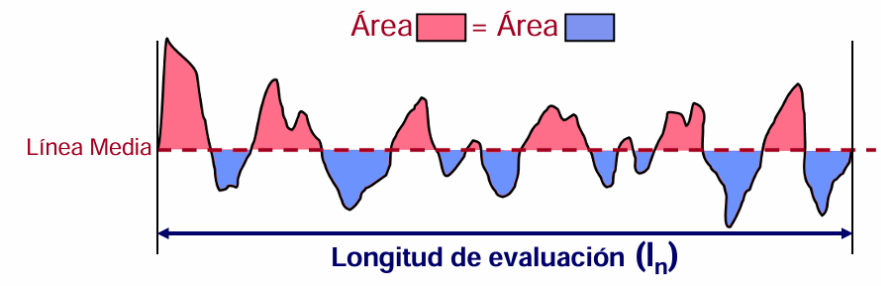


Figura 2.7. Rugosidad media aritmética (Ra).

- **Rz (altura media de rugosidad)**: media de los valores absolutos de las cinco crestas más altas y cinco valles más profundos respecto a una línea media, sobre la curva P (Figura 2.8).

$$Rz = Zp_{max} + Zv_{max}$$

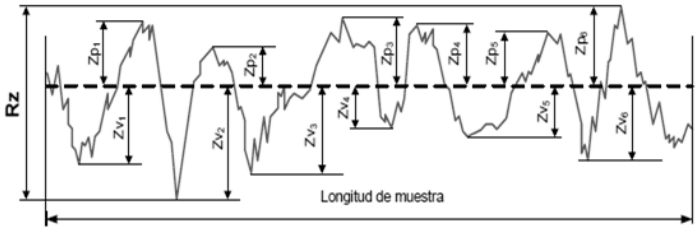


Figura 2.8. Altura media de la rugosidad (Rz).

- **Rp (altura máxima de cresta)**: distancia entre el punto más elevado del perfil y la línea media, en base a la curva P (Figura 2.9).

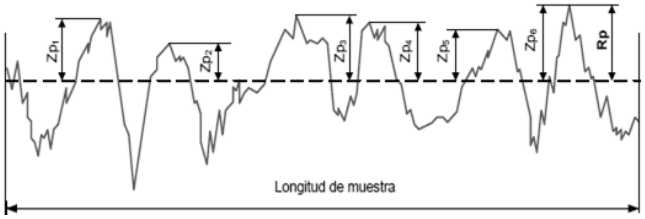


Figura 2.9. Altura máxima de la cresta (Rp).

- **Rv (altura máxima de valle)**: diferencia entre el punto más profundo y el más elevado del perfil, en la longitud de evaluación, basada en la curva P. Es sensible a defectos puntuales, como impactos o roturas (Figura 2.10).

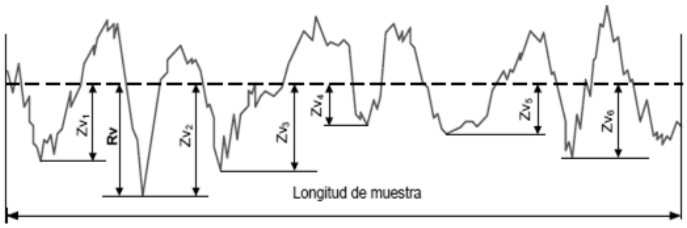


Figura 2.17

Figura 2.10. Altura máxima del perfil (Rv).

- **Rp (altura máxima de pico)**: Es una medida de la desviación positiva máxima de la superficie con respecto a un plano de referencia. Esta medida es esencial en muchas aplicaciones, donde la rugosidad de las superficies puede afectar la fricción y la resistencia al desgaste de los materiales. (Figura 2.11).

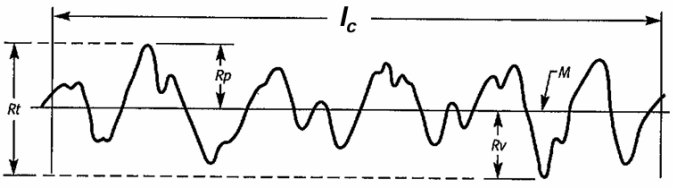


Figura 2.11. Altura máxima del perfil (Rv).

- **Rt o Rmax**: distancia total entre el pico más alto y el valle más profundo sobre la curva R filtrada.

2.1.3. Texturización

La evolución de la industria manufacturera, impulsada por la globalización y la necesidad de operar en entornos cada vez más exigentes, ha elevado las expectativas sobre el rendimiento de los componentes fabricados. Estos pueden requerir el soportar condiciones extremas de temperatura, presión, fricción y desgaste sin comprometer su fiabilidad, eficiencia o vida útil. En este contexto, las interfaces superficiales adquieren un papel determinante, ya que son las responsables de transmitir movimiento, carga y energía entre partes móviles o en contacto, u otras propiedades funcionales y estéticas [28].

Una de las estrategias más eficaces para optimizar las propiedades funcionales de dichas superficies es la aplicación de tecnologías de ingeniería de superficies [29,30]. Entre estas tecnologías, el texturizado de superficies ha ganado especial protagonismo por su capacidad de generar micro y nanoestructuras que modifican significativamente el comportamiento funcional del material [31].

A diferencia del acabado superficial, que se enfoca principalmente en establecer la rugosidad requerida mediante diferentes procesos, la texturización busca crear estructuras superficiales deliberadas, sobre relieve (positivas o sobre la superficie base) o bajo relieve (negativas o bajo la superficie base), con el fin de influir activamente en propiedades como la fricción, el desgaste, la retención de lubricantes, la adhesión o la respuesta hidrodinámica, entre otras [32].

Las superficies texturizadas presentan un comportamiento superior en comparación con las superficies sin textura cuando se someten a condiciones reales de servicio. Diversos estudios han demostrado que estructuras geométricas diseñadas intencionadamente, como los llamados “dimples” o hoyuelos, pueden reducir la fricción, minimizar el desgaste, aumentar la capacidad de carga hidrodinámica y mejorar la eficiencia general del sistema [33,34]. Este tipo de soluciones se han aplicado con éxito en sectores como la industria automotriz, para optimizar engranajes y cojinetes [35], y en la biomedicina, donde han mostrado resultados prometedores en la mejora de implantes médicos [36]. Un ejemplo de texturización funcional, se puede ver en la Figura 2.12, el cual consiste en la generación de patrones geométricos con formas, profundidades y distribuciones controladas [37].

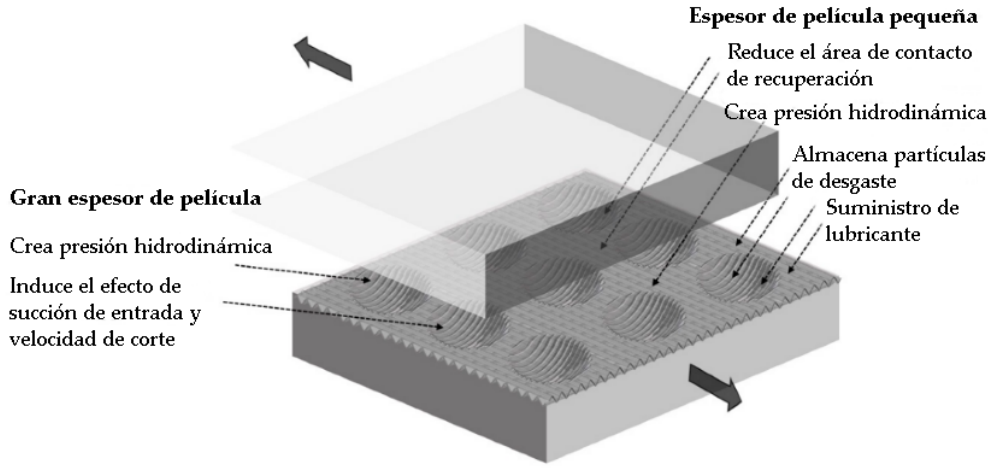


Figura 2.12. Ilustración esquemática de los posibles mecanismos responsables de la mejora del comportamiento tribológico de superficies texturizadas [39].

Estas estructuras pueden contribuir a incrementar la presión hidrodinámica, mejorando así la capacidad de carga del sistema (efecto microhidrodinámico), además de reducir la velocidad de deformación por cizallamiento. Los hoyuelos también actúan como depósitos de lubricante, facilitando su distribución sobre la interfaz y atrapando partículas de desgaste. De este modo, se reduce el área de contacto real y, en consecuencia, la fricción [38].

Otro ejemplo típico de la texturización superficial es que permite mejorar el comportamiento fluidodinámico, favoreciendo fenómenos como la superhidrofobicidad. Este tipo de comportamiento es especialmente valioso en aplicaciones donde se requiere la no formación de hielo, autolimpieza, resistencia a la suciedad ambiental o reducción del arrastre aerodinámico, como es el caso de componentes aeronáuticos o de automoción [40–42].

Si bien el objetivo principal de la texturización es funcional, no debe subestimarse su potencial estético. Las microestructuras generadas pueden conferir al componente un aspecto singular, con efectos visuales que aumentan su atractivo comercial. La textura superficial también contribuye a la percepción visual del producto, jugando un papel en el diseño industrial y en el valor añadido percibido por el usuario.

Desde su planteamiento inicial en la década de 1960, el texturizado de superficies ha sido objeto de una evolución constante. Su desarrollo ha estado respaldado por un creciente interés académico e industrial. Según Song et al., el número de investigaciones publicadas sobre esta técnica ha aumentado exponencialmente en las últimas décadas, alcanzando más de 120.000 trabajos registrados en el ámbito científico, Figura 2.13 [43].

Las aplicaciones de la texturización son hoy diversas: desde herramientas de corte, lentes y componentes ópticos, hasta dispositivos electrónicos avanzados e implantes biomédicos [44,45]. Sin embargo, aún persisten retos relevantes en cuanto al diseño optimizado de patrones y la fabricación de superficies texturizadas con precisión, lo que limita su implantación a gran escala en ciertas industrias.

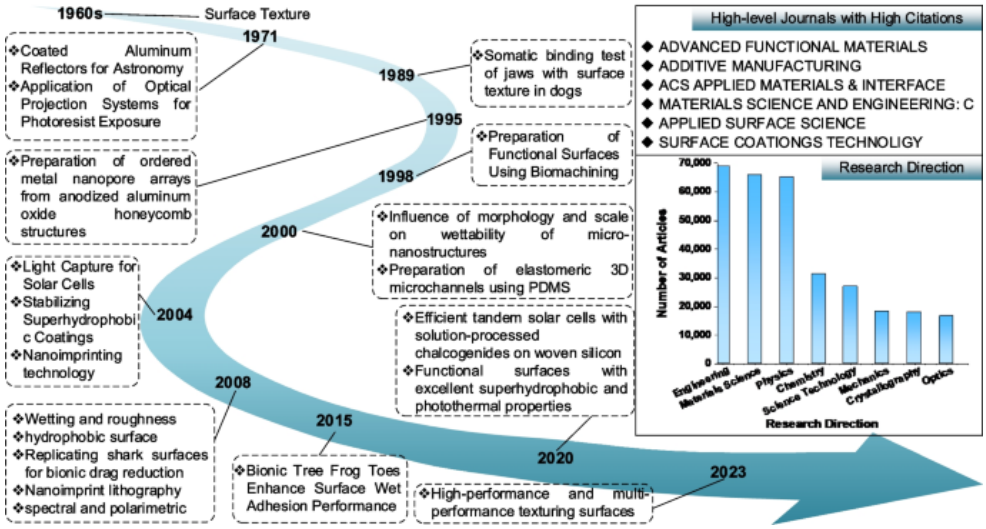


Figura 2.13. Desarrollo tecnológico del texturizado de superficies [43].

Por todo ello, en este capítulo se busca ofrecer una revisión exhaustiva sobre las principales tecnologías de fabricación, configuraciones geométricas y aplicaciones funcionales de las superficies texturizadas. Se pretende así identificar las tendencias tecnológicas emergentes y establecer una base sólida para futuros desarrollos en este campo de creciente impacto tecnológico.

2.1.4. Superficies bioinspiradas: fundamentos, estrategias y aplicaciones

En las últimas décadas, la ingeniería ha encontrado una fuente inagotable de inspiración en la naturaleza a través de un enfoque interdisciplinar conocido como biomimética o biomímesis. Esta disciplina se basa en el estudio de los sistemas biológicos para trasladar sus principios funcionales a la ingeniería, la ciencia de materiales y el diseño industrial, replicando estructuras que han evolucionado durante millones de años hacia una optimización funcional y energética [46].

Como señala Bharat Bhushan, la biomimética implica la comprensión profunda de las funciones, estructuras y mecanismos presentes en organismos naturales, con el objetivo de diseñar materiales y dispositivos avanzados mediante estrategias bioinspiradas como ilustra la Figura 2.21 [47]. Esta metodología de diseño basada en problemas sigue un enfoque sistemático que comienza con la identificación de un desafío técnico, continúa con el análisis de soluciones biológicas relevantes y finaliza con la fabricación de materiales artificiales mediante técnicas físicas, químicas o híbridas [21, 22].

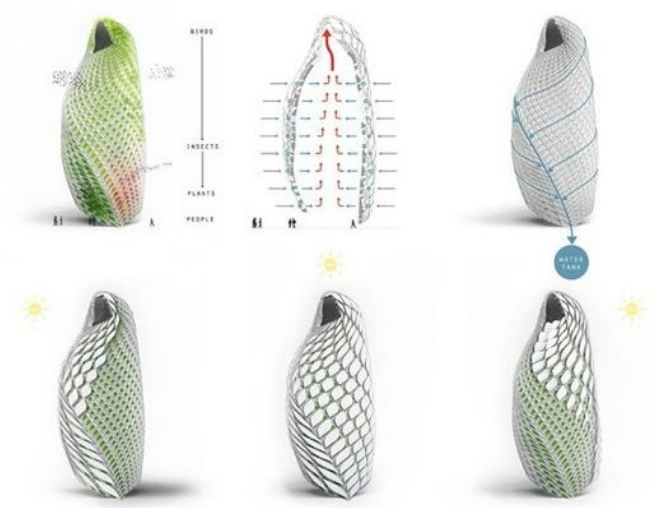


Figura 2.14. Biomímesis de un capullo. Obtenido de [47].

Una de las áreas de aplicación más prometedoras es en la ingeniería de superficies, donde se busca replicar estructuras jerárquicas presentes en organismos vivos para modificar propiedades como la fricción, la adherencia, la reflexión óptica o la hidrofobicidad. Estas propiedades son consecuencia directa de la interacción entre la estructura superficial, su morfología, y las propiedades físico-químicas del material base [22].

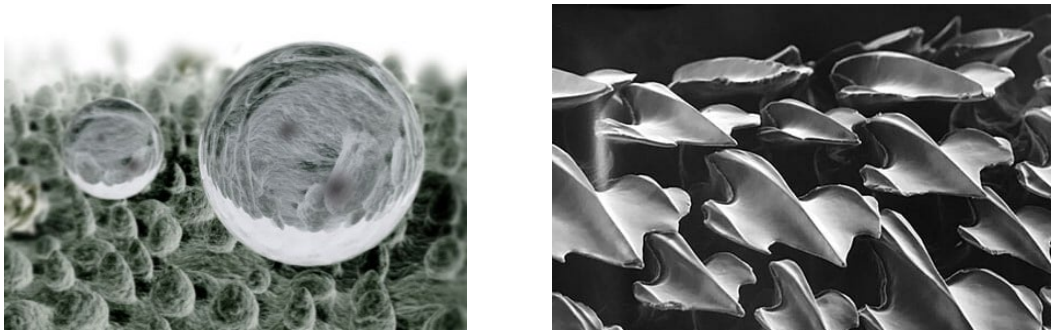
Un aspecto esencial en este enfoque es la escala, ya que las unidades funcionales observadas en los sistemas naturales suelen encontrarse entre 1 y 100 µm. La expansión del interés por la micro y nanofabricación ha facilitado la implementación de diseños bioinspirados que reproducen estas características morfológicas, permitiendo así la creación de materiales inteligentes con propiedades avanzadas a nivel funcional [48].

2.1.4.1. Ejemplos de superficies bioinspiradas y sus aplicaciones

Numerosos organismos han desarrollado soluciones extraordinariamente especializadas para adaptarse a condiciones ambientales extremas. Estas soluciones, basadas en la estructuración jerárquica de la superficie, han sido replicadas con éxito en diversas aplicaciones tecnológicas.

Un ejemplo emblemático es la hoja de loto, cuya superficie muestra una arquitectura dual: a nivel micrométrico presenta una textura rugosa con papilas epidérmicas, mientras que cada papila se encuentra recubierta por estructuras submicrométricas formadas por ceras epicuticulares tridimensionales. Estas ceras pueden adoptar forma de túbulos o plaquetas según la especie vegetal. Esta combinación multiescala confiere a la hoja propiedades superhidrofóbicas y de autolimpieza, fenómeno conocido como "efecto loto". Este principio ha sido transferido al desarrollo de recubrimientos hidrofóbicos para fachadas, ventanas y textiles funcionales [46]. Otro caso notable es el del escarabajo del desierto, cuyo exoesqueleto presenta una alternancia de zonas hidrofílicas e hidrofóbicas que le permiten condensar y recolectar agua en ambientes extremadamente áridos. Este principio ha sido replicado en tecnologías de captación de niebla para abastecer de agua potable regiones con escasez hídrica [49].

La piel del tiburón (Figura 2.15) es otro referente clásico en biomimética. Sus escamas dermales poseen crestas alineadas longitudinalmente (dentículos), cuya morfología reduce la resistencia al arrastre en medios fluidos. Aunque en un principio se estimó que esta configuración permitía una reducción muy significativa de la resistencia hidráulica, estudios más recientes han demostrado que esta disminución se sitúa en torno al 7% [50].

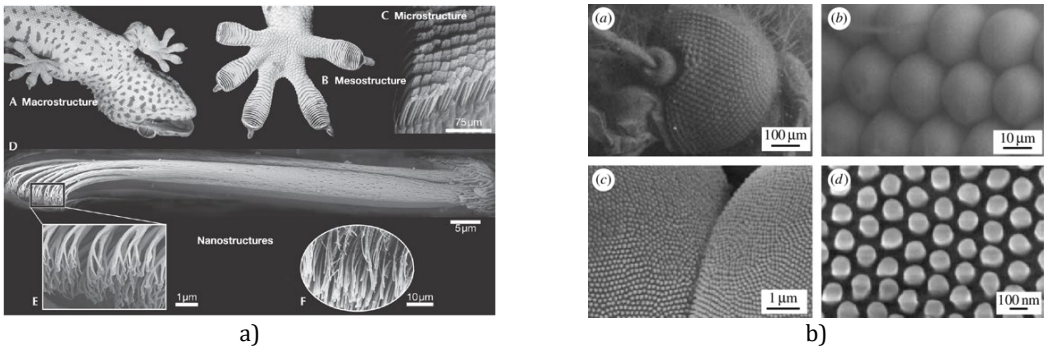


a) b)

Figura 2.15. Texturizados hidrofóbicos: a) hojas de loto; b) piel de tiburón. Obtenido de [51].

La pata del gecko (véase Figura 2.16) representa otra maravilla estructural, dotada de millones de microsetas que se ramifican en nanoestructuras capaces de generar adhesión reversible mediante fuerzas de Van der Waals. Este diseño ha inspirado el desarrollo de adhesivos secos reutilizables y sistemas de locomoción para robots escaladores.

Por su parte, el ojo del mosquito, compuesto por una matriz hexagonal de estructuras antirreflectantes a escala nanométrica, ha sido emulado en el desarrollo de recubrimientos ópticos para lentes, sensores y paneles solares. Igualmente, la tela de araña, con sus gradientes funcionales de humectabilidad y alta resistencia mecánica, ha servido como base para diseñar fibras sintéticas avanzadas [46].



a) b)

Figura 2.16. Texturizados funcionales: a) pie de Gecko; b) ojo de mosquito. Obtenido de [52].

Estas y otras superficies bioinspiradas han dado lugar a aplicaciones prácticas como [48]:

- Recubrimientos autolimpiantes de bajo mantenimiento.
- Sistemas de captación de agua en zonas áridas.
- Superficies antihielo para aviación.
- Implantes biomédicos con integración celular mejorada.
- Dispositivos ópticos con propiedades antirreflejantes.

2.1.4.2. Estrategias de diseño biomimético

Las estrategias de diseño inspiradas en la naturaleza pueden clasificarse en tres grandes categorías: mimetismo estructural, mimetismo procesal y mimetismo funcional [53–55]. Estas estrategias permiten desarrollar materiales y superficies con propiedades avanzadas, como resistencia mecánica, autolimpieza, adhesión selectiva o capacidad de respuesta adaptativa.

Uno de los enfoques más prometedores es el diseño jerárquico funcional, que busca replicar la organización multiescala presente en los sistemas naturales, desde la nano hasta la macroescala. Este enfoque ha permitido el desarrollo de fibras ultrarresistentes, recubrimientos multifuncionales y sensores bioinspirados. Por otro lado, las estrategias basadas en respuesta adaptativa exploran la fabricación de superficies inteligentes capaces de responder a cambios externos, como en el caso de sensores ópticos inspirados en las alas de mariposa.

Sin embargo, la implementación industrial de soluciones biomiméticas presenta diversos desafíos:

- La precisión en la replicación de estructuras jerárquicas naturales sigue siendo limitada por las tecnologías actuales.
- Los costes de desarrollo y los requerimientos de I+D pueden dificultar su adopción a gran escala.
- La naturaleza interdisciplinaria de la biomimética exige colaboración efectiva entre ingenieros, biólogos, químicos y diseñadores [49].

Pese a ello, el diseño bioinspirado ofrece oportunidades extraordinarias para el desarrollo sostenible, al permitir la creación de materiales altamente funcionales con mínimo impacto ambiental. Su potencial se extiende a campos como la energía, la medicina, la movilidad, la microelectrónica y la gestión de recursos hídricos, entre otros [21,22,58].

En resumen, la biomimética representa un puente entre la naturaleza y la tecnología, aportando soluciones robustas, eficientes y sostenibles que responden a los retos contemporáneos de la ingeniería de superficies [49].

2.1.5. Caracterización superficial: estructura y métodos de evaluación

La caracterización de superficies constituye una disciplina esencial en el estudio de materiales, ya que permite comprender y cuantificar los aspectos que condicionan el comportamiento funcional de los componentes en servicio. En el caso de las superficies técnicas, esta caracterización debe abordarse desde una doble perspectiva: por un lado, el análisis estructural de sus distintas capas y elementos constituyentes, y por otro, la aplicación de métodos metrológicos que permitan evaluar con precisión su morfología y propiedades asociadas.

2.1.5.1. Fundamentos estructurales de una superficie técnica

A nivel microscópico, las superficies están lejos de ser lisas o ideales. Una sección transversal aumentada de una pieza (Figura 2.17) revela una compleja jerarquía de elementos que incluyen el sustrato, la textura superficial, la capa alterada y los contaminantes superficiales [22].

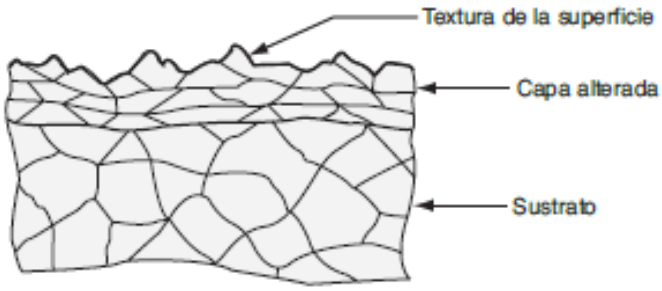


Figura 2.17. Sección transversal magnificada de una superficie [22].

El sustrato conforma el cuerpo principal del componente y presenta una estructura granular que depende del tipo de material y de los tratamientos térmicos o mecánicos aplicados previamente. Sobre él se encuentra la superficie funcional, cuya topografía presenta rugosidad, ondulación y defectos locales derivados del proceso de manufactura (mecanizado, conformado, pulido, etc.). Estas irregularidades siguen habitualmente un patrón direccional y se agrupan bajo el concepto de acabado superficial.

Por debajo de esta capa visible se desarrolla la denominada capa alterada, generada por la energía térmica, mecánica o eléctrica aplicada durante el proceso de fabricación. En materiales metálicos, esta región puede mostrar alteraciones microestructurales como endurecimiento localizado, recristalización o incluso transformaciones de fase. La integridad de esta capa es determinante en el rendimiento final del componente.

Además de estas estructuras físicas, las superficies suelen estar expuestas a agentes externos como humedad, aceites, gases residuales o contaminantes sólidos. En ambientes atmosféricos, es común la aparición espontánea de capas de óxido, especialmente en materiales metálicos [23]. La presencia y caracterización de estos compuestos es esencial, ya que afectan significativamente ~~a~~ sus propiedades.

2.1.5.2. Técnicas de caracterización metrológica

Una vez comprendida la estructura jerárquica de las superficies, resulta imprescindible cuantificar sus características mediante instrumentos de medición y técnicas normalizadas. La metrología, definida como el proceso mediante el cual se compara una magnitud desconocida con un patrón de referencia aceptado, utilizando unidades normalizadas, busca en el ámbito microgeométrico determinar parámetros como la rugosidad, la orientación del patrón, la pendiente o la forma de los elementos topográficos. Este procedimiento permite cuantificar, dentro de unos márgenes determinados de precisión y exactitud, elementos clave en la validación del producto final [56].

Los métodos de medición pueden clasificarse en dos grandes grupos: técnicas de contacto (2D) y técnicas sin contacto (3D). Las primeras, entre las que destacan los rugosímetros, implican el desplazamiento de un palpador sobre la superficie para generar un perfil topográfico lineal. Aunque son ampliamente utilizados, presentan limitaciones en la velocidad de medición y en superficies blandas o delicadas [57].

Las técnicas ópticas sin contacto han adquirido gran relevancia en los últimos años gracias al desarrollo de sistemas como la interferometría de luz blanca, la microscopía confocal de barrido láser, la microscopía electrónica, la microscopía de fuerza atómica o la fotogrametría [58–61]. Estas permiten obtener mapas 3D de la superficie con alta resolución sin alterar el estado original del componente. La Figura 2.18 presenta una clasificación de los instrumentos más habituales.

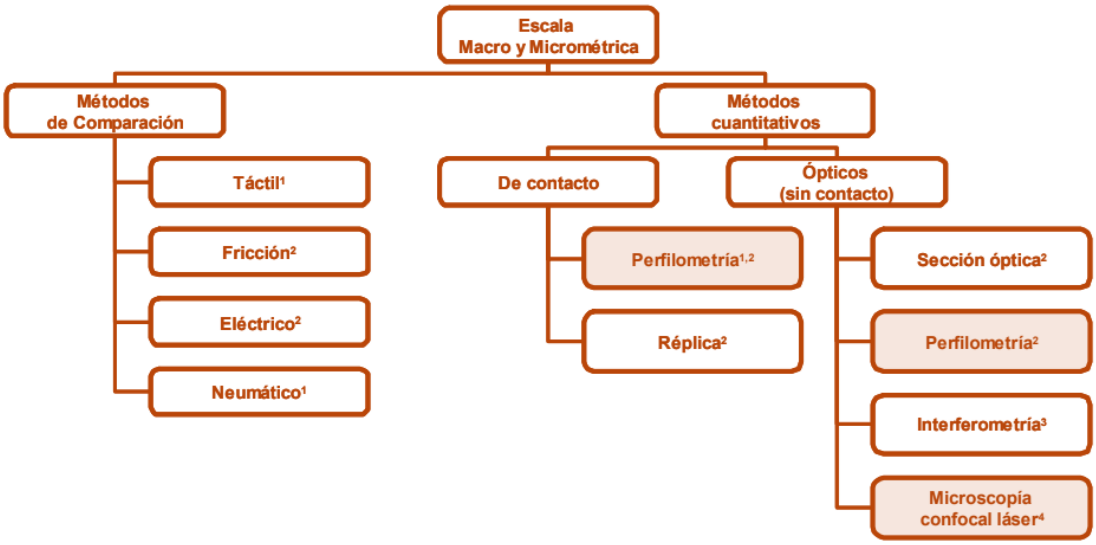


Figura 2.18. Diferentes métodos de evaluación del acabado superficial [62].

El avance de estas tecnologías ha motivado a organismos de normalización como la ISO y la ASTM a revisar y actualizar los marcos normativos. Así, a las clásicas ISO 4287 (1997) en 2D se suma la norma ISO 25178-6 (2010) para caracterización tridimensional [24,25]. Estas normas introducen nuevos parámetros de área:

- **Parámetros híbridos**: combinan dimensiones verticales y espaciales para describir la inclinación y la pendiente de la superficie.
- **Parámetros espaciales**: cuantifican la repetitividad y la orientación de los elementos topográficos en diferentes direcciones.
- **Parámetros de estructura**: describen estructuras con aplicaciones específicas, como ranuras para canalización de lubricante o superficies optimizadas para la adhesión.

2.1.5.3. Evaluación de la integridad superficial

La caracterización superficial no se limita a la geometría visible. La integridad superficial es igualmente crucial, ya que abarca modificaciones en las capas subsuperficiales que pueden afectar la resistencia mecánica, la dureza, la fatiga o el comportamiento tribológico. Muchas de estas evaluaciones requieren técnicas semidestructivas o destructivas [22]. Entre los métodos más habituales para caracterizar la integridad superficial se encuentran:

- **Evaluación de la textura**: mediante parámetros de rugosidad y perfiles se obtiene información inicial sobre la capa superficial y su estado mecánico.
- **Inspección visual**: permite detectar defectos como grietas, pliegues, cráteres o discontinuidades, que pueden evidenciar problemas de fabricación. Puede mejorarse mediante iluminación fluorescente o técnicas fotográficas de alto contraste.

- **Análisis microestructural**: basado en cortes transversales preparados metalográficamente, que permiten comparar la microestructura superficial con la del sustrato mediante fotomicrografías.
- **Perfil de microdureza**: utilizando ensayos de indentación (Knoop, Vickers), se determina la variación de dureza en función de la profundidad bajo la superficie, generando un perfil representativo del tratamiento recibido.
- **Medición de esfuerzos residuales**: técnicas como la difracción de rayos X permiten identificar tensiones internas remanentes en las capas externas, las cuales pueden comprometer el comportamiento en servicio del componente.

La caracterización precisa y completa de una superficie, tanto en su dimensión geométrica como en su integridad material, constituye una herramienta indispensable para garantizar la funcionalidad, la calidad y la reproducibilidad en los procesos de fabricación avanzada.

2.2. Procesos de modificación superficial

Las superficies de ingeniería son diseñadas intencionadamente para modificar las propiedades funcionales de los materiales mediante la alteración controlada de sus capas superficiales y subsuperficiales. Desde las primeras clasificaciones realizadas a mediados del siglo XX, se ha reconocido que estas modificaciones son clave para mejorar el rendimiento funcional de componentes sometidos a condiciones exigentes [9,20,63,64].

Los primeros estudios, a inicios del siglo XX, se centraron en mejorar la resistencia al desgaste mediante el control de la rugosidad superficial. Durante la década de 1940, se emplearon tecnologías de pulido para introducir franjas en las superficies de recubrimiento de cilindros con el fin de optimizar la fricción, aunque sus beneficios no fueron documentados de manera formal [64,65]. Más adelante, se desarrollaron técnicas como el vibrorolling en 1984 [66], texturizado de la superficie por abrasión y grabado químico en la década de 1980 y posteriormente la ablación láser en los 90 [67–70]. Estas tecnologías permitieron la incorporación de macro y microtexturas, aunque inicialmente presentaban limitaciones en términos de precisión y reproducibilidad.

En la actualidad, las tecnologías modernas permiten la fabricación de texturas con una alta precisión y repetibilidad, abarcando escalas que van desde el milímetro hasta el nanómetro [64]. Esto ha abierto la puerta al diseño de superficies funcionales personalizadas con propiedades controladas [71,72].

Entre los métodos más empleados se encuentran el texturizado láser, el chorro de iones y el grabado químico selectivo. Sin embargo, debido al alto coste del equipamiento, su aplicación suele limitarse a componentes de alto valor añadido. Investigaciones recientes han explorado técnicas de texturizado por mecanizado convencional, como el texturizado vibro-mecánico [73,74] y el fresado en cinco ejes con herramientas esféricas [75–77], logrando resultados prometedores al ajustar adecuadamente los parámetros de proceso.

Este apartado realiza una revisión de las tecnologías más relevantes en la generación de texturas superficiales, clasificándolas en función del principio físico-químico aplicado.

2.2.1. Procesos y tecnologías de microfabricación

Los métodos empleados en la generación de texturas superficiales se agrupan en dos grandes enfoques: *top-down y bottom-up* [78,79]. Esta clasificación se basa en la estrategia utilizada para construir o modificar la superficie:

- **Top-down**: implica partir de un bloque de material para reducirlo y definir la textura deseada mediante procesos de eliminación, deformación o adición. La precisión del resultado depende en gran medida de la máquina, herramienta o enmascarado utilizado.

- **Bottom-up**: se fundamenta en la construcción de estructuras desde la escala molecular, utilizando principios de autoorganización. Estos métodos suelen ofrecer mayor precisión en la colocación de elementos funcionales y una integración más eficiente de estructuras jerárquicas.

A su vez, los procesos de microfabricación pueden clasificarse según su principio físico en cuatro grandes grupos: eliminación, deformación, autoformación y adición de material [78,79]. A continuación, se describen estas categorías con los principales métodos asociados.

- **Procesos de eliminación de material**

Los procesos de eliminación de material consisten en la eliminación controlada de parte de la superficie de un sustrato, ya sea mediante mecanismos físicos, químicos o mecánicos, con el objetivo de generar texturas funcionales. Esta familia de métodos destaca por su versatilidad y su compatibilidad con una amplia gama de materiales, tanto metálicos como no metálicos [78,79].

Dependiendo del principio operativo, estos procesos pueden clasificarse en tres subgrupos principales:

1. **Procesos térmicos de alta energía**: incluyen tecnologías como el láser, la descarga eléctrica (EDM), el haz de electrones y el haz de iones. Estos métodos permiten una ablación localizada y precisa, posibilitando la creación de microtexturas definidas incluso sobre superficies tridimensionales complejas. Aunque la interacción térmica con el sustrato puede inducir efectos secundarios como zonas afectadas por el calor, microgrietas o recocido superficial, su alta precisión geométrica los convierte en herramientas fundamentales en la microfabricación de superficies [105].

2. **Procesos químicos**: como el grabado químico o el grabado electroquímico, los cuales permiten modificar la superficie mediante reacciones controladas con agentes químicos. Aunque presentan desafíos en cuanto a la uniformidad de ataque y al control preciso de la profundidad, son ampliamente utilizados por su capacidad de generar patrones complejos y su adecuación a superficies tanto planas como curvas. Las técnicas de grabado siguen siendo una referencia en aplicaciones que requieren geometrías continuas o discontinuas a microescala.

3. **Procesos mecánicos**: en esta categoría se incluyen técnicas como el rectificado, el fresado abrasivo, el pulido, el mecanizado ultrasónico o el granallado. Estas tecnologías permiten eliminar material mediante acción directa sobre el sustrato, sin implicar calor excesivo. En consecuencia, ofrecen ventajas significativas frente a los métodos térmicos, ya que minimizan los daños térmicos en los materiales procesados, esto se debe al uso abundante de refrigeración para absorber la disipación de energía térmica [80,81].

En la Tabla 2.1 se recoge una clasificación detallada de los procesos de eliminación de material aplicables a la generación de texturas funcionales. Entre todos ellos, conviene destacar el texturizado

por descarga eléctrica (EDM), el cual será objeto de estudio específico en esta tesis. Esta tecnología destaca por su capacidad para generar microestructuras complejas con elevada precisión y repetibilidad, especialmente sobre materiales conductores, lo que la convierte en una herramienta estratégica para aplicaciones en ingeniería de superficies avanzadas.

Tabla 2.1. Procesos de fabricación por eliminación de material [78].

Fuente energética	Proceso	
Grabado químico	Enmascaramiento	Texturización química
		Texturización electroquímica
	Otros métodos	Auto ensamblaje
		Grabado antimáscara asistido por láser
		Texturización electroquímica sin máscara
		Grabado anisotrópico
Alta temperatura	Métodos láser	Texturización por haz láser
		Rectificado láser
		Láser CNC dirigido
		Láser de femtosegundos
	Descarga eléctrica	Texturización por descarga eléctrica
		Micromecanizado por descarga eléctrica
	Texturización por has de electrones	
	Texturización por haz de iones	
Mecánico	Mecanizado CNC por ultrasonidos	
	Rectificado mecánico	
	Microfresado	
	Mecanizado abrasivo libre	
	Microcorte	
	Chorro de agua	

- **Procesos de deformación de material**

Estos procesos emplean la deformación plástica para modificar la topografía superficial. Son particularmente útiles en materiales dúctiles como ciertos metales y polímeros. La Tabla 2.2 muestra los diferentes procesos englobados.

Tabla 2.2. Procesos de fabricación por deformación de material [78].

Fuente energética	Proceso	Aplicación
Mecánico	Estampado	Estampadora de patrones
		Herramientas
		Vibro rodillo
Químico	Migración molecular	
	Contracción UV	

- **Procesos de autoformación de material**

Estos procesos se basan en mecanismos naturales de desgaste o transformación inducida por condiciones térmicas o químicas, lo cual genera texturas funcionales. Los procesos se pueden observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Procesos de fabricación por autoformación de material [78].

Fuente energética	Proceso
Difusión localizada	Conversión química + tratamiento termoquímico
	Estampado + calor
Combinación de fases duras y blandas	Implantación térmica de fases duras
	Incrustación de fases blandas

- **Procesos de adición de material**

Las características del patrón se generan a través de la adición de material a la superficie deseada, creando pequeñas áreas de relieve. En particular, el electroconformado y la fabricación aditiva se destacan como procesos de gran interés en esta investigación, ya que permite fabricar electrodos con texturas específicas que optimizan la eficiencia del proceso de electroerosión (ver Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Procesos de fabricación por adición de material [78].

Fuente energética	Proceso		
Procesos químicos	Conversión química	Cromado	
		Fosfatado con estampado	
	Deposición química	Deposición química	
		Enchapado auto catalítico	
		Revestimiento electrolítico	Anodizado
			Electrodeposición
	Revestimiento por precipitación		
Deposición física	Impresión por inyección de tinta para patrones resistentes al desgaste		
	Moldeado por curado		
	Haz de iones focalizado para patrones resistentes al desgaste		
	Deposición física de vapor		
	Moldeado por revestimiento orgánico (pintado)		
	Deposición de micro y nano partículas		
	Auto ensamblaje en películas policristalinas		
	Fabricación aditiva		

Aunque la mayoría de las técnicas revisadas son viables para el desarrollo de prototipos y la producción en serie, su elección depende de múltiples factores: tipo de material, precisión requerida, complejidad geométrica, forma de la pieza, velocidad de producción, coste, sostenibilidad ambiental, etc. [64].

2.3. Procesos relevantes en el desarrollo de texturizados en esta Tesis

En el marco de esta investigación, se han seleccionado tres tecnologías específicas de modificación superficial para la generación de texturas funcionales: la fabricación aditiva, el electroconformado, el mecanizado por descarga eléctrica. Estas técnicas permiten alcanzar estructuras de alta precisión y complejidad y es por ello que en esta investigación se orientarán al desarrollo de superficies microgeométricas.

2.3.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA), coloquialmente conocida como impresión 3D en contextos no especializados, constituye un conjunto de tecnologías que permiten la producción de objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de material capa por capa. Esta metodología fue formalmente introducida en 1986, con la concesión de la primera patente de estereolitografía (SLA) a Charles W. Hull, marcando un hito en el desarrollo de técnicas de creación rápida de prototipos [82]. El proceso se describió por primera vez como Fabricación y creación rápida de prototipos e implica la utilización de modelos 3D basados en computadora para depositar capas de material sucesivas, una encima de la otra, para crear un objeto 3D con forma casi neta [83].

Con la expiración progresiva de patentes clave, como las de las tecnologías pioneras de estereolitografía y el modelado por deposición fundida (FDM), el sector ha experimentado una notable democratización tecnológica. Esta apertura ha propiciado el surgimiento de nuevos actores industriales y comerciales, especialmente orientados a dispositivos de sobremesa accesibles y optimizados para polímeros, ampliando así el espectro de usuarios y aplicaciones [84,85].

Las ventajas intrínsecas de la FA, entre las que destacan la reducción de costes y tiempos de desarrollo, la posibilidad de producir geometrías altamente complejas sin utillaje específico, y la flexibilidad en la personalización de piezas, han favorecido un crecimiento sostenido del sector [83,86]. Su importancia y crecimiento se puede observar en la Figura 2.19.

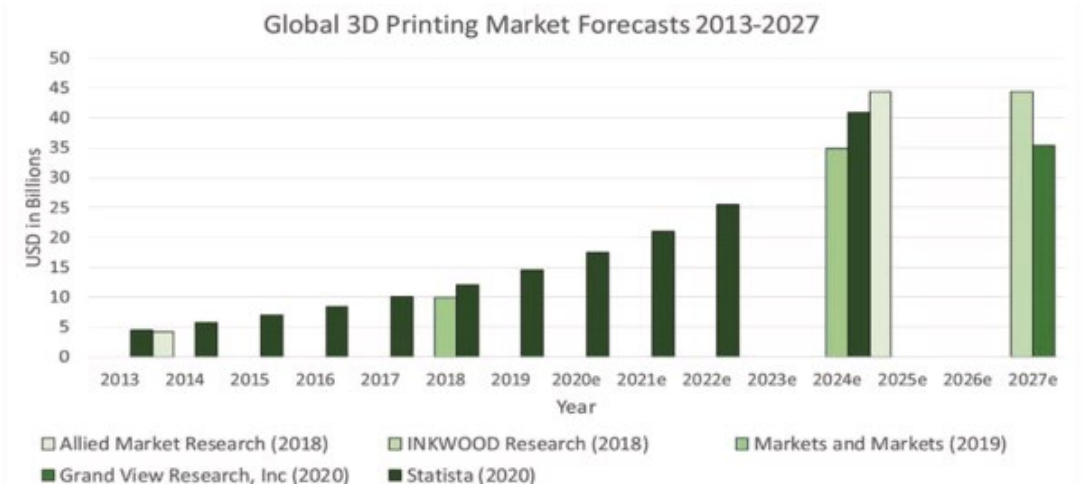


Figura 2.19. Cuota de mercado estimada de la FA global [82].

Aunque tradicionalmente la impresión 3D se ha vinculado principalmente al procesado de polímeros, las proyecciones de mercado revelan un auge en tecnologías orientadas a la impresión de materiales cerámicos y compuestos, con un crecimiento superior al de la fabricación metálica, hasta ahora considerada la más disruptiva [7], [11], [13].

Este cambio de paradigma ha ampliado notablemente los horizontes de la FA, trasladando su aplicación más allá del prototipado inicial hacia ámbitos de producción directa en sectores estratégicos como la medicina personalizada, la industria aeroespacial, la automoción y la fabricación especializada de otros sectores [82]. En este contexto, resulta imprescindible comprender los fundamentos técnicos de la fabricación aditiva, sus distintas tecnologías, así como los materiales empleados, a fin de contextualizar adecuadamente su uso en desarrollos como el abordado en esta investigación [87].

2.3.1.1. Definición de fabricación aditiva

En sus primeras etapas de desarrollo, las tecnologías de fabricación aditiva fueron comúnmente englobadas bajo el término *Rapid Prototyping* (RP), el cual aludía a procesos orientados a la generación rápida de modelos o representaciones físicas de productos, generalmente con fines de evaluación previa al lanzamiento comercial. Este enfoque inicial ponía el énfasis en la velocidad de producción y en la utilidad del resultado como un prototipo base desde el cual se derivarían versiones mejoradas o definitivas del producto. El término fue adoptado no solo en entornos de desarrollo industrial, sino también por consultores de gestión y desarrolladores de software, para describir metodologías de diseño iterativo en las que se podía probar, corregir y ajustar una solución de manera incremental a partir de retroalimentación constante del usuario [88].

Sin embargo, con la evolución de estas tecnologías, pronto se evidenció que el concepto de prototipado rápido resultaba limitado y no representaba adecuadamente el espectro más amplio de aplicaciones que comenzaban a consolidarse en sectores industriales. En particular, dicho término obviaba el principio fundamental común a todas estas técnicas: la fabricación de objetos tridimensionales mediante la adición progresiva de material. En consecuencia, y con el objetivo de una mejor estandarización terminológica, un comité técnico conjunto ISO y ASTM International propuso la adopción formal del término fabricación aditiva para designar este conjunto de tecnologías.

Bajo esta nueva denominación, se establece que la fabricación aditiva se basa en la utilización de modelos tridimensionales generados mediante sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD 3D), los cuales pueden ser transformados en objetos físicos sin requerir una planificación compleja del proceso ni la fabricación previa de utillajes [89]. Si bien esta afirmación simplifica en parte la realidad técnica, lo cierto es que la FA permite una reducción sustancial en la complejidad asociada a la fabricación de geometrías tridimensionales complejas, al prescindir de muchas de las restricciones propias de los métodos convencionales. Mientras que los procesos sustractivos tradicionales implican una evaluación minuciosa de la geometría de la pieza, la selección de herramientas específicas y la implementación de estrategias de mecanizado secuencial, en la fabricación aditiva basta con disponer de los parámetros dimensionales esenciales, conocer las características de la tecnología y del material a emplear, y ejecutar el proceso mediante el equipo correspondiente.

En términos operativos, la fabricación aditiva consiste en la creación de componentes físicos mediante la deposición controlada de material capa por capa, ya sea sobre un sustrato o de forma autoportante. El punto de partida es un diseño tridimensional en CAD, el cual se convierte en una serie de capas 2D almacenadas en archivos con formato STL, que definen la geometría de cada sección a fabricar [90].

En términos generales y en comparación con las tecnologías convencionales de mecanizado, la FA presenta importantes ventajas: una mayor eficiencia en el uso del material, una relación de desperdicio significativamente menor, menores costes de procesamiento y acabado, reducción del tiempo de fabricación, y en algunos casos, una mejora directa de las propiedades mecánicas del producto final [90]. Además, la elevada precisión alcanzada en ciertos procesos permite reproducir geometrías complejas e intrincadas sin necesidad de procesos de post-acabado, lo que refuerza su atractivo en ámbitos donde la fidelidad geométrica y el nivel de detalle son críticos [91].

2.3.1.2. Clasificación procesos de FA

El desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación, junto con los avances en la ciencia de los materiales, ha ampliado significativamente el campo de aplicación de la denominada creación rápida de prototipos, extendiéndola más allá de la generación de modelos conceptuales hacia la producción

directa de componentes finales con geometrías complejas. Para abordar esta diversidad, las tecnologías de fabricación aditiva pueden clasificarse atendiendo al estado físico de la materia prima utilizada: base líquida, base sólida (en láminas) y base en polvo, como se ilustra en la Figura 2.20 [92].

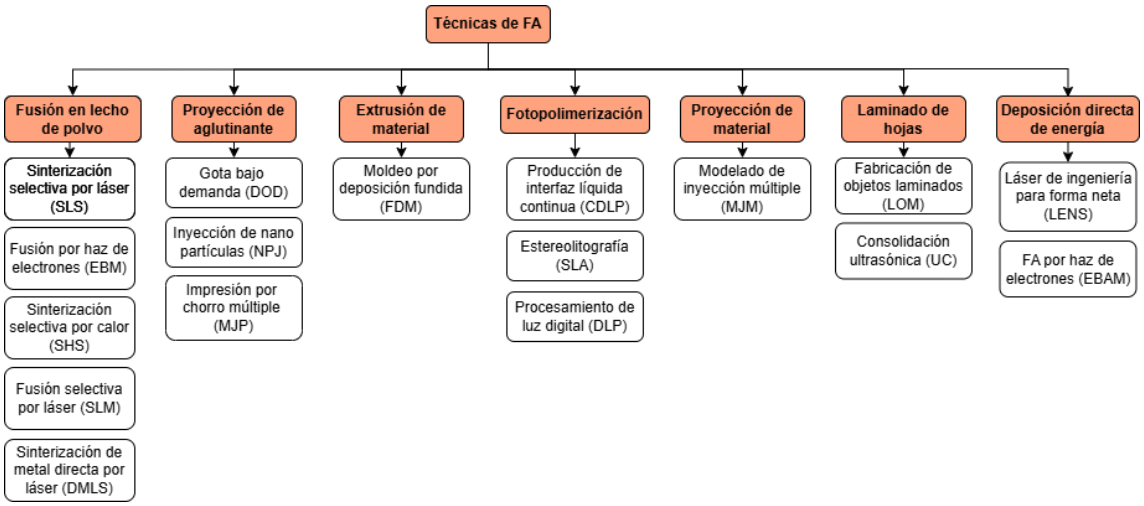


Figura 2.20. Clasificación de las tecnologías de FA. Modificado de [93].

Estas técnicas han sido diseñadas para responder a los crecientes requisitos industriales, tales como la fabricación de estructuras complejas con alta resolución, la optimización del uso de materiales, la mejora de las propiedades mecánicas y la reducción de defectos durante el proceso de impresión. Actualmente, existen diversas tecnologías consolidadas, cada una con características, materiales compatibles y aplicaciones específicas [85].

Una de las técnicas más difundidas, especialmente en entornos de bajo coste, es el modelado por deposición fundida (FDM), que utiliza filamentos termoplásticos para construir piezas mediante extrusión capa a capa. En paralelo, tecnologías basadas en polvo como la sinterización selectiva por láser (SLS), la fusión selectiva por láser (SLM), y la inyección de aglutinante (Binder Jetting o 3DP) permiten trabajar con una amplia gama de materiales, incluidos polímeros, metales y cerámicas.

Asimismo, las técnicas basadas en fotopolimerización, como la estereolitografía (SLA), el procesamiento digital de luz (DLP) y la estereolitografía por máscara (MSLA), emplean resinas fotosensibles que se solidifican mediante luz UV capa por capa, permitiendo alcanzar resoluciones extremadamente altas.

En paralelo, otras metodologías como la inyección de material (Material Jetting), la fabricación de objetos laminados (LOM) y la deposición directa de energía (DED) se utilizan en aplicaciones específicas donde se requiere la combinación de precisión, volumen de fabricación o propiedades funcionales avanzadas [94].

Cada tecnología presenta ventajas y limitaciones que deben evaluarse en función de factores como el tipo de material de partida, la resolución y velocidad deseada, el coste del proceso y las propiedades requeridas en el producto final. La Tabla 2.5 sintetiza las técnicas más consolidadas empleadas en la fabricación aditiva de polímeros, con sus características operativas más relevantes [95].

Cada una de estas tecnologías ha permitido el desarrollo de aplicaciones adaptadas a necesidades industriales, médicas y científicas específicas. La correcta elección de la técnica de fabricación aditiva depende de múltiples variables: desde la naturaleza del material hasta las tolerancias requeridas o las condiciones de trabajo del componente.

Tabla 2.5. Resumen de las técnicas de creación rápida de prototipos establecidas [95].

Técnica	Estado de las materias primas	Materiales poliméricos típicos	Principio de funcionamiento	Resolución (en Z, µm)	Ventajas	Desventajas
FDM	Filamento	Termoplásticos, como PC, ABS, PLA y nailon	Extrusión y deposición	50-200	Bajo costo, buena resistencia, capacidad para múltiples materiales.	Anisotropía, obstrucción de la boquilla
SLA	Fotopolímero líquido	Resina fotocurable (epoxi o resina a base de acrilato)	Escaneo láser y curado inducido por UV	10	Alta resolución de impresión	Limitación de material, citotoxicidad, alto costo
SLS	Polvo	Polvo de poliamida y PCL	Escaneo láser y sinterización inducida por calor	80	Buena resistencia, fácil eliminación del polvo de soporte.	Superficie polvorienta de alto costo
3DP	Polvo	Cualquier material en formato polvo, se necesita aglutinante	Impresión de encuadernación a pedido	100–250	Capacidad multimaterial de bajo costo, fácil remoción del polvo de soporte	Obstrucción del chorro de aglutinante, contaminación del aglutinante
Trazado 3D	Líquido o pasta	PCL, PLA, hidrogel	Extrusión de jeringa presurizada y curado asistido por calor o UV	5-200	Alta resolución de impresión, capacidad de materiales blandos	Resistencia mecánica baja, lenta

Dado que esta tesis se centra en la fabricación de electrodos microtexturizados mediante técnicas híbridas, se profundizará a continuación en la tecnología de estereolitografía, en particular su variante MSLA, por ser la técnica utilizada para generar las piezas modelo requeridas para el proceso de electroconformado.

2.3.1.3. Capacidades y limitaciones

La fabricación aditiva ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, tanto en las ventas de equipos como en el valor de los bienes producidos, impulsado por una serie de ventajas técnicas y económicas que la posicionan como una tecnología clave para la industria del futuro [91].

Entre sus principales beneficios, destaca la libertad de diseño que ofrece: al no requerir utillajes específicos ni procesos sustractivos, permite la fabricación de geometrías complejas y características internas que serían imposibles o antieconómicas mediante técnicas tradicionales como el mecanizado, la fundición, el forjado o el moldeo por inyección [91]. Además, el coste de producción es en gran medida independiente de la complejidad geométrica de la pieza, estando más relacionado con el coste del material y la velocidad de deposición o curado, lo cual favorece la personalización masiva y la fabricación de componentes específicos a bajo volumen [88].

La FA posibilita también la producción directa de productos funcionales en un solo paso, evitando procesos de ensamblaje de múltiples componentes fabricados individualmente. Asimismo, la eliminación de herramientas especiales reduce de forma significativa los plazos de entrega y los tiempos de comercialización en series cortas o prototipos [88].

Sin embargo, pese a sus ventajas, la adopción generalizada de la FA enfrenta varias limitaciones técnicas y económicas que deben ser consideradas.

Uno de los principales retos es la baja tasa de producción. La velocidad de deposición o curado en los procesos aditivos suele estar en el rango de 1 a 10 cm^3 por hora, lo que implica que la fabricación de piezas voluminosas puede requerir varias horas o incluso días. Además, los materiales empleados en FA, especialmente polvos metálicos o polímeros especiales, son significativamente más costosos que sus equivalentes convencionales, llegando a multiplicar su precio por uno o dos órdenes de magnitud. Esto conlleva que el desperdicio material por errores de fabricación tenga un impacto económico mucho mayor en comparación con los métodos tradicionales [91].

La recuperación de material en piezas fallidas ya sea por reciclaje o reprocesado, resulta en muchos casos no viable o poco rentable. Aunque se han realizado avances en técnicas de reparación de construcciones defectuosas [108,109], estos métodos aún se encuentran en fase de investigación y no son de uso generalizado en la industria.

Otro desafío importante es la precisión geométrica. A pesar de los progresos en la resolución de impresión, la FA sigue siendo vulnerable a errores acumulados a lo largo del proceso de preproducción digital (mallado, corte y generación de trayectorias de impresión). Tradicionalmente se ha considerado que los errores provienen principalmente de la fase física del proceso; sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que deficiencias en las traducciones digitales —como mallas defectuosas o cortes inadecuados— son también responsables de un porcentaje significativo de fallos de fabricación [110].

Adicionalmente, la apariencia capa por capa, característica inherente a los procesos de FA, representa otro inconveniente en determinadas aplicaciones. En sectores donde la estética o la aerodinámica son factores relevantes —como en aeronáutica, arquitectura o bienes de consumo—, las líneas visibles entre capas pueden ser un defecto crítico. Aunque existen tratamientos posteriores como el pulido químico o térmico para mejorar la superficie, estos implican incrementos adicionales en el tiempo y en el coste de fabricación. Cabe señalar que la gravedad de este efecto depende directamente del grosor de capa utilizado y de la tecnología empleada, siendo más acusado en procesos como FDM y menos en técnicas basadas en lecho de polvo o estereolitografía [85].

2.3.1.4. Estereolitografía por máscara

La estereolitografía por máscara (MSLA, por sus siglas en inglés Masked Stereolithography) es una variante tecnológica dentro del grupo de procesos de estereolitografía (SLA), perteneciente al campo de la fabricación aditiva mediante fotopolimerización. Mientras que los sistemas SLA convencionales emplean un láser ultravioleta (UV) focalizado para polimerizar punto a punto cada capa de resina, los sistemas MSLA utilizan una matriz de diodos emisores de luz UV (LED UV) como fuente de luz y una pantalla LCD como máscara dinámica, permitiendo el curado simultáneo de toda una capa [96] (véase Figura 2.21).

Esta arquitectura de impresión representa una evolución en términos de eficiencia operativa respecto a la SLA tradicional. En el proceso MSLA, el modelo tridimensional es previamente segmentado en capas digitales mediante software de laminado, al igual que en otros sistemas de impresión 3D. Posteriormente, para cada capa, la pantalla LCD actúa como un fotomáscara, bloqueando selectivamente la luz UV y permitiendo su paso solo en aquellas áreas que deben curarse. Como resultado, toda la sección transversal de una capa se cura de forma simultánea, lo que incrementa significativamente la velocidad de fabricación en comparación con el enfoque secuencial de los sistemas SLA convencionales [97].

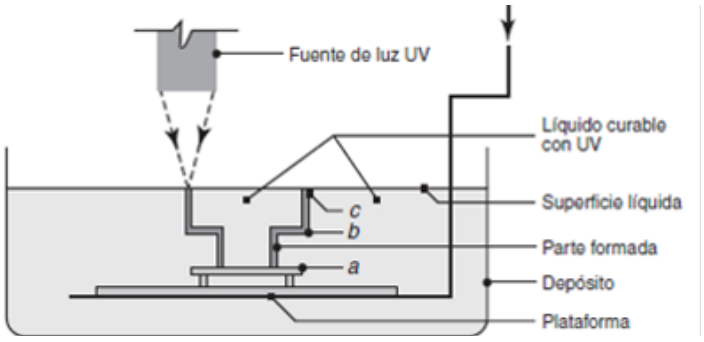


Figura 2.21. Representación esquemática de una típica configuración SLA.

Desde el punto de vista técnico, el proceso mantiene los principios de fotopolimerización por radicales libres: los fotoiniciadores contenidos en la resina líquida reaccionan al ser expuestos a radiación UV, generando radicales libres que inician la reticulación de los monómeros, dando lugar a una estructura polimérica sólida [98,99]. Sin embargo, la diferencia clave reside en el modo de exposición a la luz: mientras que SLA cura punto a punto mediante un láser guiado por galvanómetros, MSLA utiliza una exposición en bloque basada en patrones proyectados a través de la pantalla LCD, lo que elimina la necesidad de escaneo mecánico y mejora la eficiencia [97].

Una de las ventajas más destacadas de la tecnología MSLA es su alta productividad cuando se fabrican múltiples piezas simultáneamente. Dado que la exposición se realiza por capas completas, el número de modelos dispuestos en la plataforma no afecta directamente al tiempo de impresión. Por tanto, imprimir una sola pieza o varias dentro de la misma altura conlleva idéntica duración de fabricación, siendo el número de capas el principal factor que determina el tiempo total del proceso [97].

Además de sus ventajas en términos de velocidad, la tecnología MSLA ha ganado popularidad en el ámbito de la impresión 3D de escritorio y semiprofesional debido a la reducción de costes en comparación con los sistemas SLA industriales, manteniendo una excelente resolución y calidad de superficie. Esta accesibilidad ha hecho que MSLA se convierta en la opción preferente para aplicaciones como odontología digital, creación de prototipos de precisión, joyería y, como en el caso de esta tesis, la fabricación de piezas modelo con microtexturas de alta fidelidad geométrica [97].

2.3.1.5. Comparativa entre Tecnologías SLA, DLP y LCD

Dentro de los procesos de fabricación aditiva basados en fotopolimerización, existen diversas variantes tecnológicas que comparten el principio común de solidificación de resinas líquidas fotosensibles capa por capa, pero que difieren en el método de exposición y curado de cada capa. Las tecnologías más representativas son la estereolitografía (SLA), el procesamiento de luz digital (DLP) y la impresión mediante pantalla LCD (MSLA), como se representa en la Figura 2.22 [100].

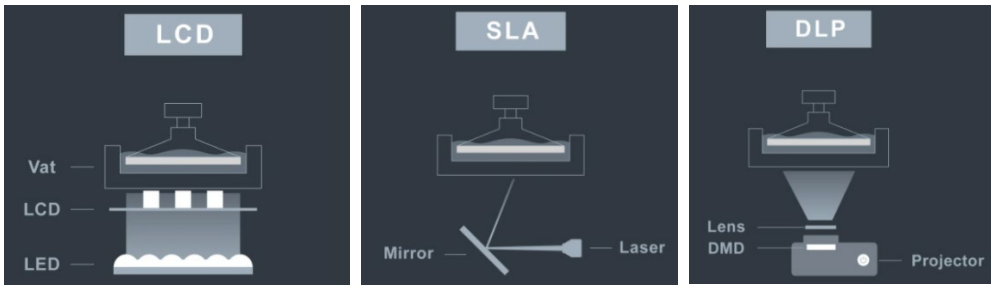


Figura 2.22. Comparativa entre los diferentes tipos de impresión 3D [101].

Todas estas tecnologías utilizan un tanque de resina líquida y un proceso de curado selectivo, formando objetos sólidos mediante la polimerización inducida por radiación ultravioleta. Sin embargo, presentan diferencias relevantes en su mecánica de funcionamiento y en el equipamiento empleado:

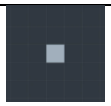
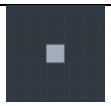
- **Impresión 3D SLA**: La estereolitografía es la tecnología de impresión 3D de resina más antigua. En este proceso, un rayo láser UV escanea la superficie del tanque de resina, solidificando selectivamente las áreas deseadas. El rayo láser se dirige mediante espejos galvanométricos que permiten un control preciso del punto de curado sobre la capa de resina.

- **Impresión 3D DLP**: El procesamiento de luz digital, desarrollado posteriormente, utiliza un proyector digital para polimerizar toda la capa simultáneamente. La proyección se realiza mediante un conjunto de microespejos controlados (DMD, Digital Micromirror Device), que orientan la luz UV sobre los píxeles que conforman la imagen de la capa. Cada capa se construye a partir de vóxeles, análogos a los píxeles de una imagen 2D.

- **Impresión 3D LCD (MSLA)**: En esta variante, se emplea una pantalla LCD retroiluminada por una matriz de LEDs UV. La pantalla actúa como una máscara dinámica, bloqueando o permitiendo el paso de la luz según el patrón de la capa. A diferencia de DLP, el sistema LCD no requiere microespejos, lo que simplifica el hardware y reduce los costes.

A pesar de operar bajo un mismo principio de curado fotopolimérico, las diferencias tecnológicas entre SLA, DLP y LCD conllevan variaciones en aspectos clave como la velocidad de impresión, la precisión y el coste de los equipos, resumidos en la Tabla 2.6 [100,101].

Tabla 2.6. Diferencias entre impresión SLA/DLP/LCD [100,101].

Parámetros	SLA	DLP	LCD
Tipo de curado	Láser UV	Proyector	Pantalla LCD
Tanque resina	Profundo	Menos profundo	Profundo
Velocidad de impresión	Rápida	Más rápida	Más rápida
Precisión	Mejor	Buena	Buena
Resolución			
Costo de la impresora	3,000 – 90,000 €	1,700 – 3,500 €	170 – 2,000 €

Un aspecto técnico fundamental a considerar en estos procesos es la longitud de onda de operación de la fuente de luz, que debe ser compatible con el rango de absorción de los fotoiniciadores presentes en la resina utilizada [100]. Generalmente:

- Las resinas formuladas para SLA están diseñadas para fuentes de luz UV en el rango de 385–405 nm, siendo compatibles con la mayoría de las impresoras SLA, DLP y LCD abiertas.
- Las resinas específicas para impresoras LCD admiten un rango de longitudes de onda más amplio, entre 385–420 nm, adaptándose tanto a tecnologías LCD como a ciertas variantes de DLP.

La elección adecuada de la resina en función de la tecnología y de la longitud de onda es esencial para garantizar un curado eficiente, una calidad superficial óptima y una correcta reproducción de las características geométricas del modelo.

2.3.1.6. Materiales empleados

La fabricación aditiva mediante estereolitografía, así como su variante MSLA, emplea como material base resinas líquidas fotocurables, principalmente formuladas a partir de monómeros acrílicos y epoxídicos [104], [108]. Estas resinas presentan propiedades diseñadas específicamente para optimizar su comportamiento durante el proceso de impresión: una adecuada viscosidad para su manejo, alta sensibilidad a la radiación ultravioleta, y estabilidad dimensional una vez curadas.

En las primeras etapas del desarrollo de esta tecnología, las opciones de resinas eran limitadas, basándose principalmente en poliacrilatos de bajo peso molecular o en macrómeros epoxi que, mediante polimerización fotoiniciada, formaban redes poliméricas vítreas rígidas. No obstante, en las últimas dos décadas se ha producido una significativa diversificación de formulaciones, lo que ha permitido ampliar el espectro de propiedades mecánicas obtenibles tras el curado. Así, las piezas fabricadas por estereolitografía han evolucionado desde simples prototipos hasta componentes funcionales aptos para aplicaciones industriales más exigentes [102].

Las resinas utilizadas en SLA y MSLA son en su mayoría sistemas multifuncionales de bajo peso molecular, lo que favorece la formación de redes densamente reticuladas durante el proceso de fotopolimerización. Estos materiales suelen ser inherentemente vidriosos, rígidos y frágiles, aunque el desarrollo de nuevas formulaciones ha permitido también la obtención de materiales elastoméricos, mediante el empleo de macrómeros de mayor peso molecular (1–5 kg/mol) y la incorporación de diluyentes no reactivos, como la N-metilpirrolidona (NMP) o agua, para reducir la viscosidad de la resina [102].

Actualmente, el mercado ofrece una amplia gama de tipologías de resinas fotosensibles, las cuales se clasifican según sus propiedades específicas y su campo de aplicación. Esta clasificación incluye categorías como resinas estándar, rígidas, resistentes, moldeables (para joyería y dental), flexibles, base biológica, biocompatibles, lavables al agua y específicas para impresoras LCD o SLA. La Figura 2.23 muestra una clasificación general de las resinas fotosensibles utilizadas en impresión 3D, mientras que las Tablas 2.7 y 2.8 resumen los parámetros de impresión y las propiedades mecánicas más relevantes para cada tipología [103–107].



Figura 2.23. Clasificación tipologías de resinas fotosensibles para impresión 3D.

Tabla 2.7. Clasificación de los diferentes atributos de las resinas [103–107].

Tipología de resina	Longitud de onda (nm)	Densidad (g/m³)	Viscosidad (25ºC, MPa · s)	Dureza (Shore D)
Estándar	225-415 / 395-405	1.02-1.13	100-250	35 / 80-82
Lavable al agua	395-410	1.05-1.25	100-120	80-85
Duro	225-415 / 395-405	1.02-1.15	80-95 / 200-300	69 / 80-81
Resistente	225-415 / 395-405	1.02-1.15	80-95 / 200-300	80-81
Rígida	395-405	1.10-1.15	200-300	83
Flexible	395-405	1.18 (g/cm³)		85-90
Moldeable	225-415 / 355-410	1.05-1.25	85 / 100-300	60-80
Ingeniería	385-415	1.12 (g/cm²)	95	75-89
Base biológica	355-410	1.05-1.25 (g/cm³)	200-400	80-84
Biocompatible	355-410	1.05-1.25 (g/cm³)	200-400	80-84
LCD	385-420	1.18 (g/cm²)	500-700	82-84
SLA	385-405	1.12 (g/cm²)	700	78

Tabla 2.8. Clasificación de propiedades mecánicas de las resinas [103–107].

Tipología de resina	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de flexión (MPa)	Resistencia al impacto IZOD (J/m)
Estándar	46-67	28-35	46-72	1000-1400	18-40
Lavable al agua	59-70	5-10	45-70	900-1400	18-39 / 41-48
Duro	55-60	30-50	70-80	1300-1400	67-100
Resistente	55-60	30-50	70-80	1300-1400	67-100
Rígida	60-70	25-35	80-85	1400-1500	15-42
Flexible	6-8	100-150	-	-	-
Moldeable	42-62	11-20	49-70	1180-2685	44-49
Ingeniería	45-91	8-25	35-135	900-3250	20-40
Base biológica	35-50	20-50	40-60	600-800	15-32
Biocompatible	52-73	12	84-103	2300-2500	28-35
LCD	45-83	8-14.2	59-70	1800-1900	17-18
SLA	62	4	75	1900	15

2.3.1.7. Capacidades y limitaciones específicas de la tecnología SLA y MSLA

En el caso concreto de la estereolitografía y su variante MSLA, se pueden identificar capacidades y restricciones particulares.

Dentro de sus principales fortalezas, destaca la posibilidad de alcanzar resoluciones de impresión extremadamente altas, produciendo piezas con excelente calidad superficial y permitiendo la reproducción precisa de detalles finos y geometrías complejas. Al no requerir boquillas de extrusión, como ocurre en otras tecnologías, se evita el riesgo de obstrucciones durante el proceso de deposición [111].

No obstante, la tecnología SLA/MSLA también presenta ciertas limitaciones inherentes. El volumen máximo de impresión está restringido por las dimensiones del tanque de resina y el sistema óptico de exposición. Además, al aumentar el tamaño del área de trabajo, se pueden generar irregularidades en la homogeneidad de la curación de las capas, afectando a la calidad dimensional de la pieza final [112].

Asimismo, las piezas impresas por SLA requieren siempre procesos de postcurado, que incluyen la limpieza de los residuos de resina no solidificada y una exposición adicional a radiación UV para alcanzar sus propiedades mecánicas definitivas [113]. Estos pasos adicionales suponen una carga de tiempo y recursos que debe ser tenida en cuenta en la planificación de la producción.

Por último, el alto coste del equipamiento especializado y de las resinas fotopoliméricas formuladas para SLA y MSLA, así como la posible citotoxicidad derivada de fotoiniciadores residuales o monómeros no polimerizados, representan limitaciones relevantes para su implementación industrial a gran escala [114].

2.3.1.8. Texturizado mediante fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA) ha emergido como una herramienta versátil para la integración directa de texturas funcionales y estéticas sobre superficies tridimensionales, permitiendo la creación de diseños complejos, personalizados y de alto valor añadido. A diferencia de los procesos tradicionales, la FA permite aplicar texturas durante la propia fase de fabricación, evitando procesos secundarios y reduciendo significativamente residuos y tiempos de procesamiento.

- **Aplicaciones funcionales del texturizado en FA**

El uso de texturas en piezas fabricadas mediante tecnologías aditivas fue inicialmente propuesto en el ámbito biomédico. Estudios como los de Sachs [115] y Curodeau [116] exploraron la producción de moldes cerámicos con patrones superficiales específicos, buscando mejorar la adhesión de implantes ortopédicos al tejido biológico.

Posteriormente, investigaciones más recientes han ampliado estas aplicaciones hacia ámbitos mecánicos y estructurales, aprovechando el potencial del microtexturizado superficial para modificar el comportamiento funcional de las piezas. En este sentido, se han desarrollado texturas bioinspiradas que permiten ajustar el coeficiente de fricción, ya sea para reducirlo o incrementarlo, en componentes fabricados en materiales plásticos o metálicos [117,118]. Además, se ha demostrado que, mediante técnicas de fabricación aditiva de alta resolución, es posible generar estructuras microtexturizadas que controlan fenómenos como la humectabilidad de la superficie, alcanzando en algunos casos propiedades superhidrofóbicas, como se ha documentado en los estudios de Jafari y colaboradores [119].

Recientemente ha surgido en la literatura una gran cantidad de nuevos usos del texturizado directo en FA. Algunos de ellos explotan las propiedades técnicas de las superficies texturizadas. Los coeficientes de fricción reducidos o mejorados, así como los comportamientos tribológicos bio-inspirados, se logran en diversos estudios tanto en piezas de plástico [117] como en piezas de metal [118].

Desde el punto de vista mecánico, se ha demostrado que patrones tipo Voronoi pueden aumentar significativamente la resistencia a la flexión en piezas de PLA [120]. Asimismo, Jonhson [121] fabricó estructuras protectoras inspiradas en organismos naturales, que mejoraron la resistencia al impacto y a la penetración de hojas cortantes.

- **Aplicaciones perceptivas y decorativas**

Además de sus beneficios funcionales, las texturas aplicadas mediante FA han demostrado ser eficaces en la modulación de propiedades perceptivas y estéticas. Investigaciones como las de Mai et al. [122] y Ou [123] han reproducido patrones que simulan vetas de madera o estructuras pilosas impresas en 3D, mejorando la experiencia táctil y visual de productos decorativos (Figura 2.24).

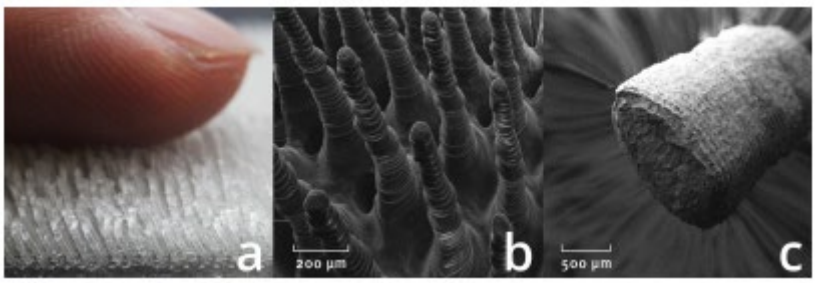


Figura 2.24. (a) Estructura de cabello impresa con SLA basado en rayo láser. (b) Foto SEM de (a). (c) Forma ovalada del rayo láser. Obtenido de [123].

Estudios como el de Rompay [124] evidencian que patrones regulares en objetos como vasos pueden alterar la percepción de calidad del producto. Otros trabajos han mostrado cómo la texturización 3D en productos alimentarios, como el chocolate [125], o en textiles [126], puede influir en la percepción del sabor y en el comportamiento de drapeado, respectivamente.

- **Estrategias de generación de textura digital**

En la mayoría de los estudios anteriores, las texturas se aplican a modelos digitales a través de modelos interactivos. También se ha intentado automatizar las operaciones de texturizado. Esto se hace de diferentes formas dependiendo de la complejidad geométrica de las piezas. La tarea es obviamente más fácil cuando la superficie objetivo es topológicamente similar al área rectangular donde la textura generalmente se define.

Cuando los objetos tienen superficies primitivas simples (planos, cilindros), la textura se puede generar a partir de funciones analíticas. Por ejemplo Maekawa et al.[127], aplican patrones aleatorios autocorrelacionados (fluctuaciones 1/f) a los modelos STL para obtener efectos decorativos en las piezas FA. En un estudio previo de Armillotta [128], se agregan patrones simples generados por ecuaciones matemáticas a muestras planas para probar la resolución detallada de un proceso de FA específico (Figura 2.25). De igual modo, los procedimientos basados en la deformación de la malla para crear ondulaciones superficiales en obras de arte generativas, que también podrían aplicarse a macrotexturas con escalas y relaciones de aspecto más bajas se generan por Kanada [129].

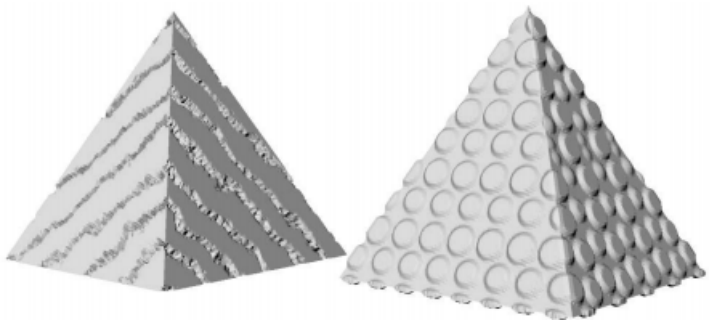


Figura 2.25. Uniformidad y consistencia de los desplazamientos de vértices. Obtenido de [128].

Para superficies más complejas, se han desarrollado procedimientos parcialmente automatizados. Jee y Sachs [130], y Zhou et al. [131] propusieron métodos interactivos para mapear texturas sobre regiones trianguladas o curvas de mallas. Dumas et al. [132] mejoraron este enfoque utilizando proyecciones de texturas sobre estructuras voxelizadas, mientras que Herholz [133] y Pintus [134] desarrollaron técnicas para incrementar la nitidez y visibilidad de las texturas aplicadas.

En paralelo, también se han propuesto enfoques desde el punto de vista de la trayectoria de fabricación. Kobayashi y Shirai [135] integraron patrones periódicos directamente en la generación de trayectorias CNC. Otros autores, como Yaman et al. [136] y Jin et al. [137,138], han trabajado en la modificación de contornos de corte y trayectorias adaptativas para insertar detalles geométricos sin alterar la integridad de la pieza.

- **Ventajas del texturizado en FA**

El texturizado mediante FA ofrece múltiples beneficios en comparación con métodos tradicionales:

  - **Sostenibilidad**: reduce el uso de materiales tóxicos y procesos post-fabricación.
  - **Personalización**: permite la creación de texturas funcionales para mejorar el agarre, la aerodinámica o la absorción acústica, y texturas estéticas para productos personalizados o decorativos [139].
  - **Prototipado realista**: facilita la validación de productos antes de su producción masiva. Por ejemplo, la empresa Samsonite empleó prototipos texturizados como modelos ficticios para presentación comercial, con excelente aceptación en entornos de ventas y ferias [140,141].
  - **Producción de ortesis personalizadas**: en el sector médico, se han generado plantillas y férulas personalizadas mediante impresión 3D y texturizado funcional, optimizando la adaptación y facilidad de limpieza [139].
  - **Texturizado masivo**: permite la generación simultánea de múltiples patrones sobre distintas áreas de una pieza o conjunto de productos, agilizando la iteración y la exploración de alternativas en fases de diseño [139].

El texturizado tridimensional a través de fabricación aditiva representa una alternativa sostenible, eficiente y flexible para diseñadores e ingenieros. Permite no solo replicar patrones complejos con precisión, sino también optimizar el rendimiento funcional y estético de los productos. Si bien su implementación a gran escala aún enfrenta desafíos relacionados con la automatización completa y la gestión de geometrías complejas, el avance en herramientas de diseño, simulación y trayectorias CAM adaptativas está consolidando su adopción en industrias como la biomédica, automotriz, textil y de consumo [139].

A medida que estas tecnologías se democratizan, el texturizado 3D mediante FA se perfila como una solución clave en el desarrollo de productos inteligentes, funcionales y personalizados.

2.3.2. Electroconformado

El electroconformado (electroforming) es una técnica de fabricación basada en la electrodeposición controlada de metales sobre un molde o sustrato, cuyo propósito final es obtener una pieza metálica que replica con precisión su geometría superficial. Esta tecnología, que encuentra sus raíces en el siglo XIX, ha evolucionado desde aplicaciones artísticas hasta consolidarse como un proceso clave en múltiples sectores industriales y científicos. Su origen se remonta a 1837, cuando B.S. Jacobi, profesor alemán afincado en Rusia, observó por primera vez el fenómeno durante ensayos de electrodeposición de cobre sobre placas de impresión [142,143]. Posteriormente, en 1842, el profesor Bottger desarrolló la galvanoplastia de níquel, ampliando la aplicabilidad del proceso y favoreciendo su progresiva implantación [144].

Para comprender el contexto técnico del electroconformado, es útil compararlo con la galvanoplastia, de la cual deriva directamente. Mientras que la galvanoplastia tiene como objetivo revestir una superficie para mejorar sus propiedades, el electroconformado busca fabricar componentes metálicos con integridad propia sin el elemento que le da forma, sin necesidad de operaciones

mecánicas adicionales. Ambos procesos comparten principios comunes: emplean una celda electrolítica con un ánodo (fuente metálica), un cátodo (pieza o modelo) y un electrolito con sales metálicas. Sin embargo, difieren en su propósito final y en las características requeridas del molde o sustrato conductor [144,145].

Las superficies activas deben ser siempre conductoras de la electricidad. Si el material es ya conductor solo habría que enmascarar las superficies no activas, mientras que si no es conductor hay que hacerlas conductoras mediante diferentes técnicas. Este aspecto lo diferencia radicalmente de la galvanoplastia, donde el sustrato debe ser inherentemente conductor [145].

Durante el proceso, los cationes metálicos del electrolito migran hacia el cátodo bajo la acción de un campo eléctrico continuo, donde se reducen y se depositan átomo a átomo en la superficie del molde (véase Figura 2.26). Este fenómeno permite una reproducción fiel y precisa del patrón original, incluso en el rango submicrométrico, sin producir daño mecánico ni térmico sobre la superficie replicada [144].

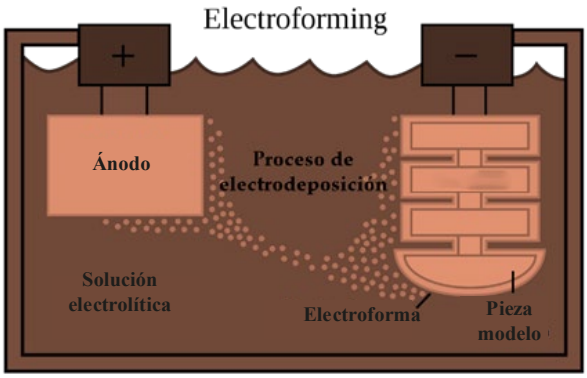


Figura 2.26. Proceso de electroconformado.

A nivel funcional, el proceso se compone de cuatro elementos fundamentales: el ánodo, el cátodo (modelo), el electrolito y una fuente de alimentación. La correcta interacción entre estos elementos define la calidad del depósito, siendo especialmente importante la distribución del campo eléctrico y la gestión de la densidad de corriente. En piezas con geometría compleja o presencia de ranuras profundas, una distribución no uniforme de corriente puede comprometer la calidad del recubrimiento, dando lugar a espesores desiguales o defectos superficiales. Por ello, en años recientes se han introducido sistemas complementarios para la agitación controlada, el enmascaramiento direccional o el uso de aditivos específicos, lo que ha dado lugar a los denominados procesos híbridos de electroconformado [144].

Además, en el contexto de la actual micro y nanofabricación, el electroconformado ofrece ventajas notables frente a procesos convencionales. Gracias a su carácter aditivo y sin contacto, permite la fabricación de componentes con geometrías complejas, de paredes delgadas y con detalles intrincados, sin inducir tensiones internas ni daños térmicos. En particular, se ha demostrado útil en la fabricación de moldes para microinyección, componentes de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS), óptica de alta precisión, dispositivos médicos y electrodos para procesos como la electroerosión [144,145].

Un aspecto destacable es su capacidad para generar piezas replicadas con tolerancias extremadamente ajustadas, alcanzando precisiones de hasta ±1 µm en aplicaciones industriales, e incluso menores en entornos controlados de laboratorio. Esta capacidad, unida a su compatibilidad con tecnologías de prototipado rápido como la estereolitografía (SLA) y su posibilidad de integrarse en flujos de producción digitalizados, convierten al electroconformado en una herramienta valiosa en la era de la Industria 4.0 [144,145].

Actualmente, las líneas de investigación en electroconformado se centran en dos ejes principales: por un lado, el refinamiento del tamaño de grano para mejorar las propiedades mecánicas y el acabado superficial de los depósitos; y por otro, su integración con tecnologías avanzadas como la fabricación aditiva, el texturizado láser o la ingeniería biomimética, lo que busca potenciar sus capacidades y superar limitaciones asociadas a la distribución de corriente o la calidad en cavidades profundas [144].

2.3.2.1. Fundamentos del electroconformado

Según la definición propuesta por el Comité B08 de ASTM, el electroconformado consiste en: "la producción o reproducción de artículos mediante electrodeposición sobre un mandril o modelo, que posteriormente es separado del depósito del metal" [146,147].

Este proceso se lleva a cabo sumergiendo el sistema en una celda electrolítica que contiene una solución de sales metálicas. En este sistema, el modelo actúa como cátodo (polo negativo), mientras que el ánodo (polo positivo) es un electrodo compuesto por el mismo metal que se desea depositar. Al aplicar corriente continua entre ambos electrodos, los iones metálicos se reducen en la superficie del modelo, depositándose como átomos metálicos y formando progresivamente una capa uniforme (Figura 2.27) [146].

A nivel funcional, este proceso permite la fabricación de formas tanto simples como altamente complejas, con espesores de pared que pueden oscilar desde pocas micras a varios milímetros. Los componentes generados pueden tener pesos que varían desde miligramos hasta varias decenas de kilogramos, y su precisión dimensional depende en gran medida de la exactitud del modelo maestro utilizado [23,146].

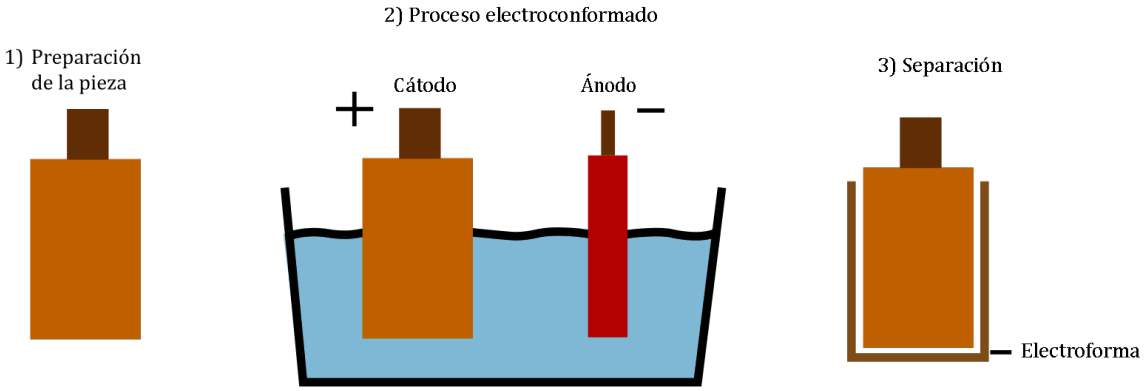


Figura 2.27. Principios del proceso de electroconformado [148].

Uno de los aspectos fundamentales del electroconformado es que la distribución del espesor del depósito no es uniforme, ya que está directamente influenciada por el campo eléctrico generado en la celda. Las zonas sobresalientes del modelo, como esquinas o bordes, tienden a recibir una mayor densidad de corriente, lo que resulta en depósitos más gruesos. Por el contrario, las áreas cóncavas o en sombra presentan menor intensidad de campo y, por ende, menor espesor de capa [149]. Este fenómeno requiere un control minucioso del diseño geométrico del modelo y, en algunos casos, la implementación de técnicas auxiliares como ánodos de sacrificio o enmascaramientos.

En cuanto a los materiales empleados para el modelo, han de ser compatibles con el baño electrolítico. Estos pueden ser metálicos (como zinc o aluminio) o no metálicos (como plásticos, cera o resinas), siempre que sus superficies sean conductoras o se acondicionen con recubrimientos conductivos, tales como pinturas cargadas con plata o pulverizaciones metálicas. En casos donde se

requieren modelos desechables, se opta por materiales que puedan fundirse o disolverse químicamente sin dañar la estructura electroformada [23,148].

Esta técnica es particularmente adecuada para la producción de series pequeñas, prototipos o componentes con geometrías complejas, como moldes, guías de onda, fuelles, microestructuras ópticas o matrices. En estos casos, donde los procesos convencionales de mecanizado presentan limitaciones, el electroconformado ofrece una solución rentable, precisa y técnicamente viable.

2.3.2.2. Etapas del proceso

El proceso de electrodeposición se desarrolla bajo las características propias de una reacción química que se acelera, gracias a la existencia de un catalizador, sin que se produzca modificación en la naturaleza de este. Son por tanto reacciones catalíticas, que además se desarrollan en una interacción metal-electrolito que tienen propiedades químicas diferentes, lo que resulta complejo de caracterizar. La bibliografía establece 4 etapas para el desarrollo del proceso [89]:

1. Etapa de transporte del elemento reaccionante desde la interfase o hacia la interfase entre metal-electrolito.
2. Etapa de transferencia de carga a través de la interfase.
3. Etapa de reacción química, que puede preceder o seguir a la reacción de transferencia.
4. Etapa de formación de una fase, es decir, nucleación de un cristal o crecimiento del mismo.

A partir de aquí el crecimiento puede desarrollarse de forma aislada, por capas, por agrupación de núcleos o por formación de una capa continua.

En principio, los iones metálicos se encuentran ocupando todo el volumen del electrolito. Cuando se aplica un campo eléctrico, los iones se orientan, dirigiéndose hacia la región catódica.

Los fenómenos de convección y difusión presentan una gran influencia, sobre todo debido al empobrecimiento de esos iones, ya depositados sobre el cátodo, en la capa líquida que rodea al electrodo. El ion metálico atraviesa la región de baño electrolítico adyacente a la superficie catódica (doble capa eléctrica) y se incorpora a la estructura cristalina del depósito.

Finalmente se realiza el crecimiento del cristal en sus diferentes tipologías: en forma de capas, en forma de escalones, en forma de pirámides y en forma dendrítica o arborescente. En definitiva, el proceso de electrodeposición requiere dos fases: la formación de una estructura cristalina por nucleación [90], su desarrollo posterior y el crecimiento de esta capa hasta alcanzar el espesor deseado [91]. Las figuras 2.28 muestran algunos ejemplos de tipos de crecimiento.



Figura 2.28. Crecimiento del cobre de tipo nucleado y arborescente. Obtenido de [150].

2.3.2.3. Parámetros operativos del proceso que influyen en la electrodeposición

La fidelidad de replicación del electroconformado puede alcanzar niveles submicrométricos, convirtiéndolo en una de las técnicas más exactas disponibles en la fabricación de precisión. Esta capacidad de réplica se ve influenciada por una serie de parámetros críticos, que deben ser cuidadosamente controlados para garantizar la calidad del producto final. Entre ellos destacan [146,150]:

- **La naturaleza y el estado superficial del cátodo o pieza modelo**

La calidad del modelo o sustrato sobre el que se deposita el metal influye de forma directa en la fidelidad del resultado final. Una superficie conductora, limpia, libre de contaminantes y con buena adherencia eléctrica garantiza un crecimiento uniforme y sin defectos. En el caso de materiales no metálicos, es imprescindible aplicar una capa conductora homogénea antes del proceso, y su adherencia puede condicionar el resultado de la cáscara metálica obtenida.

- **Relación entre las áreas del cátodo y ánodo**

La proporción entre las áreas expuestas del ánodo y el cátodo influye en la eficiencia del proceso y en la distribución de corriente en la celda. Cuando el ánodo es considerablemente mayor que el cátodo, se puede generar una sobre concentración de corriente en ciertas zonas, afectando la uniformidad del espesor y aumentando el riesgo de defectos locales.

- **La densidad de corriente aplicada**

La densidad de corriente se refiere a la cantidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área sobre la superficie del cátodo. Este parámetro determina la velocidad de deposición del metal y afecta tanto la morfología como la estructura interna del metal depositado. Densidades elevadas pueden inducir tensiones internas, rugosidad superficial y crecimiento de granos columnar, mientras que valores bajos suelen producir depósitos más compactos y homogéneos.

- **La agitación del electrolito**

La agitación del electrolito asegura una distribución uniforme de los iones metálicos cerca de la superficie del cátodo. Su adecuada gestión evita la formación de zonas de agotamiento iónico, minimiza gradientes de concentración y mejora la homogeneidad del espesor. Puede realizarse mediante agitación mecánica, aireación o circulación forzada del fluido.

- **La temperatura del baño electrolítico**

La temperatura del baño electrolítico influye en la movilidad iónica, la solubilidad de los compuestos, la velocidad de reacción y la morfología del depósito. Temperaturas más altas tienden a acelerar la deposición, pero pueden generar depósitos porosos o menos adherentes si no se controlan adecuadamente. Además, modifican la cinética de adsorción de los aditivos y su efecto sobre la superficie.

- **La concentración de iones metálicos**

Este parámetro se refiere a la cantidad de especies metálicas activas presentes en el baño. Una concentración insuficiente puede provocar una deposición discontinua, mientras que un exceso puede conducir a la formación de depósitos con estructura dendrítica. El equilibrio óptimo depende del tipo de metal, del diseño del sistema y de la densidad de corriente aplicada.

- **El pH (concentración de iones H^+)**

El pH afecta tanto la solubilidad de las sales metálicas como la estabilidad de los complejos iónicos formados en la solución. Valores de pH fuera del intervalo óptimo pueden dar lugar a la formación de óxidos, hidróxidos u otras especies no deseadas que afectan la calidad del depósito. Además, influye en la actividad de los aditivos orgánicos o nivelantes.

- **La presencia de aditivos (abrillantadores, dispersantes, inhibidores)**

Se trata de compuestos añadidos al electrolito para modificar el comportamiento de la deposición. Existen varios tipos: abrillantadores, tensioactivos, inhibidores de crecimiento o dispersantes. Estos aditivos pueden reducir la formación de defectos, mejorar el acabado superficial, controlar el tamaño de grano e incluso modificar la orientación cristalográfica del metal depositado

- **Pantallas o escudos aislantes**

Las pantallas aislantes son elementos no conductores que se colocan entre el cátodo y el ánodo con el fin de modificar el campo eléctrico y limitar el exceso de deposición en zonas de alta concentración de corriente. Son especialmente útiles en geometrías complejas, como bordes y salientes, así como en cavidades profundas donde es necesario compensar la menor cobertura del recubrimiento metálico.

Su uso permite mejorar la uniformidad del depósito en piezas con formas irregulares, y su eficacia ha sido ampliamente documentada, incluyendo desarrollos patentados [151]. Junto con otros factores como la separación entre electrodos, la geometría relativa, la agitación y la composición del baño [150,152], constituyen una estrategia clave para el control preciso del proceso de electroconformado.

2.3.2.4. Metalizado de las piezas modelo

En aquellos casos en los que se emplean tecnologías de fabricación aditiva para la elaboración de modelos base, es habitual que estos estén compuestos por materiales no conductores como ceras o polímeros. Esta característica impide su uso directo en procesos de electroconformado, por lo que es imprescindible conferirles conductividad superficial antes de iniciar la deposición metálica [153].

Existen diversas técnicas para lograr dicha conductividad superficial, entre las que destacan:

- reducción química de iones metálicos a partir de una solución acuosa
- deposición física de vapor (PVD)
- pintura cargada de plata

Entre estas opciones, el método más accesible y eficaz es la pintura conductora. Su aplicación mediante enmascaramiento permite delimitar con precisión las áreas a metalizar, evitando recubrimientos indeseados. Este procedimiento se caracteriza por su facilidad de implementación, coste relativamente bajo y, sobre todo, por asegurar una buena continuidad eléctrica sobre la superficie del modelo [153,154].

Por el contrario, la reducción química presenta limitaciones importantes en materiales hidrófobos como la cera, ya que su superficie repele el contacto con soluciones acuosas, dificultando el proceso. Por su parte, la deposición física de vapor, aunque ofrece resultados de alta calidad, requiere equipamiento especializado, operación en condiciones de vacío, y por tanto, implica una inversión significativamente mayor [153].

2.3.2.5. Baños electrolíticos de cobre

Cuando se utiliza cobre como metal de deposición para la fabricación de electrodos, como en los trabajos de Monzón [146] y Benítez [154], es fundamental seleccionar adecuadamente el tipo de baño electrolítico. Los principales tipos disponibles en la industria incluyen: baños alcalinos (cianurados y no cianurados), medianamente alcalinos (basados en pirofosfato) y ácidos (a base de sulfato o fluoborato).

De entre estas opciones, los baños ácidos son los más frecuentemente utilizados en aplicaciones de electroconformado por varias razones: son económicamente más asequibles, presentan una composición más sencilla de controlar, ofrecen elevadas eficiencias de deposición y generan residuos que son más fáciles de gestionar [153,154].

Además, es común la adición de aditivos al baño, tales como niveladores y abrillantadores, con el propósito de optimizar las propiedades finales del recubrimiento metálico, mejorando aspectos como la uniformidad del depósito, la morfología de grano y el brillo superficial [154].

2.3.2.6. Relación ánodo-cátodo

La distribución de la corriente eléctrica entre ánodo y cátodo es un factor clave que determina la uniformidad del espesor en el proceso de electroconformado. Una práctica común para mejorar dicha uniformidad es ajustar la distancia entre electrodos, aunque los estudios presentan resultados diversos. Yang y Kang [155], no observaron mejoras notables al variar distancias entre 20 y 100 mm, mientras que Tan y Lim [156], sí reportaron una mayor homogeneidad al ampliar el espacio de 4 a 30 mm. Según Oh et al. la influencia de esta variable depende de la geometría del sistema y la proporción de áreas entre los electrodos, lo que permite identificar una distancia óptima según cada configuración.

Ortega [147], por su parte, concluyó que, bajo una relación ánodo/cátodo de 4:1 y distancias entre 105 mm y 210 mm, la separación no tiene un impacto significativo sobre la uniformidad del recubrimiento. No obstante, una relación adecuada de áreas entre ánodo y cátodo resulta fundamental. Una superficie anódica demasiado grande puede inducir una mayor deposición en los bordes del cátodo, reduciendo la homogeneidad general del recubrimiento [157]. Por ello, se recomienda mantener la relación área ánodo/cátodo dentro del rango 1:1 a 2:1.

Además, cuando la superficie del cátodo es mayor que la del ánodo (relación inferior a 1:1), puede formarse una película pasiva sobre el ánodo, interrumpiendo el paso de corriente y deteniendo el proceso [158]. En estos casos, también interviene la polarización, que describe el potencial extra requerido para inducir la deposición metálica, condicionado por la resistencia eléctrica del electrolito y los fenómenos de oxidación y reducción que ocurren en los electrodos [157].

2.3.2.7. Capacidades y limitaciones

El proceso de electroconformado presenta una serie de ventajas distintivas respecto a otras tecnologías convencionales de fabricación, lo cual ha motivado su integración en sectores industriales donde se requieren elevados niveles de precisión, geometrías complejas y acabados funcionales específicos [142,159]. Su comportamiento sobresaliente en determinadas condiciones ha determinado su uso preferente en aplicaciones de alta exigencia técnica. A continuación, se resumen sus principales fortalezas:

- **Alta fidelidad en la reproducción de detalles**: El electroconformado permite replicar con gran precisión los microdetalles de la superficie del modelo original, alcanzando

resoluciones del orden de 0,01 μm, una capacidad difícilmente igualable por otras técnicas de manufactura.

- **Elevada exactitud dimensional**: Las piezas obtenidas mediante este proceso replican la geometría del modelo base con desviaciones mínimas, que pueden situarse por debajo de las décimas de micra. Esta precisión justifica su aplicación en áreas como la microfabricación o la producción de moldes y utillajes de gran exactitud.
- **Producción de estructuras de pared delgada**: Es posible obtener elementos cilíndricos o de geometría compleja con paredes muy delgadas y sin líneas de unión, una característica muy valorada en aplicaciones donde se requiere ligereza estructural o mínima interferencia térmica.
- **Facilidad para fabricar formas complejas**: El proceso posibilita la fabricación de piezas geométricamente complicadas en una sola etapa, evitando montajes posteriores o mecanizados adicionales.
- **Amplio rango de escalas**: El límite dimensional de las piezas está condicionado por el volumen del tanque electrolítico, más que por el proceso en sí. De este modo, pueden fabricarse desde microcomponentes hasta piezas de grandes dimensiones, sin que el tiempo de deposición esté estrictamente ligado al área o volumen total.
- **Capacidad de producción simultánea**: Al tratarse de un proceso que permite utilizar múltiples modelos en un mismo baño electrolítico, es viable llevar a cabo producción en masa, incrementando la eficiencia y reduciendo los ciclos de fabricación. Además, el modelo base puede reutilizarse en varias ocasiones tras el desprendimiento de la carcasa metálica.
- **Posibilidad de generar materiales multicapa**: El proceso permite la formación de componentes con estructuras tipo sándwich, combinando distintos metales o modificando las propiedades en zonas específicas de una misma pieza, lo cual amplía considerablemente las prestaciones finales del producto.

No obstante, como todo proceso tecnológico, el electroconformado presenta ciertas limitaciones, que deben ser consideradas cuidadosamente en cada aplicación concreta. La identificación y control de estas restricciones pueden permitir la mejora del proceso o su integración con tecnologías complementarias [160,161]. Las más relevantes se describen a continuación:

- **Presencia de tensiones internas**: Si no se controlan adecuadamente parámetros como la composición del electrolito, la agitación o la densidad de corriente, pueden generarse tensiones residuales (de tracción o compresión) durante la deposición. Estas tensiones pueden provocar deformaciones, fisuras o incluso separación prematura entre la electroforma y el modelo.
- **Separación del modelo base**: Una etapa crítica del proceso es la retirada de la carcasa metálica respecto al modelo maestro. Este desprendimiento puede realizarse por medios mecánicos, térmicos o químicos, pero requiere un diseño previo adecuado para evitar daños en la electroforma.
- **Tiempos de deposición prolongados**: Aunque el proceso es preciso, puede resultar lento para espesores considerables. Este inconveniente puede mitigarse aumentando la densidad de corriente o mejorando la agitación del electrolito, favoreciendo así una mayor velocidad de deposición.
- **No uniformidad del espesor**: Las diferencias en la densidad de corriente debido a la geometría de la pieza hacen que el espesor del depósito no sea completamente homogéneo, a pesar de emplear técnicas como ánodos conformados o pantallas aislantes.
- **Restricción de materiales**: Aunque el proceso se adapta bien a metales puros como el cobre, níquel, oro o plata, no todos los materiales metálicos son aptos para ser electroconformados. Sin embargo, los avances recientes han ampliado el abanico de materiales disponibles, incluyendo algunas aleaciones y compuestos con matrices metálicas.

2.3.2.8. Aplicaciones

El electroconformado se emplea extensamente tanto en la producción de componentes finales como en la fabricación de moldes y utillajes, especialmente en situaciones donde otras tecnologías presentan limitaciones técnicas o económicas [147]. Esta técnica se convierte en la solución óptima cuando se requiere:

- Fabricar piezas cuya complejidad geométrica o nivel de detalle no puede lograrse fácilmente mediante mecanizado u otros métodos tradicionales.
- Alcanzar tolerancias muy ajustadas en superficies irregulares o zonas de difícil acceso.
- Reproducir detalles superficiales con alta fidelidad y garantizar combinaciones específicas de acabado funcional y textura.
- Producir piezas con una eficiencia económica adecuada cuando no existen alternativas viables desde el punto de vista técnico.

Entre los materiales más utilizados en el proceso destaca el níquel, por su favorable relación coste/propiedades. No obstante, también se emplean otros metales como el cobre, la plata o el oro, especialmente cuando se requiere cumplir con requisitos particulares de conductividad, reflectividad, resistencia a la corrosión o propiedades mecánicas específicas. Es habitual también el uso combinado de varios metales, generando así piezas multicapa que integran propiedades de cada uno [147].

Una de las aplicaciones más representativas es la fabricación de productos tipo rejilla, ampliamente utilizados en la industria textil, donde se emplean para rodillos y pantallas de impresión que permiten transferir patrones complejos sobre tejidos (Figura 4.5) [160,162].

Otras aplicaciones relevantes incluyen:

- Filtros y tamices industriales, cilindros perforados para serigrafía, y mallas metálicas de alta precisión.
- Moldes para polímeros, empleados en procesos como la inyección, rotomoldeo, RTM o RIM, especialmente en el sector del automóvil (salpicaderos, paneles, guías de puertas, etc.).
- Dispositivos ópticos y de almacenamiento, como moldes para la fabricación de CD, DVD y Blu-ray, que requieren precisión nanométrica.
- Electrodos para electroerosión, donde las cáscaras metálicas de cobre generadas por electroconformado se montan sobre portaelectrodos, aportando elevada precisión y complejidad geométrica (Figura 2.29) [154].
- Elementos funcionales de alta precisión en sectores como la aeroespacial, electrónica, óptica e instrumentación, incluyendo antenas, reflectores, muelles de precisión, microcontactos eléctricos, o microestructuras de blindaje electromagnético [163].



Figura 2.29. Electrodo generado por electroconformado. Obtenido de [154].

Gracias a su alta capacidad de replicación, control geométrico a escala micrométrica, y versatilidad material, el electroconformado se posiciona como una tecnología clave en micro y nanofabricación, con un potencial creciente en las próximas décadas [164].

2.3.2.9. Microfabricación mediante electroconformado

En las últimas décadas, la progresiva tendencia hacia la miniaturización de dispositivos y componentes ha impulsado significativamente el desarrollo de tecnologías de microfabricación. Esta evolución responde a la creciente demanda de sistemas compactos y funcionales en campos como la electrónica, la óptica, la biomédica o la ingeniería de precisión. Como consecuencia, ha emergido la necesidad de procesos de fabricación altamente precisos y versátiles, capaces de trabajar con múltiples materiales y geometrías complejas, garantizando al mismo tiempo compatibilidad tecnológica e integridad funcional a lo largo de toda la cadena de producción [145].

En este contexto, el electroconformado ha sido reconocido como una tecnología especialmente prometedora para aplicaciones a microescala, dando lugar al denominado microelectroconformado. Esta variante del proceso se basa, al igual que su versión convencional, en la deposición electrolítica de metal átomo a átomo sobre un molde conductor, pero optimizada para trabajar con resoluciones extremadamente finas y tolerancias ajustadas [165]. A diferencia de otros métodos de fabricación, el microelectroconformado no induce esfuerzos térmicos, fuerzas de corte ni desgaste de herramienta, lo que lo hace idóneo para estructuras delicadas o materiales sensibles[145].

Entre las ventajas más relevantes del proceso se encuentran su elevada precisión de replicación, su bajo coste relativo y su capacidad para producir componentes con geometrías complejas, ausencia de zonas afectadas por el calor, y compatibilidad con materiales metálicos funcionales. Por estas razones, el microelectroconformado ha demostrado ser una de los procesos más efectivos en la producción de microcomponentes metálicos y estructuras tridimensionales a escala micro y nano [165].

Uno de los ejemplos más representativos de esta tecnología lo constituye la fabricación de microestructuras de níquel, como las mostradas en la Figura 2.30. Empleando soluciones basadas en sulfato de níquel, se han conseguido depósitos con altas tasas de crecimiento y baja acumulación de tensiones internas, lo que garantiza estabilidad dimensional y rendimiento funcional óptimo [166,167].

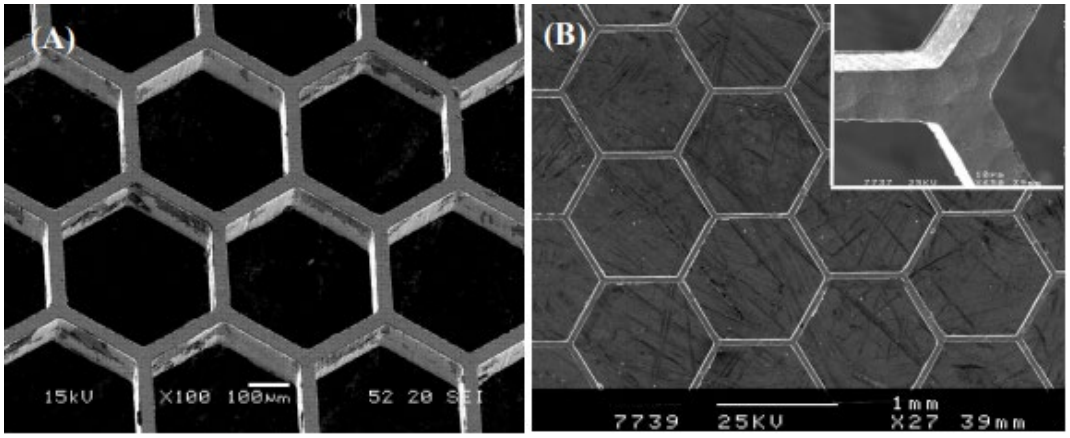


Figura 2.30. Imágenes SEM de micromallas electroconformadas hechas de níquel [166].

- **Tecnologías complementarias para el control del microelectroconformado**

Para alcanzar niveles de precisión aún más elevados, se han implementado diversos sistemas auxiliares que permiten un mayor control del entorno de deposición. Entre ellos destacan [168,169]:

  - Agitación magnética o ultrasónica del electrolito, para mejorar la homogeneidad de la deposición.
  - Configuraciones dinámicas con movimiento relativo entre ánodo y cátodo, para redistribuir la densidad de corriente.
  - Fuentes de corriente pulsante o con inversión de polaridad, para refinar la estructura del depósito metálico.
  - Operación en condiciones de vacío, para eliminar defectos ligados a la evolución gaseosa o a la contaminación superficial.

Estos sistemas permiten una electrodeposición muy controlada [145], lo que convierte al electroconformado en una tecnología especialmente adecuada para aplicaciones que requieren tolerancias estrictas y miniaturización de componentes, siendo en algunos casos la única alternativa técnica y económicamente viable [144]. Un ejemplo destacado es el estudio de Ryu et al. [169], en el que se replicó con alta fidelidad la textura jerárquica de pétalos de rosa, conocidos por su comportamiento superhidrofóbico (véase Figura 2.31). El proceso consistió en la creación de moldes negativos de poliuretano acrilato (PUA) a partir de pétalos reales, sobre los cuales se depositaron capas semilla de níquel mediante evaporación por haz de electrones. Posteriormente, se realizó un electroconformado de níquel que dio lugar a réplicas metálicas con monocapas autoensambladas, obteniendo superficies con adhesión selectiva y repelencia al agua. Esta misma metodología fue aplicada a la fabricación de moldes para litografía por nanoimpresión, utilizando resinas especiales como el PFPE, logrando así una reproducción estructural jerárquica de alta fidelidad [170,171].

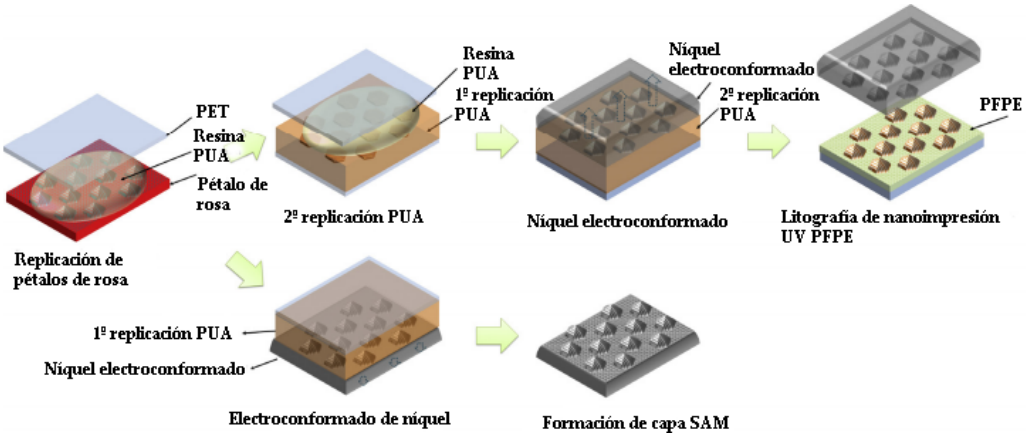


Figura 2.31. Esquema del proceso de replicación de la estructura jerárquica. Obtenido de [169].

De igual forma, Du [172] analizó el efecto de la corriente pulsada inversa sobre la uniformidad de las estructuras, mientras que Li [173] exploró la aplicación del electroconformado bipolar en la fabricación de moldes microópticos asféricos. Por otra parte, Ming et al. [166] lograron la fabricación de tamices metálicos con altos porcentajes de área abierta, y otros autores han desarrollado engranajes y moldes bicapa con gran resistencia al desgaste y mínima deformación [174].

Además, el microelectroconformado se ha posicionado como una tecnología clave en la producción de sistemas microelectromecánicos (MEMS). Tecnologías como LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung), EFAB (Electrochemical Fabrication) o LECD (Laser Electrochemical Deposition) hacen uso intensivo del electroconformado para la generación de estructuras tridimensionales de alta precisión y complejidad en micromecanismos, sensores y dispositivos integrados [142,175–179].

En definitiva, el microelectroconformado se consolida como una técnica esencial dentro del ecosistema de la micro y nanofabricación, permitiendo abordar con éxito retos de precisión, funcionalidad y escalabilidad en contextos donde otras tecnologías presentan limitaciones. Su versatilidad, capacidad de adaptación y evolución continua lo convierten en una herramienta estratégica para la innovación en ingeniería de superficies y fabricación de dispositivos funcionales avanzados.

2.3.3. Mecanizado por descarga eléctrica (SEDM)

El mecanizado por descarga eléctrica, conocido internacionalmente como EDM (Electrical Discharge Machining), es uno de los métodos de eliminación de material más representativos dentro del conjunto de procesos no convencionales, como se ilustra en la Figura 2.32. A diferencia de los métodos tradicionales, los procesos no convencionales han surgido para dar respuesta a los desafíos asociados al mecanizado de materiales de difícil maquinabilidad, así como a la necesidad de obtener formas complejas, tolerancias estrechas y acabados superficiales de alta calidad, en condiciones donde los métodos convencionales resultan insuficientes [149].

Entre las características comunes de este tipo de procesos se encuentran: un elevado consumo energético por volumen de material eliminado, bajas tasas de arranque de material (expresadas habitualmente en mm^3/min), y la capacidad de generar geometrías de alta complejidad funcional. En este contexto, la electroerosión por penetración, variante a trabajar en esta tesis, adquiere especial interés por su idoneidad en la creación de superficies texturizadas funcionales [149].

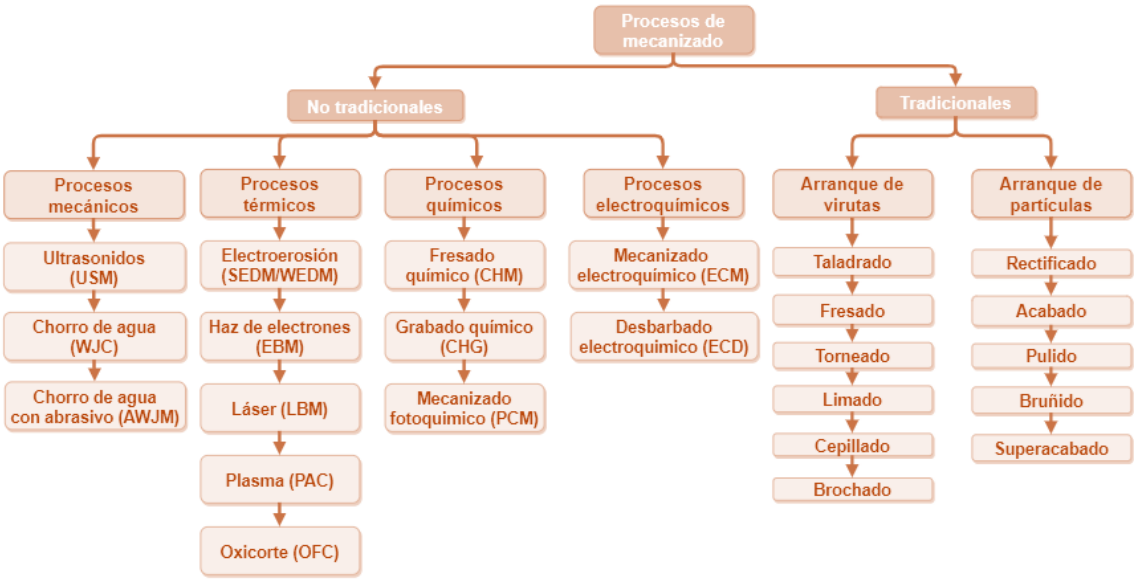


Figura 2.32. Clasificación procesos convencionales y procesos no convencionales.

El proceso EDM ha sido ampliamente adoptado en la industria debido a su capacidad de mecanizar materiales conductores de alta dureza con una precisión considerable, sin requerir contacto físico entre herramienta y pieza. Este último aspecto es especialmente relevante, ya que elimina la posibilidad de tensiones mecánicas, vibraciones o deformaciones que podrían producirse en procesos tradicionales. La energía térmica es el principio fundamental del EDM, y se aplica de forma localizada a través de una serie de descargas eléctricas controladas, que erosionan el material en pequeñas cavidades, generando así la forma deseada [180].

La creciente relevancia científica y tecnológica del EDM queda reflejada en el aumento exponencial del número de publicaciones científicas relacionadas. Según datos obtenidos a través de la base de datos Web of Science (hasta 2024), el volumen de investigaciones en torno a esta técnica ha mostrado un crecimiento constante, superando las 1100 publicaciones en el año 2022 (Figura 2.33).

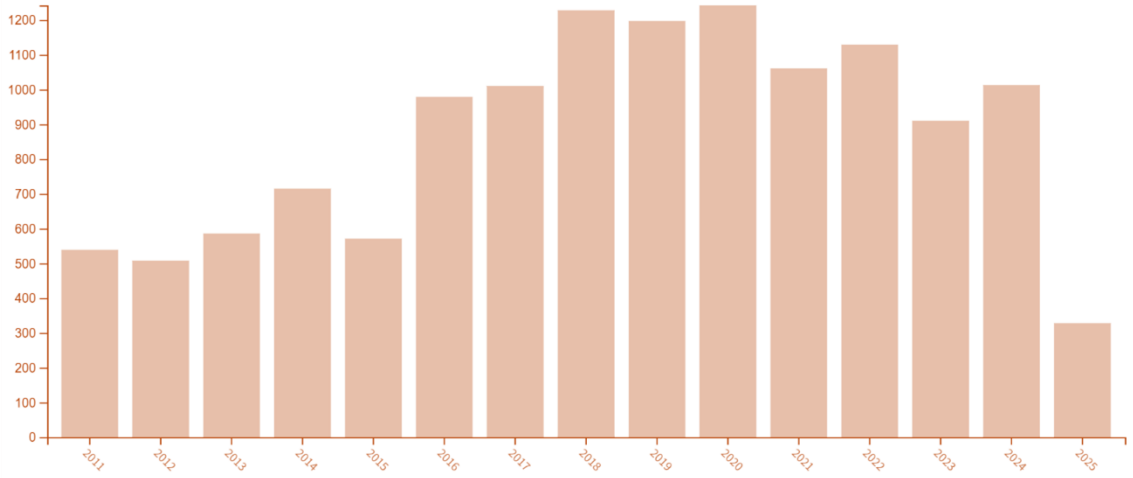


Figura 2.33. Número de publicaciones de EDM a lo largo de los últimos años [181].

En cuanto a su distribución por áreas temáticas, destaca el predominio de la ingeniería, con el mayor número de publicaciones, principalmente dentro del ámbito de la Ingeniería de Fabricación (Figura 2.34). Este hecho no resulta sorprendente, ya que el EDM proporciona soluciones eficaces ante problemas de mecanizado asociados a materiales termo-resistentes, superaleaciones o componentes con requisitos dimensionales y funcionales extremos.

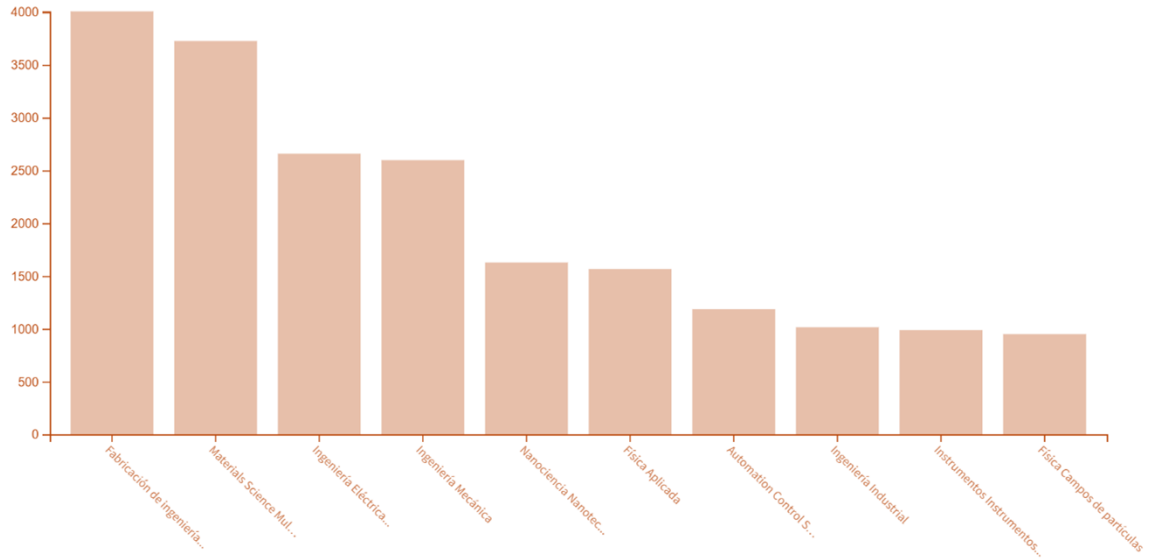


Figura 2.34. Número de publicaciones sobre EDM en los diferentes campos de aplicación [181].

Dos son las propiedades técnicas que distinguen a la electroerosión claramente de otros métodos de mecanizado no convencionales [182]:

- Independencia de las propiedades mecánicas del material: El EDM no se ve afectado por la dureza, resistencia o ductilidad del material base, sino que depende exclusivamente de sus

propiedades eléctricas y térmicas. Esto lo convierte en un proceso ideal para mecanizar aleaciones metálicas de difícil maquinabilidad.

- Capacidad para generar geometrías complejas: Gracias a la reproducción directa de la forma del electrodo sobre la pieza de trabajo, es posible crear cavidades o detalles que serían inviables mediante herramientas de corte convencionales. La alta precisión y la calidad del acabado permiten que se logre una reproducción fiel de la forma del electrodo.

2.3.3.1. Fundamentos del proceso

Su principio de funcionamiento se basa en el uso de energía térmica generada por una serie de descargas eléctricas controladas entre un electrodo y una pieza de trabajo conductora, independientemente de la dureza del material a mecanizar [180].

Una de las ventajas más destacadas del EDM es su versatilidad. Por ejemplo, en aplicaciones de perforación, se pueden realizar agujeros con diámetros desde 0,3 hasta 6 mm, e incluso se han logrado resultados precisos utilizando electrodos tan delgados como 0,1 mm sobre superficies curvas con inclinaciones pronunciadas [180].

El sistema EDM está compuesto principalmente por una máquina herramienta que posiciona y desplaza el electrodo, y una fuente de alimentación encargada de generar las descargas eléctricas de alta frecuencia. Estas chispas provocan la remoción del material de la pieza mediante fusión y vaporización localizada [183]. Tanto el electrodo como la pieza de trabajo están sumergidos en un fluido dieléctrico, y la distancia entre ambos, conocida como *gap,* es uno de los parámetros críticos del proceso. La Figura 2.35 muestra un esquema general del proceso de electroerosión por penetración (SEDM), variante que se trabajará en esta Tesis.

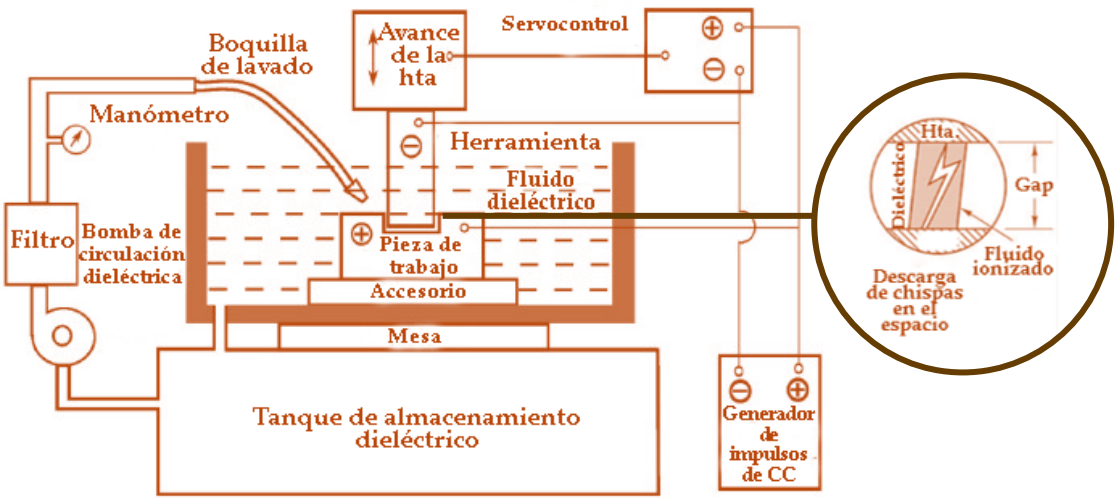


Figura 2.35. Esquema del funcionamiento del proceso EDM [184].

Durante el funcionamiento, el *gap* debe mantenerse dentro de un rango muy estrecho, aproximadamente entre 0,01 y 0,05 mm, para asegurar que se produzcan las descargas sin que se establezca contacto físico entre las superficies [182,185]. Un espacio excesivo impediría la generación de descargas, mientras que una separación insuficiente podría causar cortocircuitos, transferencia indeseada de material e incluso degradación del electrodo [186,187].

El ciclo de mecanizado EDM se compone de una serie de etapas sucesivas:

1. **Ionización del dieléctrico**: Cuando la tensión aplicada supera la rigidez dieléctrica del fluido, se inicia la ionización del medio: los electrones libres acelerados por el campo eléctrico colisionan con las moléculas del dieléctrico, generando un plasma conductor. Esta etapa marca el comienzo efectivo de la descarga: el canal de plasma permite el flujo de corriente entre los electrodos. En este momento, la tensión comienza a descender y la intensidad de corriente aumenta rápidamente [4].

2. **Inicio de la chispa**: Durante la descarga, se produce una transferencia intensa de energía en un área muy localizada. La temperatura en el canal de descarga puede superar los 10.000 °C, lo que induce la fusión y vaporización del material de la pieza (y en menor medida del electrodo). El volumen de material afectado depende de parámetros como la duración del pulso, la intensidad de corriente y la energía almacenada en el sistema.

3. **Expansión del canal de plasma**: Simultáneamente, la elevada temperatura provoca la generación de una burbuja de gas alrededor del canal de plasma. Esta burbuja (o esfera de gas) se expande rápidamente debido a la presión interna generada por la vaporización.

4. **Eliminación de material**: En este momento se forma un cráter de erosión en la superficie de la pieza, con un perfil hemisférico característico. Parte del material expulsado se solidifica en pequeñas esferas (virutas) dentro del dieléctrico.

5. **Implosión y evacuación**: Una vez completado el pulso, se interrumpe la corriente. La burbuja de gas pierde estabilidad y colapsa rápidamente (implosiona), lo que provoca una violenta circulación del dieléctrico hacia la zona erosionada. Este fenómeno ayuda a expulsar los residuos metálicos fundidos y evita su redeposición sobre la pieza. El flujo del dieléctrico elimina las partículas sólidas (virutas) y renueva el volumen de fluido entre los electrodos. Esta renovación es esencial para restablecer las condiciones dieléctricas iniciales y permitir el inicio de una nueva descarga. Si el material no se evacúa correctamente, puede producirse cortocircuito o erosión no controlada.

6. **Formación de viruta**: El material eliminado se solidifica en forma esférica y es arrastrado por el fluido dieléctrico, constituyendo la "viruta" característica del proceso EDM (Figura 2.36).

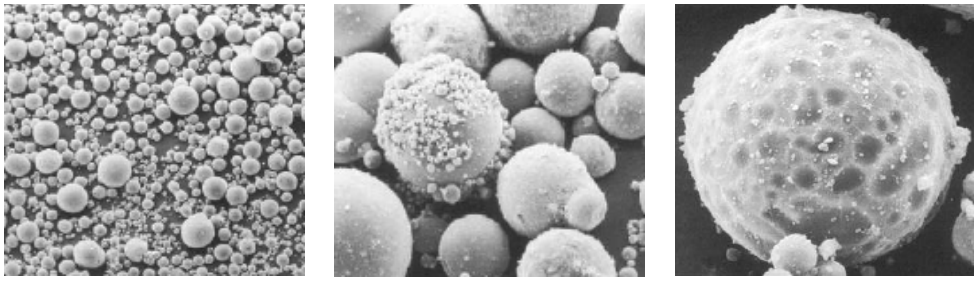


Figura 2.36. "Viruta" del proceso de electroerosión.

7. **Repetición del ciclo**: Una vez evacuado el material, el sistema vuelve a aplicar tensión, repitiendo el ciclo en un punto próximo. Mediante un control preciso del avance del electrodo y de los parámetros eléctricos, se obtiene gradualmente la geometría deseada en la pieza de trabajo.

Este ciclo se repite miles de veces por segundo durante todo el proceso de mecanizado. La suma de microcráteres generados tras cada descarga da lugar a la cavidad final. La combinación de alta temperatura localizada, ausencia de contacto físico y control preciso convierte al EDM en una técnica excepcionalmente eficaz para mecanizar materiales de alta dureza y geometrías complejas, con

tolerancias ajustadas y acabados de calidad. A modo de resumen en la Figura 2.37 se ilustran todas las fases descritas previamente de forma conjunta para así ver su evolución.

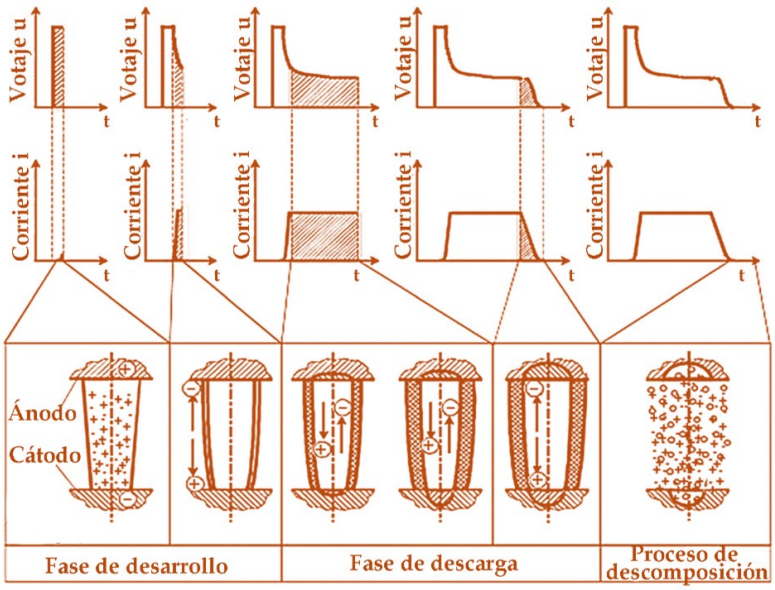


Figura 2.37. Resumen del proceso de una descarga eléctrica y el comportamiento de V e I [188].

Para analizar y optimizar este proceso es esencial conocer los principales parámetros operativos que lo gobiernan. Estos pueden clasificarse en parámetros variables y constantes, y su combinación define el comportamiento térmico, eléctrico y geométrico de la descarga [189,190]:

- **Tiempo de encendido del pulso (t_i)**: Corresponde a la duración (en µs) en la que la corriente circula entre los electrodos. La energía transferida al material es proporcional a este tiempo, influenciado también por la intensidad máxima de corriente.
- **Tiempo de apagado del pulso (t_0)**: Es el intervalo entre dos pulsos consecutivos. Permite la solidificación y evacuación del material fundido. Si es demasiado corto, puede generar inestabilidad en las descargas.
- **Distancia de arco (GAP)**: Representa el espacio entre el electrodo y la pieza. Es crucial mantenerla en el rango adecuado para permitir la descarga sin contacto físico.
- **Ciclo de trabajo**: Expresa el porcentaje de tiempo en que el sistema está activo respecto al ciclo completo. Se calcula como t_i / (t_i + t_0), y es indicativo de la eficiencia del proceso.
- **Intensidad de corriente (I_f)**: Es la cantidad de energía suministrada por el generador, medida en amperios. Influye directamente en la profundidad del cráter y la tasa de erosión.
- **Frecuencia de pulsación**: Número de ciclos (encendido/apagado) que ocurren por unidad de tiempo. Está relacionada con la rapidez del mecanizado y la estabilidad del arco.
- **Voltaje**: Magnitud del potencial eléctrico aplicado en el sistema. Afecta la formación del canal de plasma y la distribución de energía.
- **Polaridad**: Dirección del flujo de corriente entre el electrodo y la pieza. La configuración influye en el desgaste relativo de ambos componentes.

La Figura 2.38 presenta gráficamente estos parámetros y su interacción durante el ciclo de mecanizado.

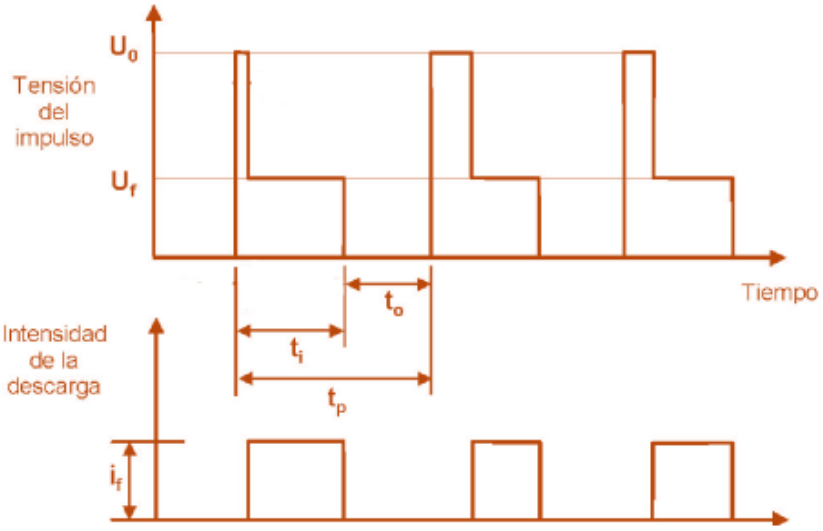


Figura 2.38. Parámetros de EDM.

2.3.3.2. Electrodo

La fabricación del electrodo constituye uno de los aspectos más relevantes y costosos del proceso SEDM. Según diversos estudios, el coste y el tiempo invertido en la producción del electrodo pueden representar más del 50% del total del mecanizado[191]. Actualmente, los electrodos se fabrican principalmente mediante fresado CNC, lo que permite obtener geometrías complejas con alta precisión [192].

No obstante, cuando un molde requiere múltiples cavidades, es frecuente la necesidad de fabricar un electrodo específico para cada una de ellas, lo que implica una producción secuencial [193]. La posibilidad de disponer de dos electrodos complementarios, uno para el desbaste inicial y otro para el acabado final, permite optimizar tanto el tiempo como la calidad del mecanizado. Este enfoque también minimiza el desgaste de los electrodos más finos y detallados.

- **Materiales de los electrodos**

Los materiales más utilizados en la fabricación de electrodos son el grafito, el cobre y, en menor medida, el latón [194]. En el entorno industrial europeo, más del 90% de los electrodos se elaboran a partir de grafito, debido a sus ventajas frente al cobre, que anteriormente fue el material más extendido [195]. Entre las propiedades que justifican el uso predominante del grafito se encuentran:

- Facilidad de mecanizado.
- Buena resistencia mecánica y térmica.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Alta conductividad eléctrica.
- Bajo coste relativo y disponibilidad en grandes formatos.

Además, el grafito puede ser mecanizado rápidamente, con un rendimiento de hasta cinco veces superior al cobre. También posee una densidad cinco veces menor, lo que facilita su manipulación. Puede emplearse tanto para fabricar electrodos tipo macho como hembra, es decir, inversos o directos respecto a la geometría deseada [195]. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 2.39.

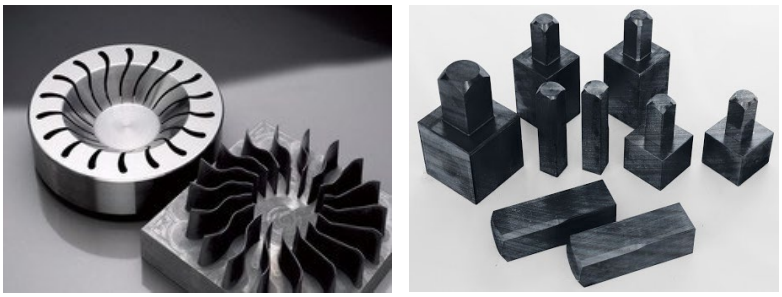


Figura 2.39. Electrodos de grafito.

El cobre, por su parte, sigue siendo un material de referencia para aplicaciones de alta precisión. Su alta conductividad térmica permite una rápida disipación del calor, lo que minimiza el desgaste y mejora la fidelidad del mecanizado. Es especialmente útil para perforaciones profundas o de pequeño diámetro, como las necesarias en procesos previos a la electroerosión por hilo (EDM Wire) [186,187]. Aunque puede resultar más económico en estado bruto que el grafito y es reciclable, su mecanizado es más lento (véase Figura 2.40).



Figura 2.40. Electrodos de cobre.

- **Polaridad del electrodo**

La polaridad se refiere al sentido del flujo de corriente entre electrodo y pieza. Puede configurarse como directa (el electrodo actúa como cátodo) o inversa (el electrodo es ánodo) [194,196]. La elección depende del material de trabajo y del tipo de electrodo. En general, los electrodos de grafito ofrecen mejor rendimiento con polaridad positiva en términos de desgaste, mientras que la polaridad negativa favorece una mayor velocidad de mecanizado.

La polaridad también influye cuando ambos electrodos son del mismo material: el electrodo en posición positiva suele presentar menor desgaste. Además, el comportamiento térmico de los materiales (punto de fusión y conductividad térmica) condiciona la elección de la combinación óptima. Con una optimizada selección de los parámetros operativos y en condiciones muy específicas se pueden alcanzar relaciones de desgaste inferiores a 0,5 mm^3 por cada 100 mm^3 eliminados del otro electrodo [197,198].

- **Desgaste del electrodo**

El desgaste del electrodo está estrechamente relacionado con varios factores, como la intensidad de corriente, el tiempo de pulso, la polaridad y la difusividad térmica del material. En EDM, tanto la pieza como el electrodo actúan como electrodos opuestos, lo que implica que ambos sufren erosión durante el proceso [182,199].

Se identifican principalmente cuatro tipos de desgaste en los electrodos [200]:

- desgaste longitudinal
- desgaste de la esquina
- desgaste volumétrico
- desgaste lateral

Es por ello que se han llevado a cabo diversas investigaciones para mitigar su efecto. Mohri, sugiere que parte del desgaste se debe a la precipitación de carbono del dieléctrico hidrocarbonado sobre la superficie del electrodo, especialmente en zonas con menor accesibilidad [201]. Basándose en este principio, Marafona y Wykes [202], desarrollaron una técnica para generar una capa inhibidora de desgaste sobre el electrodo, ajustando los parámetros de descarga antes del mecanizado. Aunque esta capa mejora el TWR (Tasa de desgaste del electrodo), su impacto sobre el MRR (Tasa de eliminación de material) es limitado.

Diversos autores han analizado el comportamiento del desgaste en función de materiales de trabajo, geometrías y condiciones operativas. Por ejemplo, A. Torres [203] estudió el mecanizado de TiB_2 con electrodos de cobre y evidenció que el tiempo de pulso afecta al TWR, mientras que la intensidad de corriente influye en la rugosidad y la tasa de eliminación de material. Barenji [204] y otros autores han ratificado que los parámetros eléctricos determinan significativamente el rendimiento del proceso.

Además, se han propuesto estrategias de movimiento del electrodo para mejorar la eficiencia. Kumar [205] planteó movimientos helicoidales y radiales, destacando que una órbita radial reduce el TWR. La estrategia más común es el movimiento orbital del electrodo, que compensa el desgaste y mejora la precisión geométrica.

Estudios como el de Joudivand Sarand y Shabgard [199], han demostrado que la difusividad térmica influye directamente en el desgaste, observándose una reducción del TWR a medida que aumenta este coeficiente.

Con relación al fluido dieléctrico, el uso de agua desionizada puede reducir el desgaste, aunque conlleva riesgo de erosión electrolítica excesiva. Q. Yin propuso un nuevo electrolito de mayor conductividad, logrando reducir la degradación del electrodo [206].

Otra línea de investigación explora el uso de recubrimientos superficiales sobre los electrodos, que incrementan el coste pero pueden mejorar el rendimiento global del proceso [207]. También se han desarrollado modelos de simulación como el de Dauw, que permiten predecir el desgaste geométrico del electrodo en función de MRR, TWR y spark gap [208].

2.3.3.3. Tolerancias y acabados superficiales

Las tolerancias dimensionales adquieren especial relevancia en componentes destinados a ensamblajes o aplicaciones funcionales donde se requiere un ajuste preciso entre piezas. En cambio, superficies no funcionales pueden tolerar mayores variaciones sin comprometer el funcionamiento [23]. En el contexto del mecanizado por descarga eléctrica, se pueden lograr unas tolerancias ±0,005 mm en la variante SEDM y en la variante por hilo (WEDM), reconocida por ofrecer una de las mayores precisiones, se alcanzan valores de hasta ±0,001 mm en condiciones óptimas. Sin embargo, la precisión real del proceso depende de múltiples factores, como el material de la pieza, el acabado requerido y el tiempo de mecanizado disponible [209,210].

El proceso EDM se basa en la aplicación de pulsos eléctricos de corta duración y alta energía, con tiempos típicos entre 2 y 2000 µs. Estos pulsos generan temperaturas extremadamente elevadas (entre 8000 y 12.000 °C, pudiendo superar los 20.000 °C) en una región muy localizada, lo que provoca la fusión y vaporización del material. Debido a la corta duración del pulso, el calor no se

disipa hacia el interior de la pieza, generando microcráteres que constituyen la característica principal del acabado superficial del EDM (Figura 2.41) [180].



a) b) c)

Figura 2.41. Formación de cráteres: a) y b) en una sola descarga; c)en múltiples descargas.

La eliminación de material no se produce mediante corte mecánico, sino a través de procesos térmicos. En cada descarga, se elimina un volumen de material del orden de 10^{-6} a 10^{-4} mm^3, y las MRR varían entre 1 y 400 mm^3/min dependiendo de las condiciones del proceso. Dado que el electrodo define el área de erosión, el EDM es considerado un proceso de replicación donde la forma del electrodo se transfiere fielmente a la pieza [211].

Respecto a la calidad superficial, el mecanizado por EDM da lugar a una microestructura superficial compuesta por tres capas: una capa blanca o de refundición, una zona afectada por el calor (HAZ) y el material base no alterado (Figura 2.42). La capa blanca suele presentar una dureza mayor que la del material original, producto de los cambios metalúrgicos inducidos por el proceso. La HAZ, por su parte, incrementa su espesor con la energía de la descarga, aunque no presenta fusión [212,213].

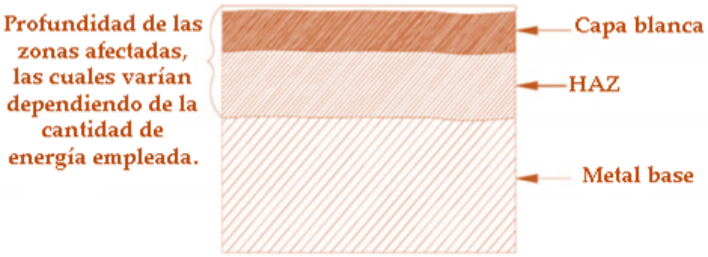


Figura 2.42. Zonas afectadas por el proceso EDM.

Al igual que en el mecanizado convencional, existe una relación inversa entre la rugosidad superficial y la velocidad de mecanizado. Para obtener mejores acabados, es necesario reducir la energía de los pulsos, lo que implica mecanizar a menor velocidad. Una pasada de desbaste puede generar un acabado de entre 1,5 y 3 µm de Ra, mientras que la aplicación de tres pasadas de acabado puede reducirlo hasta aproximadamente 0,31 µm. En casos específicos, es posible alcanzar valores cercanos a 0,1 µm de Ra, especialmente en materiales densos como el carburo de tungsteno [213].

Esta secuencia de pasadas también permite evitar operaciones secundarias como el rectificado. El EDM se convierte así en una alternativa viable cuando procesos como el fresado o torneado no cumplen los requisitos de precisión, geometría o acabado. Aunque el tiempo de mecanizado es mayor, el EDM puede ofrecer ventajas económicas gracias a su capacidad para generar geometrías complejas en una sola configuración, eliminando la necesidad de herramientas especiales o procesos múltiples [214].

2.3.3.4. Capacidades y limitaciones

En aplicaciones que requieren formas internas complejas, esquinas de radios reducidos o cavidades profundas, el EDM destaca por encima de otros métodos. La versión por hilo permite generar paredes delgadas y contornos muy ajustados con hilos de hasta 0,2 mm de diámetro, mientras que el EDM por penetración puede producir agujeros ciegos de alta relación longitud-diámetro [215,216].

Una ventaja adicional del EDM es que la dureza del material no afecta significativamente la velocidad de mecanizado, lo que lo hace ideal para aleaciones difíciles como acero para herramientas, Inconel o carburo de tungsteno [262,264]. En situaciones donde las geometrías son complejas y el mecanizado convencional resulta lento o costoso, el EDM puede ofrecer una mejor relación coste-beneficio [215,217].

Por ejemplo, no requiere utillajes especiales y puede eliminar operaciones adicionales como pulido o ajuste. No obstante, sus limitaciones incluyen tasas de arranque de material inferiores y dependencia de propiedades térmicas del material como la conductividad y el punto de fusión. Estos factores afectan directamente al rendimiento del proceso y deben ser considerados en la planificación [215].

2.3.3.5. µ - EDM

La tendencia global hacia la miniaturización de componentes ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas como la microelectroerosión (µ-EDM), especialmente orientadas a la fabricación de microcaracterísticas y dispositivos funcionales en sectores como la industria, la aeronáutica y, más recientemente, la medicina [218]. Gracias a su alta precisión y a la capacidad de generar cavidades tridimensionales complejas, el proceso µ-EDM permite la fabricación de microcomponentes como microejes de hasta 5 µm de diámetro, microboquillas, micropernos y cavidades con geometrías complejas [219–222].

Entre sus principales ventajas destaca el uso de fuerzas de mecanizado extremadamente bajas y una excelente repetibilidad, lo que convierte al µ-EDM en una de las tecnologías más eficaces para la producción de microcaracterísticas con altas relaciones de aspecto. Actualmente, se distinguen tres variantes principales dentro de la tecnología µ-EDM [223]:

- **µ-EDM con electrodo de forma**: utiliza un electrodo con microcaracterísticas específicas para reproducir, por erosión, su forma negativa sobre la pieza de trabajo. Esta técnica es ideal para generar microtexturizados superficiales.
- **Perforación por µ-EDM**: emplea microelectrodos con diámetros de entre 5 y 10 µm para crear microagujeros con alta precisión.
- **Fresado por µ-EDM**: basado en el movimiento controlado de microelectrodos para generar cavidades tridimensionales mediante trayectorias similares a las del fresado convencional.

Para evaluar la eficacia del proceso µ-EDM, se emplean diversos indicadores técnicos que permiten analizar tanto la productividad como la calidad del mecanizado [224]. Además de los parámetros comunes al EDM convencional, como la tasa de arranque de material, la tasa de desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial, el desgaste másico y el tiempo de mecanizado, en µ-EDM se incorporan otros criterios específicos debido a las reducidas dimensiones de las microcaracterísticas:

- **Sobredimensionado**: diferencia entre el diámetro de entrada del microagujero generado y el diámetro del electrodo. Este parámetro refleja las desviaciones dimensionales debidas al efecto de la descarga y a la geometría del electrodo.
- **DVEE (Desviación de Diámetro en Entrada y Salida)**: diferencia entre los diámetros medidos en la entrada y salida del microagujero. Este valor está condicionado por

parámetros como la duración del pulso, la corriente máxima, el ciclo de trabajo y la presión de descarga.

- **Defecto de forma o geométricos**: una presión excesiva del dieléctrico puede inducir vibraciones en el electrodo, reduciendo la precisión y afectando negativamente a la forma debido a la reducida dimensión de algunas herramientas.

- **Principales desafíos del proceso µ-EDM**

A pesar de su potencial demostrado, la implementación industrial del µ-EDM aún es limitada, debido principalmente a problemas relacionados con la fiabilidad de las máquinas herramienta, la manipulación de microcomponentes y la falta de sistemas CAM adaptados a microfabricación (Figura 2.43).

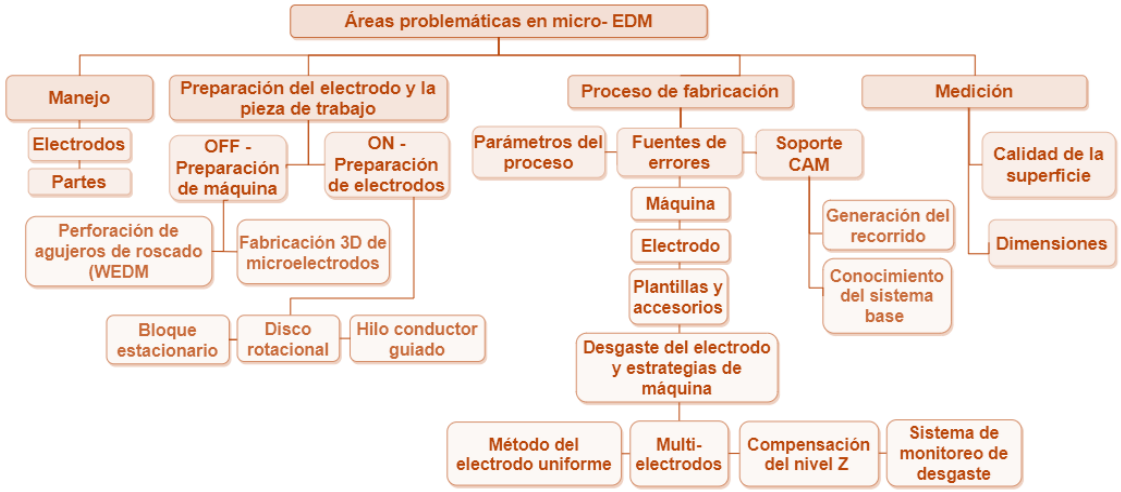


Figura 2.43. Áreas problemáticas en el µ-EDM.

En lo que respecta a la manipulación y preparación, en el caso del WEDM, la reducción del diámetro del hilo ha incrementado los problemas de manipulación, como la rotura del cable o la dificultad en su colocación, lo que requiere intervenciones manuales y tiempos de preparación elevados. En el caso del SEDM, se hace necesaria la incorporación de dispositivos auxiliares como guías para electrodos, especialmente cuando se manejan piezas de dimensiones muy reducidas, que además corren el riesgo de extraviarse en el tanque de trabajo [223].

Para la preparación del electrodo y la pieza de trabajo, se requiere compensaciones precisas por el efecto de la chispa, lo cual reduce aún más el tamaño de las características esperadas y puede dificultar la reproducción fiel de la geometría. En WEDM, los orificios de inserción del hilo constituyen otro desafío significativo [223].

La planificación requiere una especial atención debido a las dimensiones reducidas y las tolerancias estrictas implicadas. Los errores acumulativos pueden surgir tanto por limitaciones del equipo como por la aleatoriedad inherente al proceso térmico. La falta de conocimiento profundo sobre el comportamiento de parámetros como la MRR, el TWR o la calidad superficial, ha dificultado el desarrollo de modelos predictivos y sistemas de planificación automatizada [180,225].

Pese a la evolución de los controles CNC y la automatización de máquinas EDM, los sistemas CAM actuales no están adaptados al fresado por µ-EDM, especialmente en la generación de trayectorias para geometrías tridimensionales complejas. Esta deficiencia constituye una de las barreras más importantes para su adopción industrial a gran escala.

De igual forma, no existen todavía métodos estandarizados para evaluar con precisión la rugosidad superficial ni para estimar el espesor de la capa de refundición o la HAZ, ambas críticas para las

propiedades funcionales del componente. Además, es fundamental poder realizar mediciones in situ durante el proceso, ya que extraer y reinsertar las piezas en la máquina puede generar errores significativos de reposicionamiento [223].

Aunque el µ-EDM ofrece un potencial inmenso para la microfabricación, especialmente en la producción de texturizados superficiales de alta precisión, su consolidación tecnológica requiere resolver importantes desafíos técnicos y metodológicos.

2.3.3.6. Diferencias entre EDM y µ-EDM

Aunque el fundamento físico de ambos procesos es similar, existen diferencias sustanciales en cuanto a parámetros operativos, escalas de trabajo y comportamiento del canal de plasma. La Tabla 2.9 resume algunas de las principales diferencias [225,226].

Tabla 2.9. Comparativa entre EDM y µ-EDM [225,226].

Parámetros	µ-EDM	EDM
Tamaño herramienta	≤ 999 µm	≥ 999 µm
Espacio entre electrodos	≤ 10 µm	10 – 500 µm
Tensión de circuito abierto	10 – 120 V	4 – 400 V
Corriente de pico	≤ 3 A	> 3 A
Tiempo de pulso	50 ns – 100 µs	0,5 – 8 ms
Energía específica	Baja	Alta

La diferencia más significativa entre ambos procesos radica en la escala relativa entre el canal de plasma y el tamaño del electrodo. En µ-EDM, el canal de plasma tiene dimensiones comparables al electrodo, mientras que en EDM convencional, el canal es mucho menor que la herramienta. Además, en µ-EDM la energía de descarga debe ser cuidadosamente controlada, ya que un exceso puede provocar daños en la herramienta.
Otros factores como la presión del dieléctrico, la extracción de residuos y el espaciado entre electrodos también presentan limitaciones específicas en µ-EDM debido al menor tamaño de los componentes y a la menor rigidez estructural del electrodo [224].

2.4. Fabricación de electrodos para SEDM combinando MSLA y electroforming

Este apartado se enfoca en el análisis comparativo de procesos empleados en la fabricación de electrodos utilizados en procesos de mecanizado por SEDM, a través de la combinación de las diferentes tecnologías descritas previamente. El objetivo principal es evaluar de manera crítica las ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas de cada tecnología, con el fin de establecer una base técnica sólida que sustente la propuesta metodológica de esta investigación.

El proceso SEDM es ampliamente empleado en la fabricación de cavidades complejas para moldes y matrices, siendo la producción del electrodo una etapa crítica en términos de tiempo y costo. Los plazos de entrega para herramientas de moldeo pueden oscilar entre 4 y 12 semanas, con costos variables que incrementan la presión sobre la industria para adoptar métodos más ágiles y rentables. En este escenario, el electroforming surge como una alternativa de alto potencial, ya que permite replicar geometrías complejas con alta precisión y en plazos de tiempo competitivos.

2.4.1. Marco existente

Para identificar estudios relacionados con esta temática, se realizó una revisión sistemática en las principales bases de datos académicas, como *Web of Science* y *Scopus* (ver Tabla 2.10), con el propósito de analizar el impacto, las tendencias y otros aspectos relevantes en el uso de tecnologías avanzadas en la fabricación de electrodos. Aunque la literatura existente respalda el uso de técnicas

de fabricación aditiva para la producción de electrodos, cuando la búsqueda se limita a nuestro caso de estudio específico, los resultados muestran una notable escasez de investigaciones que combinen estas tecnologías. En particular, no se identificaron estudios que aborden el empleo de microtexturas en los electrodos, ya que los artículos encontrados en *Scopus* sobre RP y AM se refieren, en su mayoría, al texturizado generado directamente por el proceso EDM. Esta ausencia de literatura específica destaca la originalidad y la novedad del presente trabajo.

Tabla 2.10. Comparativa de bases de datos empleando las palabras claves del estudio.

Palabras clave	Publicaciones	
	SCOPUS	WOS
EDM	18381	17404
Electrical discharge machining	6824	10286
SEDM	131	104
EDM **AND** electrode	4991	4022
EDM electrode	241	97
Electroforming	3891	3132
EDM **AND** electrode **AND** electroforming	264	21
EDM electrode **AND** electroforming	107	27
EDM electrode **AND** electroforming **AND** rapid prototyping	75	11
EDM electrode **AND** electroforming **AND** additive manufacturing	30	1
EDM electrode **AND** electroforming **AND** rapid prototyping **AND** additive manufacturing	27	0
EDM electrode **AND** electroforming **AND** rapid prototyping **AND** Texturing	7	0
EDM electrode **AND** electroforming **AND** additive manufacturing **AND** texturing	4	1

- **Investigación del estado del arte aplicando IA**

Para profundizar en el análisis de la información y superar la limitada disponibilidad de literatura específica en esta área, se ha implementado una estrategia de revisión asistida por herramientas de inteligencia artificial (IA). La aplicación de IA en la investigación científica se ha consolidado como un recurso estratégico que no solo permite una búsqueda más rápida y precisa, sino también la identificación de relaciones complejas entre autores, conceptos y áreas de estudio que podrían pasar desapercibidas con métodos convencionales. Esta capacidad resulta especialmente valiosa en campos emergentes o con escasa literatura consolidada, ya que las herramientas de IA amplían el alcance de la búsqueda, detectan patrones de investigación e integran información dispersa, ofreciendo así un panorama completo y estructurado del tema. En esta revisión se han empleado diversas herramientas avanzadas de IA:

a. **Connected Papers:** Esta herramienta permite ingresar el título o DOI de un artículo clave, generando un mapa visual de conexiones entre publicaciones relacionadas [227]. Dicho mapa facilita la identificación de vínculos temáticos y organiza las investigaciones existentes. En este estudio, se seleccionó el artículo de Yarlagadda et al. [228], como referencia, a partir del cual Connected Papers generó un mapa con el conjunto de investigaciones relacionadas que aportaron claridad y organización al proceso de revisión (véase Figura 2.44).

b. **Consensus:** Esta herramienta posibilita plantear preguntas específicas sobre el área de estudio, ofreciendo un listado jerarquizado de autores y publicaciones en función de la relevancia de las palabras clave empleadas [229]. Esto resulta particularmente útil para identificar tendencias actuales y destacar a los investigadores más relevantes, como se muestra en las Tablas 2.11 y 2.12.

Además, se realizaron pruebas complementarias con herramientas como Elcit y SciSpace [230,231], las cuales mostraron resultados consistentes al identificar los mismos autores y trabajos que las herramientas previamente mencionadas.

El uso combinado de estas herramientas de IA no solo valida el contenido identificado mediante la búsqueda manual, sino que también permite corroborar la consistencia de los datos. La coincidencia en los autores destacados y las publicaciones identificadas subraya la fiabilidad de estas técnicas, evidenciando que, aunque amplían el alcance de la revisión, no aportan datos contradictorios

respecto a la literatura ya conocida. Este nivel de consistencia refuerza el valor de la IA como herramienta de verificación y estructuración del conocimiento, optimizando así el proceso de revisión bibliográfica.

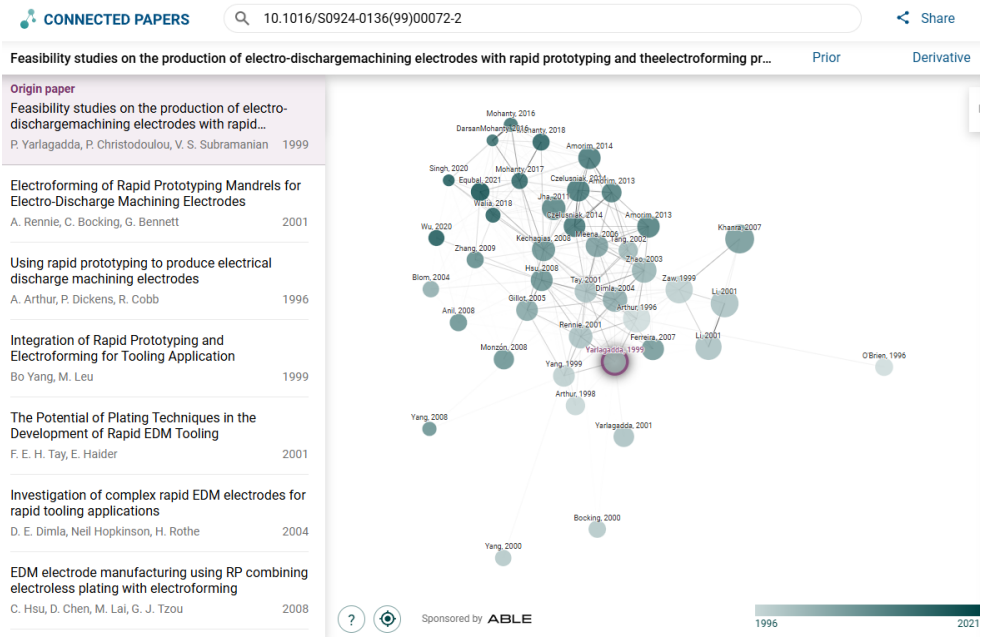


Figura 2.44. Mapa relacionando publicaciones que investigan el desarrollo de electrodos para SEDM.

Finalmente, es relevante destacar que la implementación de IA en revisiones bibliográficas ofrece beneficios adicionales, tales como la actualización continua de la información y una mejor accesibilidad a literatura en constante crecimiento. En un contexto de producción exponencial de literatura, estas herramientas se perfilan como elementos indispensables para gestionar grandes volúmenes de datos, reduciendo el sesgo de selección y acortando los tiempos de análisis.

Tabla 2.11. Resultados obtenidos en la búsqueda de electrodos electroconformados.

Consensus		
Palabras clave	**Titulo**	**Autor**
Stereolithography + Electroforming + EDM electrode	Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes	Arthur, A., Dickens, P., & Cobb, R. (1996)
	Wear & Failure Mechanisms for SL EDM Electrodes	Arthur, A., Dickens, P., Bocking, C., & Cobb, R. (1996)
	The measurement of heat distribution in stereolithography electrodes during electro-discharge machining	Arthur, A., & Dickens, P. (1998)
	Feasibility studies on the production of electro-dischargemachining electrodes with rapid prototyping and theelectroforming process	Yarlagadda, P., Christodoulou, P., & Subramanian, V. (1999)
	Integration of Rapid Prototyping and Electroforming for Tooling Application	Yang, B., & Leu, M. (1999)
	Electroforming of a Stereolithography Master Pattern for use as an Electro-Discharge Machine Electrode	Rennie, A., Bocking, C., & Bennett, G. (2000)
	Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications	Dimla, D., Hopkinson, N., & Rothe, H. (2004)
	EDM electrode manufacturing using RP combining electroless plating with electroforming	Hsu, C., Chen, D., Lai, M., & Tzou, G. (2008)
	Performance of copper-coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining (EDM)	Anil, D., & Çoğun, C. (2008)
	Study on the fabricated feasibility of electrodes in EDM using rapid prototyping (RP) and investment casting technology	Wu, Q., Wu, M., Hu, C., Hsu, C., Chang, T., & Tsao, C. (2020)

Tabla 2.12. Resultados obtenidos en la búsqueda de electrodos electroconformados microtexturizados.

Consensus		
Palabras clave	**Titulo**	**Autor**
Stereolithography + Electroforming + EDM electrode + Microtexturing	Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes	Arthur, A., Dickens, P., & Cobb, R. (1996)
	The measurement of heat distribution in stereolithography electrodes during electro-discharge machining	Arthur, A., & Dickens, P. (1998)
	Integration of Rapid Prototyping and Electroforming for Tooling Application	Yang, B., & Leu, M. (1999)
	Electroforming of a Stereolithography Master Pattern for use as an Electro-Discharge Machine Electrode	Rennie, A., Bocking, C., & Bennett, G. (2000)
	Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications	Dimla, D., Hopkinson, N., & Rothe, H. (2004)
	Performance of copper-coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining (EDM)	Anil, D., & Çoğun, C. (2008)
	EDM electrode manufacturing using RP combining electroless plating with electroforming	Hsu, C., Chen, D., Lai, M., & Tzou, G. (2008)
	Wear-resist Electrodes for Micro-EDM	Wang, Y., Zhao, F., & Jin, W. (2009)

En las secciones siguientes se analizarán los aspectos más relevantes identificados en la literatura, los cuales servirán de base y referencia para el desarrollo de esta investigación. Cabe destacar que la limitación en el número de estudios disponibles no refleja una falta de interés o validez en la temática, sino el carácter estratégico y competitivo que estas tecnologías representan en el ámbito industrial. Muchos de los procesos y combinaciones estudiadas permanecen protegidos o no son de acceso público debido a su alto valor competitivo; un ejemplo es el documento "Making EDM Electrodes by Stereolithography" de la NASA [232], cuyo contenido sigue siendo resguardado. Esta protección resalta la necesidad de utilizar métodos avanzados de revisión, como los ofrecidos por la IA, para explorar tanto la literatura disponible como las áreas de conocimiento aún inaccesibles y sus implicaciones tecnológicas en el desarrollo industrial.

2.4.2. Empleo de técnicas de fabricación rápida para generar electrodos EDM

Los primeros esfuerzos para fabricar electrodos SEDM a partir de prototipos o patrones desarrollados mediante técnicas de fabricación aditiva se realizaron paralelamente al avance de estas tecnologías. Inicialmente, debido a la prominencia de la estereolitografía en el campo de la FA, se utilizaron resinas de acrilato y epoxi producidas mediante SLA para crear electrodos SEDM, influyendo así en la evolución de otras técnicas. Actualmente, la investigación abarca un espectro más amplio de métodos FA, explorando nuevas formas de fabricar piezas modelo en materiales no conductores [250–252].

Desde inicios de la década de 1990, se han llevado a cabo múltiples esfuerzos para aplicar las pioneras tecnologías de fabricación aditiva y la tecnología de electroconformado en la fabricación de electrodos para SEDM, con el fin de hacer este proceso más económico [153,192,193,233]. Actualmente, estas tecnologías están orientadas a minimizar tanto los plazos de entrega como los costos en la fabricación de herramientas de producción [142,192].

La industria ha mostrado un gran interés en la fabricación rápida de electrodos, dado que las tecnologías actuales pueden representar entre el 25 % y el 30 % del tiempo total necesario para la producción de la pieza final. Sin embargo, existen desafíos específicos en el proceso EDM relacionados con el material del electrodo, el cual debe poseer características adecuadas para minimizar la tasa de desgaste del mismo y maximizar la tasa de eliminación de material. Además, debido a las elevadas temperaturas que se generan durante el mecanizado EDM, el material del electrodo debe contar con suficiente resistencia mecánica y un punto de fusión adecuado para reducir

el desgaste. La precisión dimensional y la textura superficial del electrodo son también factores críticos, ya que afectan la exactitud y calidad de la erosión por chispa en la pieza final. Por tanto, todos estos aspectos deben considerarse cuidadosamente en la fabricación del electrodo, tal como se muestra en la Figura 2.45 [183,192].

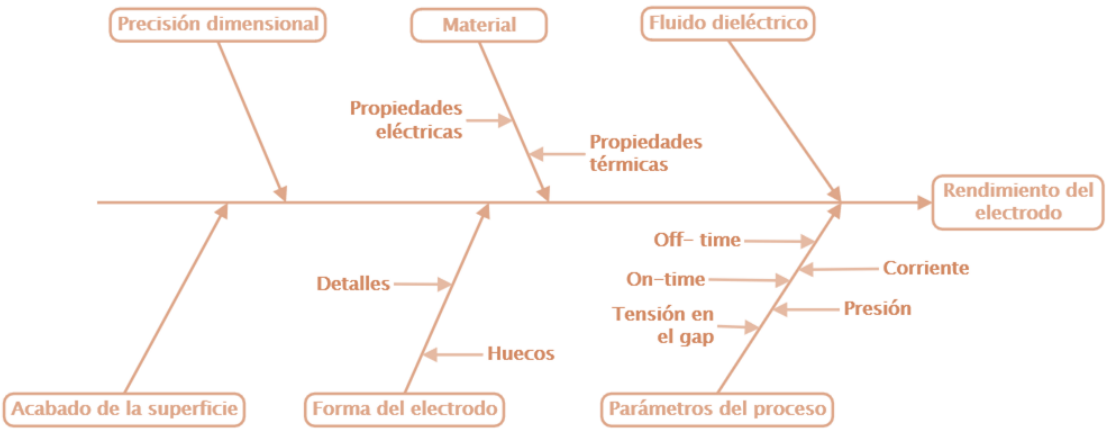


Figura 2.45. Factores que afectan al rendimiento del electrodo. Adaptada de [183].

Todas las tecnologías de FA siguen cinco pasos fundamentales para la producción de prototipos, herramientas o piezas finales: preparación del modelo CAD, conversión a formato STL, segmentación y generación del programa de producción, fabricación aditiva y postprocesamiento del prototipo. La evaluación del rendimiento de estas técnicas, considerando factores como la precisión dimensional, rugosidad superficial, resistencia mecánica, tiempo de construcción y propiedades del material, determina el uso final de cada una [234].

La tecnología SLA por su mayor precisión dimensional [235,236] y un buen acabado superficial la hace muy adecuada para la fabricación de electrodos EDM [193,228]. Otras tecnologías de FA, como algunos procesos de fusión en lecho de polvo, la fabricación de objetos laminados, el modelado por deposición fundida y la impresión por chorro térmico, también han sido exploradas en la fabricación de electrodos [149,238–241].

Los electrodos fabricados mediante técnicas de FA deben cumplir con rigurosas especificaciones en términos de precisión dimensional y rugosidad superficial para garantizar la calidad del proceso EDM. Esto requiere la realización de un postprocesado, que puede incluir etapas de desbaste, semidesbaste y acabado, dependiendo de las propiedades eléctricas del material (no conductivo, conductor o modelo para fundición) y de los criterios de calidad (precisión dimensional, rugosidad superficial) [192]. Las técnicas de fabricación basadas en modelos de FA pueden dividirse en métodos directos o indirectos, así como en técnicas de fundición (Ver Figura 2.46) [192].

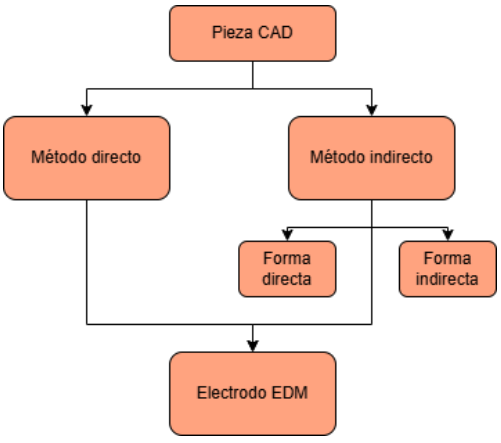


Figura 2.46. Clasificación fabricación de electrodos. Adaptada de [192].

En los métodos directos, el electrodo se genera de manera inmediata a partir de la fusión o sinterización selectiva de polvos metálicos sobre una forma final. Esta estrategia reduce el número de operaciones, aunque exige equipamiento avanzado y presenta limitaciones asociadas a la porosidad, la compatibilidad de materiales y los altos costes de producción. En contraste, los métodos indirectos requieren la creación previa de un modelo físico (habitualmente por estereolitografía) sobre el cual se deposita una cáscara metálica mediante procesos como el electroconformado. Posteriormente, el soporte puede eliminarse o mantenerse según la geometría deseada. Aunque menos precisos dimensionalmente debido a las variaciones en el grosor del recubrimiento, los métodos indirectos destacan por su sencillez, menor coste y rapidez, siendo especialmente útiles en fases de prototipado o para piezas donde el acabado superficial prima sobre la tolerancia dimensional [192].

En el caso de materiales conductores, como polvos metálicos, resinas con carga de polvo metálico o cerámicas con matriz metálica, es necesario aplicar un postprocesamiento específico en función de cada técnica de FA. Las piezas metálicas obtenidas a partir de moldes de fundición requieren tratamientos adicionales para mejorar la calidad superficial y eliminar los efectos escalonados. Además, es fundamental ajustar el archivo STL y realizar modificaciones en las características geométricas más finas [249]. Igualmente, los patrones de fundición también requieren un postprocesado adecuado para cumplir con las especificaciones finales.

2.4.2.1. Electrodos de materiales no conductores

El proceso de elaboración de estos electrodos puede dividirse en dos enfoques principales: la fabricación directa y la indirecta, ambas basadas en la aplicación de recubrimientos metálicos a modelos no conductores. En la fabricación directa, el electrodo se obtiene mediante la aplicación de una capa metálica de recubrimiento directamente sobre una pieza modelo en positivo, lo que lo convierte en el electrodo final, después de ajustar sus dimensiones para compensar el grosor del recubrimiento. Por otro lado, en la fabricación indirecta se crea una pieza modelo en negativo del electrodo deseado, al que posteriormente se aplica un recubrimiento metálico [193]. La Figura 2.47 ilustra estos procesos.

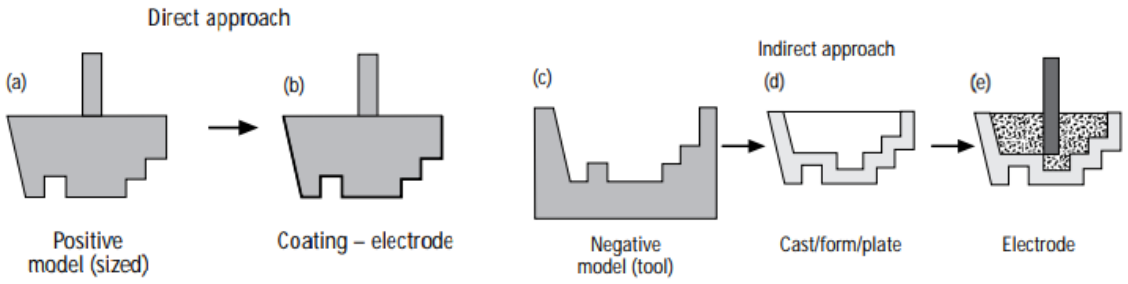


Figura 2.47. Representación de los procesos básicos de fabricación de electrodos mediante FA directa e indirecta. Adaptada de [193].

El enfoque de fabricación directa, estudiado por autores como Arthur [193] y Leu [228], permite obtener electrodos comparables en calidad a los sólidos tradicionales utilizados en operaciones de mecanizado de acabado, semidesbaste y desbaste. Entre sus ventajas destaca la posibilidad de producir simultáneamente un gran número de electrodos, lo que reduce significativamente los tiempos de fabricación. Sin embargo, también presenta desafíos notables, como la dificultad para asegurar una distribución uniforme del material, al emplear el electroconformado para generar esa capa metálica, lo que puede llevar a un grosor irregular del recubrimiento. Además, la pieza modelo utilizada suele perderse en el proceso, y los electrodos pueden presentar fallas prematuras si el recubrimiento es menor a 180 micras [253–255].

En cuanto al método indirecto, este implica la creación de una pieza modelo en negativo que se recubre con metal para formar la cáscara del electrodo. Esta cáscara, que puede reforzarse

posteriormente con resinas o metales de bajo punto de fusión, conserva la forma del electrodo deseado. Las investigaciones en este ámbito, realizadas por Rennie [149] y Yarlagadda [228], han señalado que este enfoque ofrece beneficios significativos, como la reutilización de la pieza modelo y la reducción de costos de producción al poder producir múltiples electrodos simultáneamente. Además Jensen y Hovtun también pudieron demostrar que el rendimiento es comparable a los electrodos sólidos [251]. Aun así, se han detectado inconvenientes, como un desgaste elevado del electrodo, precisión limitada en características internas complejas y un tiempo de procesamiento más alto. Además, las geometrías intrincadas pueden presentar dificultades para obtener un recubrimiento uniforme, lo que compromete la calidad del electrodo[149].

La metalización de prototipos no conductores se realiza en dos fases distintas. En la primera etapa, se recubre la superficie del prototipo con una fina capa de metal que convierte la pieza no conductora en conductora. Este paso preliminar puede realizarse mediante chapado sin electrodos, aplicación de pintura metálica, pulverización o inmersión en soluciones conductoras. Posteriormente, en la segunda fase, se aplica un recubrimiento metálico más grueso (superior a 180 µm) para reforzar la estructura y mejorar las propiedades del electrodo. Técnicas como la galvanoplastia, el electroconformado o la deposición de láminas metálicas son comunes en esta etapa [193].

El electroconformado, en particular, destaca por su capacidad para replicar con alta precisión la geometría del modelo, alcanzando niveles de detalle de hasta 1 µm. Además, este método evita problemas de contracción o distorsión, frecuentemente asociados con técnicas convencionales como la fundición o el estampado [183,256]. En los casos en los que la segunda etapa de metalización se aplica sobre un patrón negativo, es necesario extraer el modelo y rellenar posteriormente la cáscara metálica. No obstante, este procedimiento puede afectar la estabilidad dimensional del electrodo, especialmente cuando se emplean modelos de geometría compleja, debido a las diferencias térmicas entre el material de relleno y la cáscara metálica.

2.4.2.2. Espesor de la electroforma

Los electrodos de cobre fabricados mediante electroformado son ampliamente utilizados en la técnica de SEDM debido a sus propiedades favorables. Sin embargo, para garantizar su eficacia y evitar daños en la pieza de trabajo, es esencial que el grosor del recubrimiento de cobre supere la profundidad del cráter más grande generado por las descargas eléctricas, conocido como "espesor crítico". Este parámetro es fundamental, ya que determina la capacidad del electrodo para soportar las intensas descargas sin comprometer su estructura. La profundidad del cráter está directamente relacionada con la energía de descarga, la cual se define por la corriente de pulso, el voltaje de separación durante el pulso y la duración del mismo.

El grosor del recubrimiento en un electrodo electroformado para SEDM depende de la relación entre el desgaste del electrodo y la pieza de trabajo. La relación de desgaste del electrodo se define como la proporción del volumen erosionado del electrodo respecto al volumen eliminado en la pieza de trabajo. Para determinar el grosor adecuado del recubrimiento de cobre, se utiliza la ecuación:

$$T_c = S_f\,(TWR \bullet W_d + C_1), \quad \text{donde:}$$

- Tc es el grosor del recubrimiento necesario para evitar daños en el electrodo de cobre,
- Wd es la profundidad de la cavidad en la pieza a mecanizar,
- TWR es la relación de desgaste del electrodo específica para la configuración de mecanizado,
- C1 es el espesor crítico que debe superarse para garantizar la integridad del electrodo,
- Sf es el factor de seguridad (mayor a 1 para asegurar margen de error).

Para equilibrar la resistencia a la erosión y la estabilidad estructural, estudios recientes han sugerido que un grosor mínimo de 0,5 mm es adecuado para la mayoría de las aplicaciones, según autores

como Bocking et al. No obstante, espesores superiores a 1 mm han demostrado proporcionar mayor robustez en aplicaciones de alta tensión, asegurando una mejor durabilidad del electrodo [240,257]. A pesar de esto, se debe tener cuidado con la uniformidad del recubrimiento, ya que variaciones en el grosor pueden provocar un desgaste desigual durante el proceso EDM, reduciendo la eficiencia y precisión del mecanizado [258].

El espesor crítico debe ser suficiente para soportar la erosión provocada por la energía de descarga, evitando así que la capa de cobre sufra quemaduras o desgastes prematuros [259]. Estudios recientes indican que el grosor mínimo necesario para electrodos de cobre puede variar según las condiciones de mecanizado específicas. Kechagias et al. determinaron que un recubrimiento mínimo de 0,6 mm es crucial para mecanizar cavidades de acero de hasta 6 mm [183,260]. Este rango de espesores mínimos demuestra la necesidad de ajustar el grosor del electrodo a las condiciones específicas de mecanizado, del material a erosionar y del tipo de superficie que se desea conseguir.

2.4.2.3. Refuerzo de la electroforma

En condiciones de trabajo exigentes, se recomienda emplear cáscaras metálicas con espesores del orden de milímetros, combinadas con rellenos internos de metales de bajo punto de fusión, a fin de proporcionar estabilidad estructural frente a las elevadas intensidades propias del proceso SEDM en condiciones de desbaste. Esta estrategia contribuye a mejorar la resistencia mecánica del electrodo, minimizando el riesgo de deformaciones o fallas prematuras durante el mecanizado [240].

Un aspecto crítico a considerar en el diseño de la geometría del electrodo es el fenómeno conocido como “debilidad del borde”. Esto genera un espesor local reducido respecto al espesor medio, convirtiendo dichas áreas en puntos especialmente vulnerables al desgaste y a la rotura durante el proceso de descarga eléctrica. Por tanto, se debe evitar, en la medida de lo posible, la presencia de zonas geométricas que favorezcan la aparición de este fenómeno.

Cabe destacar que, en cáscaras con espesores inferiores a 1 mm, la variabilidad en el espesor del metal depositado tiende a ser menor, lo que reduce en cierta medida la incidencia del efecto de debilidad del borde [240]. Sin embargo, este beneficio se ve condicionado por una limitación en las condiciones operativas: no es recomendable aplicar altas intensidades, ya que la capacidad de disipación térmica y la resistencia mecánica de la cáscara se ven reducidas. En estos casos, el relleno puede realizarse con materiales no conductores, siempre que el diseño del electrodo y el tipo de descarga lo permitan.

2.4.3. Comparativa entre electrodos mecanizados y electroconformados

La comparación entre los electrodos mecanizados y los fabricados mediante electroformado revela algunas diferencias en cuanto a rendimiento, durabilidad y costos de producción en la tecnología SEDM. En términos generales, el rendimiento de los electrodos electroconformados se mide a través de la tasa de remoción de material, la cual es comparable a la de los electrodos de cobre mecanizados. Sin embargo, los electrodos electroconformados tienden a presentar una mayor relación de desgaste de la herramienta, lo que puede resultar en fallas prematuras del electrodo durante el proceso de mecanizado [149,228,240].

Investigaciones previas, como las realizadas por Arthur et al. [193], han demostrado que los electrodos electroconformados alcanzan tasas de MRR similares (≈50 mm^3/min) a las de los electrodos sólidos mecanizados, aunque con un desgaste más elevado. Sin embargo, su eficiencia en operaciones de desbaste ha resultado equivalente, y la posibilidad de reutilizar modelos SLA, junto con la facilidad de separación de la cáscara y la precisión en la conformación de herramientas, refuerza su aplicabilidad industrial. Asimismo, Blom [261] evidenció que, bajo condiciones de desbaste, los electrodos electroconformados mostraban un rendimiento uniforme respecto a los mecanizados, pero con un coste de producción seis veces inferior.

Yang realizó un estudio comparativo detallado utilizando modelos de SLA fabricados con resina epoxi SL 5170, en el que se evaluaron parámetros como MRR, TWR y rugosidad superficial (Ra) durante operaciones de desbaste, semidesbaste y acabado. Se observó que, siempre que el grosor de la capa de cobre fuese superior a la profundidad del cráter generado por las descargas, los electrodos electroconformados mantenían un rendimiento equivalente al de los mecanizados. En condiciones de semidesbaste, se detectó deterioro en las cáscaras con espesores delgados (≈2 mm) tras 30-40 minutos de uso. Por el contrario, los electrodos con capas de 4 mm presentaron menor desviación dimensional y mayor resistencia a la deformación térmica. La desviación dimensional se definió como la proporción entre la desviación medida y la dimensión nominal del modelo SLA, confirmando que espesores mayores proporcionan mayor estabilidad térmica y precisión geométrica [262].

Desde una perspectiva medioambiental, el electroconformado ofrece ventajas sustanciales frente al mecanizado convencional. Este proceso reduce notablemente la generación de residuos, evita el uso de fluidos de corte contaminantes y optimiza el uso de materiales [263]. Estudios como los de Mohanty et al. [289] concluyen que el electroconformado requiere menor consumo energético por unidad de producción, especialmente al trabajar con materiales de alta conductividad como el cobre [264]. Además, análisis de ciclo de vida (LCA) llevados a cabo por Ji et al. [265] subrayan que el electroconformado es más sostenible en todas las etapas del ciclo de vida del producto: desde la extracción de materias primas, la fabricación, la utilización y hasta su disposición final, alineándose con los principios de la manufactura sostenible.

En términos de rentabilidad, la fabricación de electrodos mediante electroconformado presenta beneficios claros. En el estudio de Yang [262], se estimó que producir un electrodo complejo mediante mecanizado convencional requeriría más de 1.200 horas (aproximadamente 50 días con tres turnos diarios), mientras que la alternativa por electroconformado solo demanda alrededor de 64 horas. Esta reducción de tiempo contempla 12 horas para la generación del patrón por estereolitografía, 24 horas para el proceso de electroconformado, 4 horas para la eliminación térmica del modelo y 6 horas para el rellenado de la cáscara metálica. En otro estudio, Hsu et al. [266] demostraron que la producción de 15 electrodos mediante electroconformado asistido por FA tomó 40 horas, frente a las 57 horas necesarias con mecanizado CNC convencional. Además, el electroconformado permite la producción simultánea de múltiples cáscaras, lo que incrementa la eficiencia global del proceso.

En conjunto, el electroconformado representa una solución técnica y económicamente viable para la fabricación de electrodos en SEDM. Su capacidad para producir geometrías complejas, reducir residuos, optimizar el consumo energético y disminuir significativamente el coste de producción lo convierten en una tecnología alineada con los objetivos actuales de sostenibilidad y eficiencia industrial.

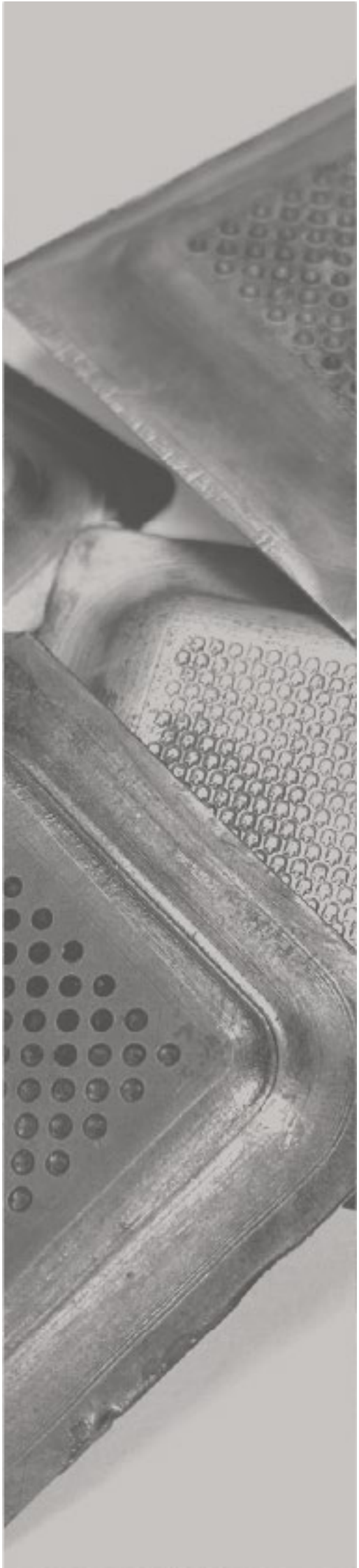
2.5. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de los fundamentos teóricos y tecnológicos que sustentan el presente trabajo de investigación, centrado en la generación de electrodos microtexturizados para su aplicación en procesos de electroerosión. El estudio ha abarcado tres áreas principales: la fabricación aditiva, el electroconformado y la electroerosión por penetración, analizando en profundidad sus principios de funcionamiento, capacidades, limitaciones y sinergias potenciales.

Desde una perspectiva integral, se concluye que la combinación estratégica de estas tres tecnologías, fabricación aditiva (MSLA), electroconformado y SEDM, permite explotar las capacidades específicas de cada proceso, maximizando sus fortalezas y compensando sus limitaciones individuales. Esta sinergia tecnológica facilita la fabricación de electrodos microtexturizados de alta precisión, capaces

de replicar microestructuras a escalas que resultan inalcanzables mediante el mecanizado convencional, y, además, de hacerlo de una manera más eficiente y sostenible.

En definitiva, este capítulo establece los fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis principal de trabajo de esta tesis: que mediante la combinación de las tecnologías de fabricación aditiva (MSLA), electroconformado y electroerosión por penetración, es posible desarrollar herramientas innovadoras que no solo amplían las fronteras de la capacidad de diseño, sino que también mejoran la sostenibilidad y eficiencia de los procesos de fabricación de precisión.



CAPÍTULO III

Metodología aplicada y equipamiento empleado

3. METODOLOGÍA APLICADA Y EQUIPAMIENTO EMPLEADO

El presente capítulo tiene como objetivo detallar la metodología desarrollada para la fabricación de electrodos para SEDM microtexturizados mediante la combinación de tecnologías de fabricación aditiva y electroconformado. Se describirá de forma secuencial cada una de las fases implicadas, desde el diseño y creación de la pieza modelo hasta la obtención final de las cáscaras metálicas funcionales. Este enfoque metodológico no solo responde a la necesidad de fabricar herramientas con geometrías complejas y texturas a microescala, sino que también permita establecer un procedimiento replicable para otras posibles aplicaciones de esta combinación de procesos.

A lo largo del capítulo, se expondrán los equipos, materiales y software especializados utilizados en cada etapa del proceso, justificando su selección en función de los requerimientos técnicos y objetivos experimentales. Este recorrido metodológico constituye un pilar fundamental de la tesis, ya que permite garantizar tanto la fidelidad geométrica como la funcionalidad de los electrodos fabricados, sentando las bases para los análisis y ensayos que se desarrollarán en los capítulos siguientes.

3.1. Proceso de elaboración de electrodos microtexturizados

En este apartado se procederá a describir el procedimiento de elaboración de dichos electrodos. Se presentarán de manera concisa las distintas etapas necesarias, dejando para capítulos posteriores una exposición más detallada que incluirá los avances realizados a lo largo de la investigación.

La integración de diversos procesos de fabricación, como la fabricación aditiva, la pulverización catódica y el electroconformado, aparentemente no relacionados entre sí, ha planteado ciertas dificultades en la obtención del producto final. Se ha requerido un exhaustivo análisis y estudio de compatibilidad, así como un proceso de adaptación, hasta alcanzar un procedimiento óptimo y eficaz capaz de generar resultados satisfactorios. El procedimiento de fabricación combinado ha sido configurado finalmente en nueve fases distintas, tal y como se ilustra en la Figura 3.1.

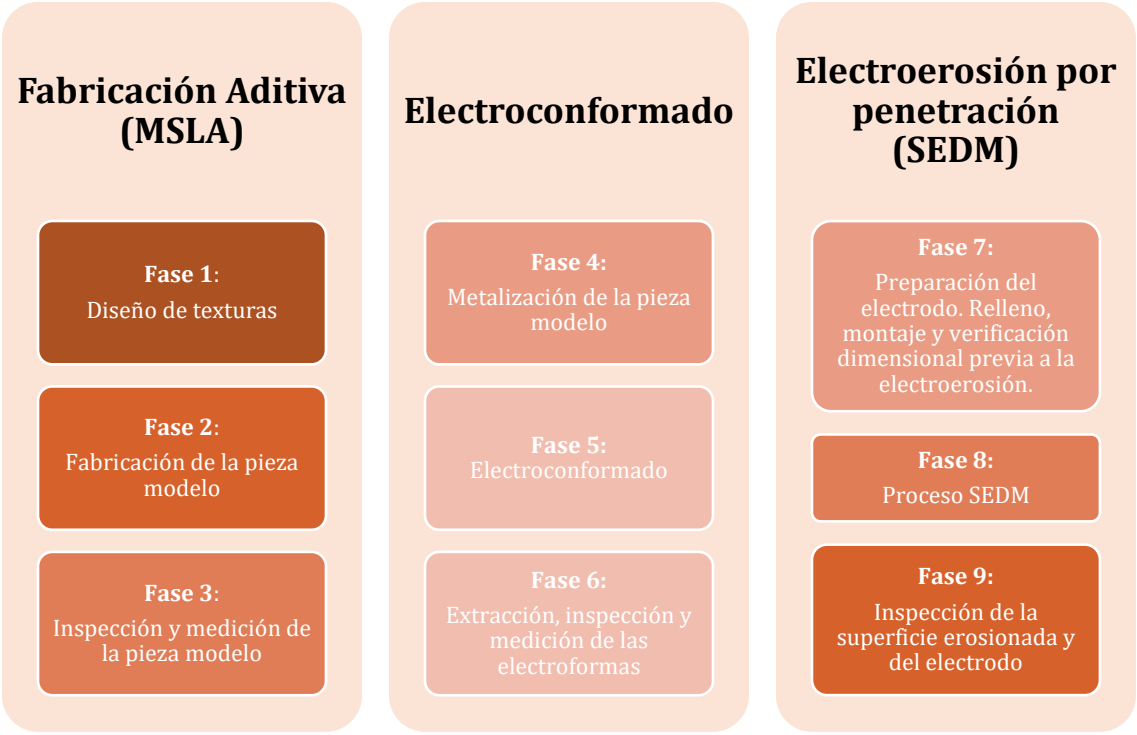


Figura 3.1. Gráfico con el procedimiento de fabricación de herramientas SEDM electroconformadas.

3.1.1. Fase 1: Diseño de texturas

El diseño de las piezas modelo constituye el punto de partida fundamental en este proceso, ya que sobre ellas se desarrollará el resto de la investigación. Estas piezas incorporan la geometría específica que se desea reproducir mediante técnicas avanzadas de microtexturizado. Su configuración inicial no solo determina las características esenciales de la pieza, sino que también influye directamente en la calidad y viabilidad de los procesos de fabricación posteriores, como el micro electroconformado.

La geometría de esas piezas modelo se definió teniendo en cuenta las consideraciones de diseño que establece el proceso de electroconformado, para evitar aristas vivas que eviten que produzcan las indeseadas debilidades de borde. Este diseño se estableció en el marco del proyecto de investigación "TEXTURE", con el título de: Desarrollo de superficies texturizadas con propiedades funcionales mejoradas mediante una combinación de procesos de fabricación no convencionales (DPI2017-84935-R). Este proyecto fue realizado por un equipo de investigación mixto de la Universidad de Cádiz (UCA) y de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). A partir de ese diseño base se introdujeron mejoras relevantes, respetando la estructura original, con el objetivo de definir una configuración robusta y funcional que se muestra en la Figura 3.2.

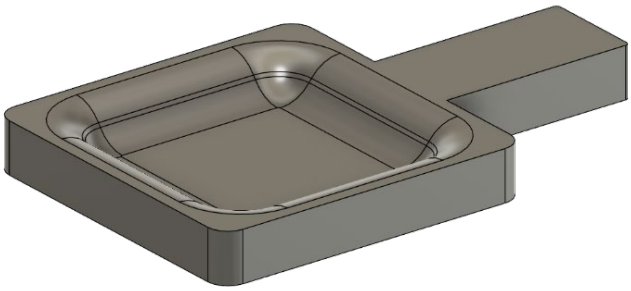


Figura 3.2. Configuración básica de la pieza modelo.

El foco principal de esta tesis recae en el diseño de las texturas aplicadas sobre la cara funcional a diferentes escalas, para conseguir propiedades superficiales mejoradas. Estas texturas se conciben con el propósito de explorar nuevas geometrías, evaluar su impacto en aplicaciones prácticas y optimizar su generación mediante técnicas de diseño paramétrico.

Para el desarrollo inicial de estas geometrías se ha empleado varias herramientas de CAD que han permitido crear los primeros modelos texturizados y evaluar su comportamiento visual y estructural. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de una pieza modelo diseñada con una textura funcional inspirada en la morfología de la piel de tiburón.

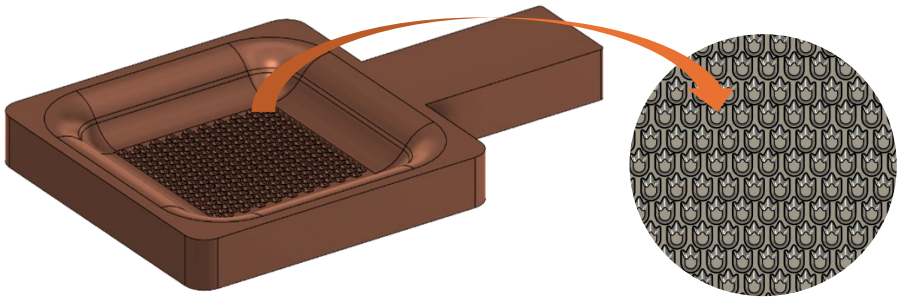


Figura 3.3. Ejemplo de pieza modelo con textura de piel de tiburón empleando Fusion360.

Durante el transcurso de la investigación, se detectó la necesidad de disponer de un mayor grado de flexibilidad y control sobre los diseños generados. En este contexto, la parametrización geométrica se consolidó como una herramienta clave, ya que permite modificar de forma rápida y precisa aspectos como el tamaño, la orientación, la repetición y la distribución de las texturas, sin requerir la

reconstrucción completa del modelo. Esta metodología aporta eficiencia, reproducibilidad y adaptabilidad al proceso de diseño. Como ejemplo, en la Figura 3.4 se presenta la misma textura de piel de tiburón, ahora generada a partir de una estrategia paramétrica.

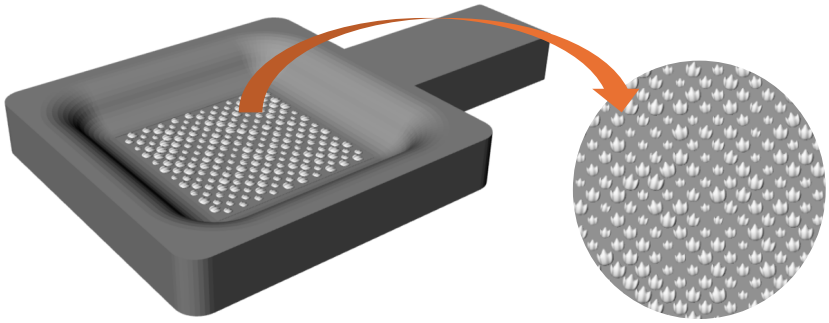


Figura 3.4. Optimización de la textura de piel de tiburón mediante parametrización.

Toda esta etapa de desarrollo, optimización y análisis de texturas se abordará con mayor profundidad en el siguiente capítulo, donde se describen los procedimientos técnicos utilizados, los parámetros evaluados y los resultados obtenidos. Este enfoque detallado permitirá comprender el impacto real del diseño paramétrico sobre el rendimiento y viabilidad de las herramientas generadas mediante microelectroconformado.

3.1.2. Fase 2: Fabricación de la pieza modelo

Una vez definidos los diseños digitales de las microtexturas en las piezas modelo, el siguiente paso consiste en su materialización física mediante técnicas de fabricación aditiva. Para ello, se seleccionó la tecnología de estereolitografía por máscara (MSLA), reconocida por su elevada resolución y capacidad para reproducir detalles complejos a microescala. Esta tecnología resulta especialmente adecuada en el contexto del microtexturizado, ya que permite generar superficies con mínima rugosidad inicial, condición indispensable para asegurar una replicación metálica precisa durante el proceso de electroconformado.

El flujo metodológico seguido en esta fase se estructura en tres etapas consecutivas: preparación del modelo digital mediante software de laminado (slicer), fabricación mediante tecnología MSLA y postprocesado del modelo impreso.

3.1.2.1. Preparación digital del modelo (slicing)

Tras la finalización del diseño CAD, el archivo se exporta en formato STL, estándar en impresión 3D por su capacidad para representar geometrías complejas mediante mallas triangulares [291]. Este archivo es posteriormente procesado en un software de corte (slicer), cuya función es segmentar el modelo en capas sucesivas que guiarán el proceso de fabricación capa a capa.

Durante esta etapa, se configuran parámetros críticos como la orientación del modelo, el espesor de capa, la disposición de soportes y los valores de exposición y curado, todos ellos directamente relacionados con la calidad dimensional, la fidelidad geométrica y la estabilidad estructural del modelo fabricado. Una configuración cuidadosa en este punto es esencial para asegurar una correcta reproducción de las texturas diseñadas y minimizar defectos durante la impresión. Concretamente, para evitar imperfecciones derivadas de la generación de soportes o de la distribución de capas, las piezas modelo fueron posicionadas con la cara texturizada orientada en paralelo a la mesa de trabajo, garantizando así una superficie funcional uniforme y libre de interferencias durante el proceso de replicación.

3.1.2.2. Fabricación mediante impresión MSLA

Con el archivo laminado generado, se procede a la impresión del modelo físico mediante tecnología MSLA. La selección del sistema de impresión y del material fotosensible se realiza en función de criterios de resolución, precisión geométrica y compatibilidad con el proceso posterior de electroconformado. Durante la investigación, se emplearon dos equipos MSLA y dos resinas, que se describirán posteriormente.

3.1.2.3. Postprocesado del modelo impreso

En los procesos de fabricación aditiva mediante tecnología MSLA, el postprocesado constituye una fase importante para asegurar la calidad dimensional, estética y funcional de las piezas obtenidas. No obstante, esta fase pasa a ser crítica cuando quieres conseguir un alto nivel de definición geométrica como en la aplicación que se le está dando en este trabajo de investigación. Este procedimiento no solo elimina los residuos de resina no curada presentes en la superficie, sino que también completa el proceso de polimerización de la resina, alcanzando las propiedades mecánicas adecuadas y mejorando la estabilidad dimensional y superficial de los modelos.

En conjunto, esta segunda fase consolida un sistema de fabricación robusto y tecnológicamente controlado, capaz de producir piezas modelos con texturas a microescala de alta calidad, reproducibles y adecuados para su uso en la fabricación de herramientas electroconformadas para SEDM.

3.1.3. Fase 3: Inspección y medición de las piezas modelo

Una vez finalizada la fabricación mediante impresión MSLA y las etapas de postprocesado, las piezas modelo son sometidas a una fase crítica de inspección y control dimensional, cuyo objetivo principal es verificar su integridad estructural, fidelidad geométrica a la textura diseñada y su calidad superficial antes de proceder a la etapa de electroconformado. Esta revisión preliminar resulta fundamental, ya que cualquier defecto presente en la pieza modelo puede replicarse y amplificarse en las cáscaras metálicas resultantes, comprometiendo tanto la funcionalidad como la precisión de las microtexturas deseadas.

El proceso de inspección se desarrolla en dos niveles complementarios, empleando tecnologías de análisis óptico de alta resolución. En una primera etapa, se realiza una inspección visual general orientada a la detección de defectos macroscópicos tales como rebabas, deformaciones, o irregularidades de contorno derivados de errores en la impresión o el curado. Esta evaluación permite descartar piezas con anomalías evidentes que puedan afectar el proceso de replicación.

Posteriormente, se lleva a cabo una inspección más detallada mediante instrumentación óptica de precisión, enfocada en la caracterización de la textura superficial y la microestructura del modelo. Esta etapa incluye mediciones específicas orientadas a validar la fidelidad de las geometrías impresas, el estado de los relieves microtexturizados y la uniformidad del patrón en toda la superficie funcional. A través de este análisis se identifican posibles desviaciones dimensionales, zonas con defectos de resolución o presencia de residuos que no hayan sido eliminados en el postprocesado.

La implementación de este protocolo de control de calidad, basado en tecnología de inspección no destructiva, permite asegurar que las superficies de las piezas modelo cumplen con los requisitos exigidos de limpieza, definición y estabilidad geométrica. Solo aquellas piezas que superan esta etapa con éxito son seleccionadas para su posterior metalización y replicación mediante electroconformado, garantizando así la integridad del proceso y la calidad de las herramientas funcionales obtenidas.

3.1.4. Fase 4: Metalización de la pieza modelo

Para que el proceso de electroconformado pueda desarrollarse correctamente, es imprescindible que la corriente eléctrica fluya a través de la pieza modelo que actúa como cátodo. Dado que las piezas modelo fueron fabricadas mediante impresión MSLA utilizando resinas fotopoliméricas (materiales eléctricamente aislantes), se requiere la implementación de una etapa previa de metalización superficial, con el fin de conferirles conductividad eléctrica sin comprometer su geometría ni su microtextura.

Si bien existen métodos de bajo coste ampliamente utilizados para este propósito —como la aplicación de pinturas conductoras a base de grafito, plata o mezclas metálicas artesanales—, estas técnicas presentan limitaciones significativas cuando se trabaja con superficies microtexturizadas de alta precisión. En particular, la aplicación manual de recubrimientos líquidos puede generar capas de espesor irregular, enmascarar detalles críticos y degradar la fidelidad geométrica de las texturas impresas, comprometiendo así los objetivos de replicación del proceso.

Con el fin de preservar la topografía superficial original y garantizar una conductividad homogénea, en esta investigación se optó por emplear la técnica de pulverización catódica (sputtering). Esta técnica de deposición física permite aplicar capas metálicas ultradelgadas (del orden de nanómetros) de forma controlada y uniforme, sin alterar la morfología de la pieza modelo. El procedimiento se basa en la generación de un plasma de argón dentro de la cámara de recubrimiento, cuyos iones bombardean un blanco metálico (target), liberando átomos que se depositan sobre la superficie de la pieza modelo.

El protocolo de recubrimiento adoptado en este estudio consistió en la ejecución automatizada de dos ciclos consecutivos de 120 segundos de sputtering, con el objetivo de asegurar una cobertura continua y efectiva sobre la cara funcional de la pieza modelo. Este tratamiento generó una capa conductora homogénea, delgada y adherente, suficiente para permitir el paso de corriente durante el posterior proceso de electrodeposición de cobre.

Una vez finalizado el recubrimiento, la pieza modelo es retirada de la cámara de sputtering, obteniéndose una superficie completamente metalizada en su zona activa (véase Figura 3.5).

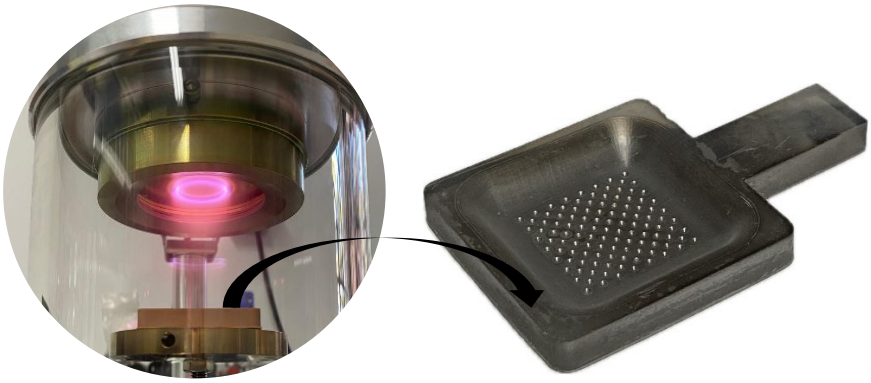


Figura 3.5. Pieza modelo metalizada lista para el proceso de electroforming.

En resumen, la implementación de la pulverización catódica como técnica de metalización representa una solución tecnológicamente avanzada que permite preservar la geometría crítica de la pieza modelo al tiempo que se garantiza su adecuación eléctrica para el proceso de electroconformado. Esta etapa constituye un eslabón clave dentro de la metodología experimental planteada, al asegurar que la reproducción metálica de las texturas se lleve a cabo con la máxima fidelidad y calidad superficial.

3.1.5. Fase 5: Electroconformado de las piezas modelo

Esta fase se aplica este proceso mediante un sistema de microelectroconformado desarrollado en el proyecto de investigación ya mencionado y mejorado sustancialmente a lo largo del presente trabajo, considerando los principios técnicos establecidos y adaptados a los requerimientos específicos de la fabricación de herramientas microtexturizadas para SEDM. El objetivo principal es replicar con la máxima fidelidad la textura superficial de la pieza modelo, mediante la deposición controlada de cobre en condiciones rigurosamente monitorizadas.

Para lograrlo, se integran y configuran todos los componentes del sistema de forma estructurada, lo que garantiza un entorno de deposición estable, reproducible y seguro. A continuación, se detallan las etapas operativas necesarias para la correcta ejecución del proceso.

3.1.5.1. Preparativo del equipo y conexiones

El montaje del sistema de electroconformado se lleva a cabo siguiendo un protocolo sistemático, representado esquemáticamente en la Figura 3.6. Este protocolo contempla medidas específicas para asegurar la estabilidad del sistema y la seguridad del operador.

1. **Colocación del tanque electrolítico**: Se sitúan los tanques de trabajo de manera estable y nivelada para evitar vibraciones o fluctuaciones en el flujo del electrolito durante la recirculación.
2. **Instalación de componentes internos**: Se incorpora el soporte para el cátodo, diseñado específicamente para alojar la pieza modelo, así como el sistema de recirculación, que incluye bomba, filtro y tuberías. Este sistema es esencial para mantener una homogeneidad iónica constante en el baño electrolítico.
3. **Montaje del cátodo y ánodo**: La pieza modelo, ya metalizada y protegida, se fija firmemente en su posición como cátodo. El ánodo, compuesto por cobre de alta pureza, se recubre con una malla protectora para evitar la liberación de partículas (como fósforo), que podrían alterar las propiedades químicas del baño. Ambos electrodos se posicionan cuidadosamente en el tanque de procesado.
4. **Configuración eléctrica**: Se conectan el cátodo y el ánodo a los dispositivos de control y alimentación: el **Keithley 2460 SourceMeter®** y el sistema **DCAB**. Se emplean cables codificados por color (negro para cátodo, rojo para ánodo) para evitar errores de conexión.
5. **Verificación de contactos**: Antes de iniciar la deposición, se realiza una inspección detallada de todos los puntos de contacto, especialmente en la sujeción del cátodo. Una conexión deficiente puede generar pérdidas de corriente o defectos de recubrimiento, por lo que se prioriza la estabilidad eléctrica del montaje.

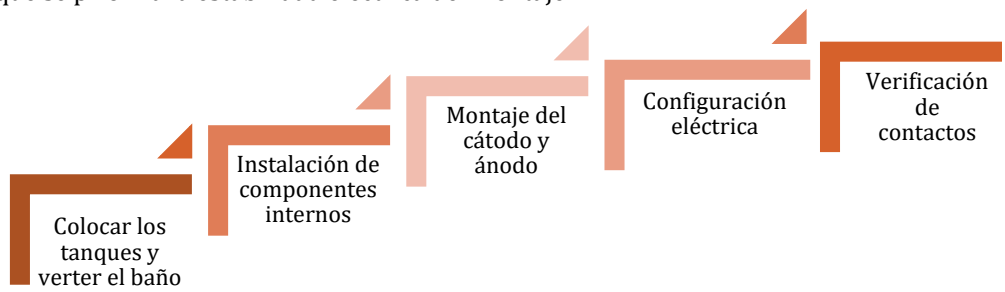


Figura 3.6. Esquema del montaje del equipo de electroforming.

La correcta ejecución de estos preparativos garantiza que el proceso de deposición comience en condiciones adecuadas, minimizando el riesgo de fallos técnicos y deposiciones defectuosas.

3.1.5.2. Ejecución del programa

Una vez verificados todos los componentes del sistema, se procede a la ejecución del programa de deposición mediante la fuente de alimentación de alta precisión Keithley 2460 SourceMeter®, que además permite la monitorización y almacenamiento continuo de los parámetros operativos.

Una vez iniciado el programa, el equipo ejecuta de forma completamente autónoma las distintas etapas de deposición, controlando con precisión los parámetros eléctricos definidos en cada una de ellas.

3.1.5.3. Descarga de datos

Finalizada la deposición, se procede a la extracción de los datos experimentales almacenados en el equipo Keithley 2460. La información registrada queda distribuida en buffers independientes, correspondientes a cada etapa del proceso. Estos datos son descargados manualmente desde la interfaz del equipo, tal como se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Pantalla de gestión de los buffers del KEITHLEY 2460 SourceMeter®.

Para esta investigación, la utilización de buffers independientes permite una evaluación precisa de la evolución del voltaje durante la deposición. Cada archivo de datos se almacena por separado, lo que garantiza la integridad del conjunto experimental y facilita su análisis posterior.

3.1.6. Fase 6: Extracción, inspección y medición de las electroformas

Una vez finalizado el proceso de electroconformado, se procede a la extracción de la cáscara metálica de cobre formada sobre la pieza modelo. Esta operación requiere una manipulación especialmente cuidadosa, ya que la electroforma de espesor reducido es susceptible a sufrir deformaciones mecánicas que comprometan su geometría y funcionalidad como electrodo.

Con el fin de preservar la integridad dimensional durante la manipulación y separación de la electroforma, se implementa un proceso de refuerzo basado en el relleno de la parte posterior de la cáscara con materiales epóxicos de curado rápido. En esta investigación se emplearon dos tipos de resina epóxica una líquida y otra en formato de masilla, ambas empleadas como soporte estructural sin interferir en la zona funcional del electrodo.

Una vez endurecido el material de refuerzo, se procede a la separación controlada de la electroforma de la pieza modelo, evitando esfuerzos localizados que puedan generar fisuras o pérdidas de planitud. En este punto, la electroforma ya se puede manipular de forma más cómoda y segura, por lo que se inicia una fase crítica de inspección y caracterización geométrica, orientada a validar su idoneidad para su uso posterior como electrodo en procesos de mecanizado por descarga eléctrica.

Con algunas de las cáscaras, se lleva a cabo un análisis dimensional específico para determinar el espesor de las mismas en distintas regiones, con especial énfasis en la zona funcional, donde en determinadas microtexturas pueden aparecer puntos críticos (véase Figura 3.8). Esta evaluación dimensional se realiza antes de aplicar el refuerzo, de modo que se pueda medir los espesores de forma fiable mediante un procedimiento diseñado y calibrado específicamente para este fin.



Figura 3.8. Medición de las electroformas obtenidas.

3.1.7. Fase 7: Preparación del electrodo

Una vez verificada la integridad estructural y dimensional de la cáscara electroconformada, y confirmada la ausencia de defectos que puedan comprometer su funcionalidad, está lista para su empleo en el proceso SEDM.

Para su correcta sujeción en los equipos de mecanizado, la cáscara se tiene que colocar en un portaelectrodos especialmente diseñado para adaptarse a su geometría y a su uso en SEDM, proporcionando un soporte estructural fiable y un contacto eléctrico adecuado. Durante el proyecto de investigación, mencionado previamente, se desarrolló un sistema modular basado en el portaelectrodos estándar EROWA ER-009222, cuyas dimensiones y características técnicas se detallan en la Figura 3.9.

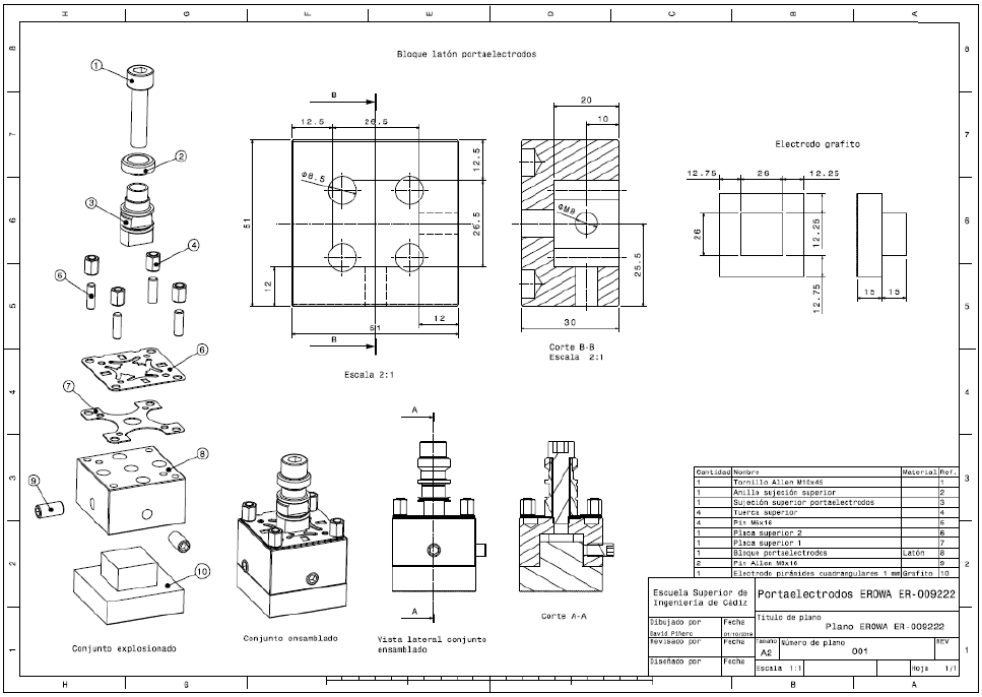


Figura 3.9. Plano del porta electrodos EROWA_ER-009222.

Este portaelectrodos cuenta con un alojamiento de sección cuadrada de 26,5 mm x 26,5 mm y una profundidad de 20 mm, ofreciendo un volumen suficiente para asegurar la correcta fijación del electrodo y permitir su alineación con precisión durante el proceso. La Figura 3.10 muestra el portaelectrodos real.

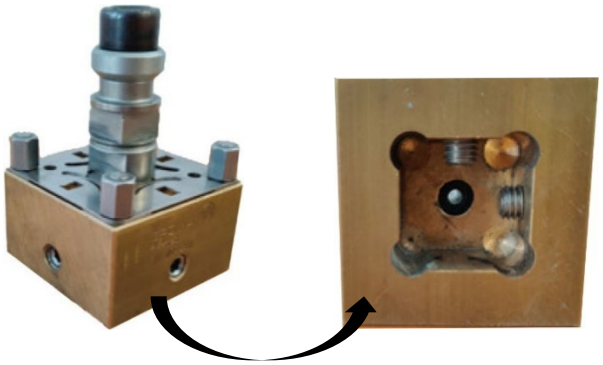


Figura 3.10. Porta electrodos EROWA_ER-009222.

Dado que la cáscara de cobre electroconformada presenta propiedades mecánicas y estructurales sustancialmente distintas a las de un electrodo macizo de grafito, fue necesario adaptar el sistema de fijación para garantizar un acoplamiento seguro sin comprometer la integridad del electrodo. Para ello, se diseñó un soporte modular de acoplamiento, concebido en el marco de la tesis desarrollada por Sánchez [163], específicamente adaptado a las características geométricas y mecánicas de estas herramientas electroconformadas.

Este sistema está compuesto por los siguientes elementos:

1. **Electrodo funcional:** componente principal que incorpora la cáscara electroconformada en su superficie activa, actuando como electrodo durante el mecanizado por descarga.
2. **Soporte estructural:** pieza que alberga el electrodo funcional, asegurando su posicionamiento preciso y su fijación al portaelectrodos EROWA estándar.
3. **Separador:** elemento que define una distancia controlada entre componentes, garantizando el ajuste dimensional del conjunto.
4. **Mecha de acoplamiento:** conecta el sistema al cabezal del equipo SEDM, permitiendo su integración mecánica y eléctrica.

Este conjunto fue fabricado en aluminio EN-AW 5083 H111, seleccionado por su buena conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica y facilidad de mecanizado. La Figura 3.11 muestra el despiece completo del sistema de montaje.

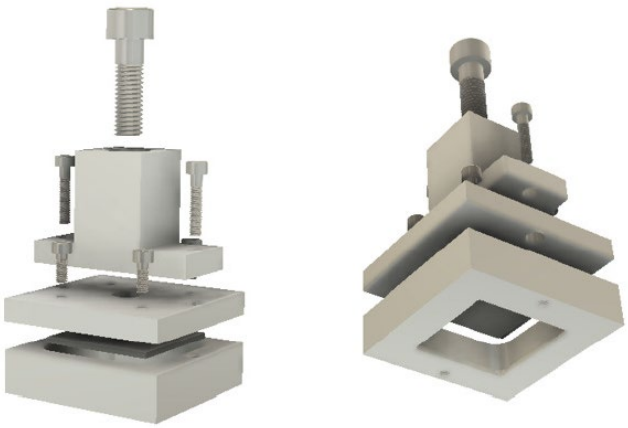


Figura 3.11. Despiece del soporte donde se aloja la cáscara de cobre. Obtenido de [163].

Este sistema modular permite adaptarse a diferentes sistemas de sujeción de maquina cambiando la mecha de acoplamiento, Figura 3.12. Esta funcionalidad ha sido aplicada en el desarrollo de esta tesis doctoral pues se han usado dos máquinas de electroerosión por penetración con sistemas de sujeción diferentes, una de la UCA y otra de la ULPGC.

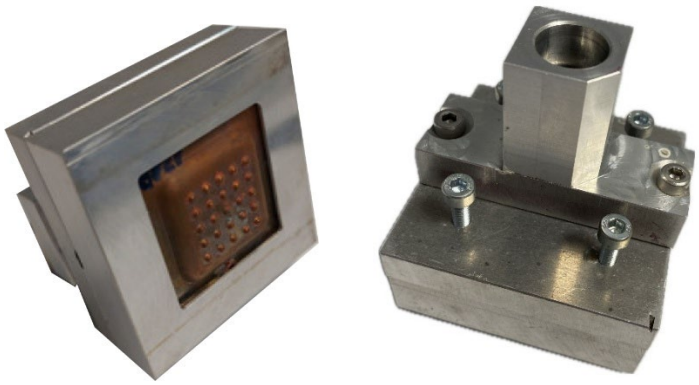


Figura 3.12. Portaelectrodos adaptado al equipo de la ULPGC.

Este proceso de adaptación estructural, junto con la validación experimental en condiciones reales, permite comprobar la funcionalidad operativa de las cáscaras electroconformadas como herramientas de micromecanizado, y constituye un paso fundamental en la evaluación del enfoque metodológico propuesto en esta tesis.

3.1.8. Fase 8: Proceso SEDM

Esta fase contempla la integración de los electrodos desarrollados en equipos de electroerosión por penetración, con el propósito de replicar condiciones operativas representativas del entorno industrial. Para ello, se diseñan y programan estrategias de mecanizado específicamente orientadas a operaciones de acabado, ámbito en el que estos electrodos encuentran su principal aplicación. Las pruebas experimentales se llevan a cabo sobre dos materiales de alto interés tecnológico: la aleación de aluminio Al7010 y la aleación de titanio Ti6Al4V (TiAl6V4). En una primera etapa, se evaluaron múltiples configuraciones texturales; sin embargo, la fase final de la investigación se centró en el análisis funcional de tres texturas seleccionadas por su comportamiento funcional. Los equipos utilizados para la ejecución de los ensayos SEDM se describen detalladamente en el apartado correspondiente al equipamiento experimental.

3.1.9. Fase 9: Inspección y medición de la superficie erosionada y del electrodo

La evaluación de las cáscaras electroconformadas una vez finalizado el proceso SEDM permite determinar su integridad funcional y capacidad de reutilización. Esta inspección postproceso tiene como finalidad principal identificar posibles daños estructurales, deformaciones o deterioros desgaste inducidos por la erosión eléctrica, y validar si las cáscaras mantienen sus condiciones operativas para un nuevo uso.

El análisis se centra en los siguientes aspectos clave:

- **Integridad estructural**: Inspección de la presencia de grietas, deformaciones o cualquier tipo de daño físico que pueda comprometer la estabilidad de la electroforma.
- **Precisión dimensional**: Verificación de parámetros geométricos clave para asegurar que las tolerancias originales se mantienen dentro del margen operativo permitido (Figura 3.13).

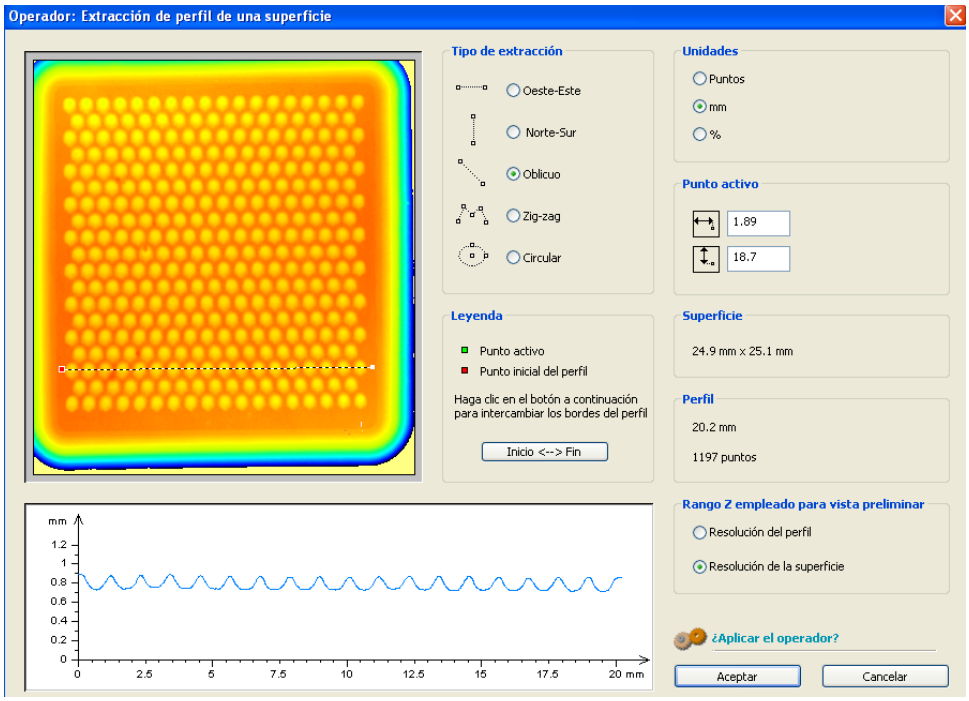


Figura 3.13. Inspección visual de las cáscaras tras la erosión.

Los resultados obtenidos en esta fase proporcionan indicadores directos del rendimiento operativo y la durabilidad de las cáscaras electroconformadas como herramientas funcionales. Además, permiten identificar aspectos de mejora para fases anteriores del proceso, como fijar el espesor mínimo de la electroforma, los materiales de refuerzo o las condiciones del ciclo de deposición. Este análisis será abordado en profundidad en el Capítulo 6.

Así mismo, el análisis de la pieza erosionada tiene como objetivo validar la capacidad de replicación de las texturas diseñadas y analizar la calidad superficial de las piezas obtenidas, elementos clave para juzgar la eficacia global de la propuesta desarrollada en esta tesis.

Los criterios principales considerados en esta etapa son los siguientes:

- **Fidelidad de la textura**: Se realiza una comparación detallada entre la textura diseñada en el CAD y la textura replicada en la superficie de la pieza erosionada. Este análisis permite identificar posibles desviaciones geométricas, pérdidas de definición o defectos que puedan afectar la funcionalidad prevista de la textura.

- **Uniformidad superficial**: Se evalúa la homogeneidad de la superficie erosionada, prestando atención a la ausencia de microdefectos locales como porosidades, fisuras superficiales o acumulaciones irregulares de material que puedan surgir como consecuencia de la descarga eléctrica

La Figura 3.14 muestra un ejemplo representativo de las piezas erosionadas obtenidas durante los ensayos experimentales. Estas imágenes permiten realizar una primera aproximación visual a la fidelidad de replicación alcanzada, y constituyen la base para el análisis más profundo que se desarrollará en capítulos posteriores.

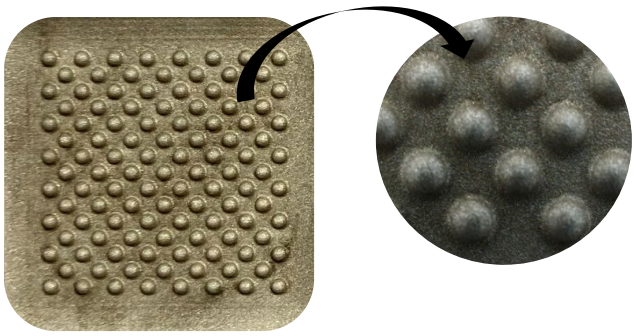


Figura 3.14. Caracterización tras la erosión de textura de semiesferas entrantes.

Con estas nueve fases de la metodología seguida, se contempla todo el proceso experimental de desarrollo, fabricación, implementación y validación de herramientas SEDM microtexturizadas mediante la combinación de fabricación aditiva por MSLA y electroconformado. Cada etapa ha sido cuidadosamente diseñada para garantizar la reproducibilidad, precisión y funcionalidad de las cáscaras de cobre generadas, desde su concepción digital hasta su aplicación efectiva en procesos reales de mecanizado.

Este procedimiento integral ofrece una metodología robusta y replicable para la fabricación de microtexturas complejas, abriendo nuevas oportunidades de aplicación en sectores industriales donde el control topográfico a microescala resulta determinante para el comportamiento funcional de los productos.

3.2. Equipamiento empleado

La intensa actividad experimental llevada a cabo en este trabajo ha requerido el uso de un conjunto específico de equipos, instrumentos y programas especializados, cuidadosamente seleccionados en función de los requerimientos técnicos de cada una de las fases descritas en la metodología. Desde la concepción digital de las microtexturas hasta su validación funcional como herramientas en procesos de mecanizado, cada etapa ha dependido de tecnologías que han permitido lograr precisión, repetibilidad y control sobre variables críticas.

Este apartado tiene como objetivo explicitar una relación del equipamiento empleado, organizándolo según su función dentro del flujo de trabajo. La presentación estructurada de estos recursos permitirá comprender con mayor claridad las capacidades del sistema experimental implementado, así como su potencial de replicabilidad en otros entornos de investigación o producción. Así mismo, cabe destacar que las especificaciones técnicas de algunos de los equipos más relevantes utilizados en los distintos análisis, así como sus respectivos certificados de calibración metrológica, se encuentran recogidos en el apartado de Anexos.

3.2.1. Diseño de texturas

La primera etapa del proceso de desarrollo se centró en la generación digital de las texturas que posteriormente serían transferidas a las superficies funcionales de las piezas modelo mediante MSLA. Para ello, fue necesario el empleo de software especializado de diseño asistido por ordenador (CAD), cuya selección se realizó en función de los requisitos técnicos de cada fase del trabajo.

En las fases iniciales de la investigación se utilizó el software Fusion 360, valorado por su accesibilidad, curva de aprendizaje progresiva y su capacidad para generar modelos tridimensionales con detalle y precisión. Esta plataforma permitió desarrollar los primeros diseños funcionales texturizados, así como analizar su comportamiento visual y estructural previo a su fabricación.

Sin embargo, a medida que el trabajo fue profundizando en la necesidad de generar variaciones paramétricas complejas de las texturas, se identificaron ciertas limitaciones de Fusion 360 en cuanto a flexibilidad geométrica y automatización del diseño. Por esta razón, se incorporó el uso de Rhinoceros con su plug-in Grasshopper, lo cual supuso una mejora significativa en el control de parámetros y la generación de geometrías adaptables. Este entorno permitió modificar de forma inmediata las características de una textura, simplemente alterando los valores definidos en los bloques de programación, lo que posibilitó la creación sistemática de múltiples variantes a partir de un mismo modelo base.

En conjunto, la complementariedad entre Fusion 360 y Grasshopper ofreció una solución versátil y eficaz para abordar el diseño digital de las microtexturas funcionales, sentando las bases para su posterior fabricación mediante tecnologías de impresión MSLA.

3.2.2. Fabricación de la pieza modelo

Tal como se describió en el capítulo metodológico, la fabricación de las piezas modelo se compone de tres fases clave: la preparación digital del archivo STL, su impresión mediante tecnología MSLA y un protocolo de postprocesado técnico que garantiza la obtención de microtexturas de alta fidelidad.

3.2.2.1. Fabricación MSLA

Para cada una de estas fases se han empleado programas y equipos específicos, seleccionados en función de los requisitos técnicos de resolución, precisión y estabilidad dimensional exigidos por el proceso de electroconformado. Los equipos empleados se recogen en las Tabla 3.1.

Durante las fases iniciales de la investigación se empleó la impresora Wanhao Duplicator 7, seleccionada principalmente por haber sido el equipo utilizado en la tesis que precede al presente trabajo. Esta continuidad permitió aprovechar el conocimiento previo acumulado y reutilizar configuraciones ya validadas. El equipo se integra con el software NanoDLP, el cual permite el control remoto de la impresión mediante una interfaz web accesible desde navegador, gracias a su conexión con una Raspberry Pi.

Tabla 3.1. Equipos empleados en la fabricación de las piezas modelo.

Nombre	Imagen	Características
Wanhao Duplicator 7 **(ULPGC)**		Impresora MSLA de bajo coste compatible con resinas UV 405 nm. Cuenta con una tolerancia de ±0,03 mm una resolución de 2560 x 1440 píxeles, capaz de imprimir con alturas de capa de 35 micras. Adecuada para prototipos con geometrías pequeñas [1].
Phrozen Mini 8K **(ULPGC)**		Impresora MSLA de alta resolución 8K con pantalla LCD monocromática de 7.1" (7500 × 3240 px), capaz de imprimir con precisión de 22 micras/píxel y capas de hasta 10 micras. Ideal para microestructuras de alta definición [294].

Sin embargo, a medida que se avanzó en el desarrollo de texturas de menor escala, se hizo evidente la necesidad de un equipo con mayor resolución. Por ello, se incorporó la Phrozen Mini 8K, cuyo rendimiento y precisión permitieron abordar diseños con geometrías complejas y microdetalles críticos. Dado que esta impresora no incluye software propio, se recurrió al uso de Chitubox Basic, una plataforma de slicing robusta y adaptada a impresoras de resina de alta resolución [293]. La Figura 3.15 muestra su interfaz principal.

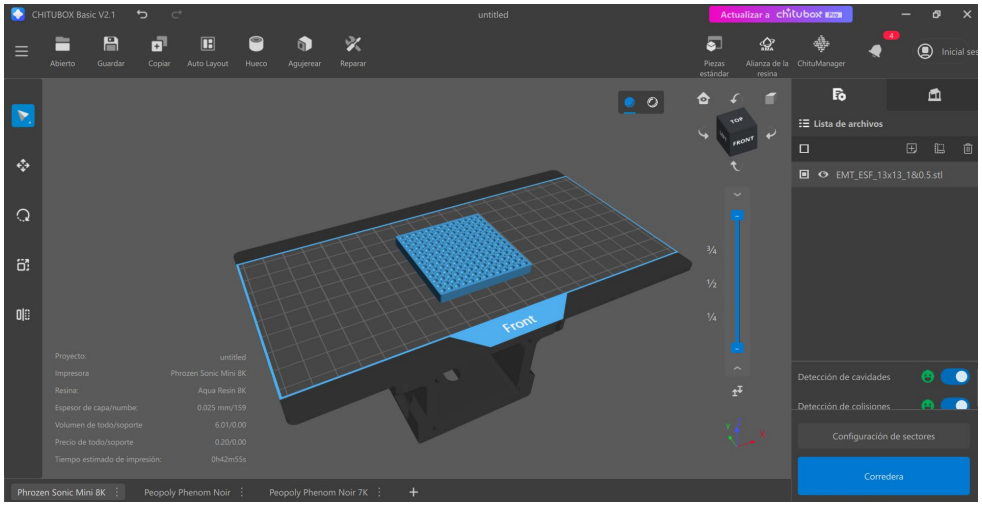


Figura 3.15. Interfaz del programa Chitubox.

3.2.2.2. Materiales

La elección de la resina es un aspecto crítico en impresión MSLA, ya que influye directamente en la calidad superficial, la rigidez estructural y la fidelidad dimensional. En esta investigación se emplearon dos resinas:

- **Wanhao Standard Resin Clear**: Resina transparente utilizada para facilitar la visualización directa del crecimiento de la cáscara metálica durante el electroconformado. Sus parámetros de impresión se recogen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas para impresión con resina Whanhao Clear.

Parámetros	Parámetros	Valores
Información básica	Altura de capa (mm)	0.025
	Velocidad de retracción (mm/min)	150
Capas inferiores	Capas inferiores	4
	Tiempo(s) de exposición (seg)	40
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Capas normales	Tiempo(s) de exposición (seg)	10
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Espera durante impresión	Tiempo de descanso después de retractar(es)	3

- **Phrozen Aqua 8K 3D Printing Resin:** Resina optimizada para equipos 8K, empleada para obtener microtexturas de alta resolución. Gracias a su compatibilidad directa con el equipo, se utilizaron los parámetros recomendados por el fabricante, validados experimentalmente. Se resumen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas para impresión con resina Phrozen Aqua 8K.

Parámetros	Parámetros	Valores
Información básica	Altura de capa (mm)	0.025
	Velocidad de retracción (mm/min)	150
Capas inferiores	Capas inferiores	4
	Tiempo(s) de exposición (seg)	35
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Capas normales	Tiempo(s) de exposición (seg)	2
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Espera durante impresión	Tiempo de descanso después de retractar(es)	3

La combinación de las resinas Wanhao Clear y Phrozen Aqua 8K permitió abordar distintos requerimientos dentro del proceso experimental: la primera proporcionó transparencia óptica para observaciones visuales durante el electroforming, mientras que la segunda ofreció la precisión geométrica necesaria para la fabricación de patrones texturizados de alta resolución. Esta sinergia entre equipo y materiales constituyó un elemento fundamental en la obtención de piezas modelos fiables y técnicamente adecuadas para los objetivos de esta Tesis.

3.2.2.3. Postprocesado

En este estudio se implementó un riguroso protocolo de postprocesado, diseñado para reforzar la reproducibilidad dimensional y la calidad funcional de las microestructuras generadas. Este protocolo incluyó fases controladas de limpieza y curado, realizadas con equipos específicos que aseguran la homogeneidad del tratamiento.

La aplicación de este protocolo permitió:

- Obtener superficies limpias, libres de imperfecciones y residuos, favoreciendo la reproducción fiel de las texturas diseñadas.
- Aumentar la resistencia estructural y la durabilidad de las piezas modelo.
- Reducir la variabilidad entre lotes de impresión, mejorando la reproducibilidad en la generación de texturas microestructuradas.
- Facilitar la integración de las piezas en procesos posteriores como el electroconformado, al proporcionar una base precisa y estable para el crecimiento metálico.

Para ello se emplearon los equipos descritos en la Figura 3.16.



a) b) c)

Figura 3.16. Equipos para el postprocesado en MSLA: a) Phrozen Wash Station (ULPGC); b) Phrozen Ultra-Sonic Cleaner (ULPGC); c) Phrozen Cure Kit (ULPGC).

Las características de estos equipos son las siguientes:

1. **Phrozen Wash (Estación de Lavado por Vórtice):** Diseñada para la limpieza eficiente de piezas impresas en resinas fotopoliméricas, esta estación incorpora un sistema de agitación por vórtice dentro de un tanque con alcohol isopropílico. Esto permite la eliminación de residuos de resina en superficies complejas sin comprometer la integridad estructural de la pieza.
2. **Phrozen Ultra-Sonic Cleaner (Equipo de Limpieza Ultrasónica):** Funciona mediante la generación de cavitación por ondas ultrasónicas de alta frecuencia, lo que facilita la remoción de resina residual en cavidades y microtexturas de difícil acceso. Su mecanismo de limpieza no abrasiva conserva la definición de estructuras detalladas sin provocar daños en la superficie.
3. **Phrozen Cure Kit (Estación de Curado y Secado):** Este sistema integra un ciclo de secado previo y una cámara de curado UV de alta intensidad, asegurando una polimerización uniforme de las piezas. Su diseño optimizado permite un curado homogéneo en todas las caras del objeto, garantizando estabilidad mecánica y dimensional en las microtexturas.

Se diseñó un protocolo que permitió obtener superficies completamente limpias y libres de defectos, lo cual es esencial para preservar la fidelidad de las texturas diseñadas.

3.2.3. Electroconformado

El valor principal de esta investigación se basa en la aplicación del proceso de electroconformado como técnica principal para la fabricación de herramientas microtexturizadas.

Para garantizar la eficacia del proceso, ha sido necesario integrar una serie de equipos especializados en distintas etapas: desde la metalización inicial de la superficie no conductora de las piezas modelo, hasta el propio sistema de deposición electroquímica.

3.2.3.1. Metalización por pulverización catódica

Para este trabajo se seleccionó la técnica de pulverización catódica (sputtering) como ya se ha indicado en la metodología. En un primer momento, y siguiendo la metodología de la tesis que precede a este trabajo, se empleó el SC7620 Mini Sputter Coater (Figura 3.16a), disponible en el Servicio de Metrología y Calibración de la ULPGC. Sin embargo, durante su uso, se evidenció que este equipo presentaba problemas de uniformidad en la capa metálica, lo que afectaba negativamente a la calidad del recubrimiento.

Ante la imposibilidad de mejorar dicho comportamiento, se buscó colaboración con otras instituciones que contaban con equipos de sputtering similares (véase Figura 3.16). Gracias a esta cooperación interinstitucional fue posible continuar con el trabajo experimental sin comprometer la precisión textural. Las colaboraciones se establecieron con:

- **El Jardín Botánico Viera y Clavijo**, que proporcionó acceso al equipo Cressington 108 Auto, el cual, al ser automático, ofrecía mayor control sobre el proceso. Esta colaboración permitió estudiar variables críticas como la distancia ánodo-cátodo y los efectos de distintos sistemas de recirculación del baño electrolítico.
- **La Universidad de La Laguna (ULL)**, a través de su Servicio General de Apoyo a la Investigación, donde se empleó el modelo Q150R ES Plus de Cressington. Este equipo permitió ejecutar los últimos ensayos de la tesis, aquellos enfocados al análisis del efecto de la pantalla protectora aplicada al cátodo.



a) b) c)

Figura 3.17. Equipos de sputtering: a) SC7620 Mini Sputter Coater (ULPGC); b) Cressington 108 Auto Sputter Coater (Jardín botánico Viera y Clavijo); c) Q150R ES Plus (ULL).

3.2.3.2. Electroconformado

Una vez metalizada la superficie de la pieza modelo, ya se puede introducir en el sistema de electroconformado, donde actúa como cátodo en la electrodeposición de cobre. Al inicio del proyecto, se empleó el equipo original desarrollado en la tesis de Sánchez (véase Figura 3.18), un sistema de laboratorio funcional para producir cáscaras de cobre [1].

No obstante, a lo largo de esta investigación se detectaron limitaciones operativas en el sistema inicial, especialmente en lo relativo al control de variables críticas como el comportamiento del baño electrolítico, derivado de un sistema de agitación poco eficiente y de fallos frecuentes en la bomba de recirculación. Además, se observó que la uniformidad de las cáscaras obtenidas era mejorable, especialmente en geometrías complejas. Para superar estas limitaciones y mejorar la calidad del proceso, se llevó a cabo un rediseño del sistema, descrito en detalle en el Capítulo 5.

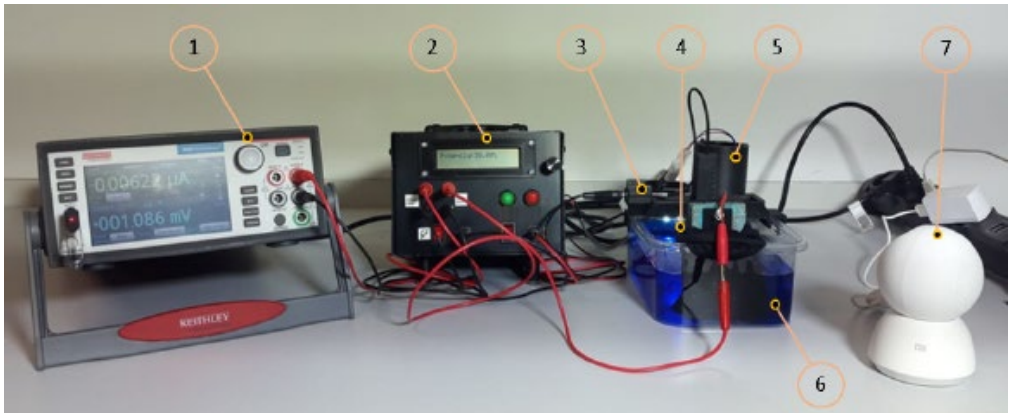


Figura 3.18. Equipo de microelectroconformado de partida. Obtenido de [1].

Este nuevo sistema incorpora un conjunto de mejoras funcionales, como un doble tanque con recirculación activa, sistema de filtrado e incorporación de nuevo sistema de bombeo, entre otros, permitiendo estudiar con mayor rigor el efecto de diversos parámetros del proceso (véase Figura 3.19).



Figura 3.19. Equipo de electroconformado desarrollado.

3.2.4. Electroerosión por penetración

Una vez obtenidas las cáscaras de cobre mediante el proceso de electroconformado, se llevó a cabo su validación funcional a través de ensayos de SEDM, como se ha indicado en el apartado de metodología.

Durante la fase inicial de la investigación, se realizaron los primeros ensayos en el equipo de SEDM disponible en la Universidad de Cádiz (Figura 3.20a) y en la fase final se realizaron nuevos ensayos con el equipo disponible en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.



a) b)

Figura 3.20. Equipos SEDM: a) ONA Serie "DB 300" (ULPGC); b) ONA Serie "NX3" (UCA).

La utilización de dos sistemas de SEDM distintos permitió analizar el rendimiento de las cáscaras en dos entornos diferentes del mismo proceso de fabricación, lo cual enriquece el valor comparativo de los resultados y fortalece la validez de la metodología empleada y de los resultados obtenidos.

3.2.5. Inspección y medición durante el proceso

El control metrológico ha desempeñado un papel esencial a lo largo de esta investigación, aportando información valiosa de cada fase del proceso de generación de electrodos microtexturizados. Dada la complejidad de las geometrías implicadas y la escala micrométrica de muchas de las texturas diseñadas, ha sido necesario implementar un enfoque multimodal de inspección, que combina

técnicas ópticas 2D, análisis de topografía tridimensional, sistemas de medición por coordenadas, análisis funcional de las superficies.

Con este fin, se han empleado numerosos equipos tanto de la ULPGC como de la UCA, seleccionados en función del tipo de inspección requerida en cada etapa. La Tabla 3.4 resume los equipos utilizados en esta tesis.

Tabla 3.4. Equipos empleados para inspección y medición durante el proceso.

Nombre	Imagen	Características
Microscopio MitutoyoTM-1005B **(ULPGC)**		Microscopio óptico de medición para inspección visual y análisis dimensional básico. Cuenta con iluminación LED ajustable y platina XY con opciones de 50x50 mm o 100x50 mm, ideal para entornos de laboratorio donde se requiere inspección dimensional preliminar [1].
Microscopio estereoscópico Leica S9 E **(UCA)**		Microscopio estereoscópico con zoom 9:1 y cámara integrada para inspección de detalle superficial. Incorpora tecnología FusionOptics que mejora la profundidad de campo y permite una distancia de trabajo de 122 mm, facilitando el análisis de piezas voluminosas [2].
Microscopio de fluorescencia Olympus BX51, con cámara de microscopio digital DP72 **(ULPGC)**		Microscopio de fluorescencia Olympus BX51 con cámara digital DP72, ideal para el análisis de texturas superficiales en alta resolución. Equipado con torreta de fluorescencia de 6 posiciones, sistema óptico UPLANFL y cabezal trinocular. La cámara DP72 permite capturas de imágenes de ultra alta resolución (hasta 9 veces el detalle convencional) mediante desplazamiento subpixelar [4].
Microscopio de foco variable Infinite Focus G5 + **(UCA)**		Microscopio óptico 3D de ultra alta precisión que permite el análisis topográfico y geométrico con resolución vertical de hasta 10 nm. Ideal para medir rugosidades (hasta 0.03 µm), formas complejas y defectos en microestructuras. Incorpora tecnologías como SmartFlash, Real3D y MetMaX para una inspección completa de superficies desde múltiples ángulos [5].
Máquina de medición por coordenadas Mitutoyo Crysta-Plus M443 **(ULPGC)**		Máquina de medición por coordenadas (CMM) con estructura de puente y mesa de granito. Ofrece mediciones precisas en los ejes X, Y y Z con resolución de 0,1 µm. Dispone de escalas a prueba de polvo, rodaduras de aire autoajustables y software MCOSMOS con compensación de temperatura.
Rugosímetro Mitutoyo SJ-201P **(ULPGC)**		Rugosímetro de contacto portátil para análisis de rugosidad superficial (Ra, Rz, Rt, Rq). Usa un palpador de diamante de 2 µm con presión de 0,75 mN, ideal para evaluar el acabado de superficies erosionadas. Ofrece visualización gráfica del perfil y valores numéricos con alta sensibilidad.

Tabla 3.5. Equipos empleados para inspección y medición durante el proceso. Continuación.

Nombre	Imagen	Características
Instrumento de medida de ángulo de contacto DMe-211Plus **(ULPGC)**		Equipo para medir ángulo de contacto y caracterizar propiedades hidrofóbicas/hidrofílicas. Ofrece una resolución de hasta 0,01° y una precisión de ±0,3°.
Báscula de precisión Mettler-Toledo AB204-S **(ULPGC)**		Equipo analítico diseñado para pesajes de alta precisión. Tiene una capacidad máxima de 220 g, con legibilidad de 0,1 mg, calibración interna automática, y cabina de vidrio para proteger la muestra. Presenta un tiempo de estabilización rápido (~3,5 s), lo que la hace adecuada para tareas que requieren exactitud y eficiencia en el pesaje.

Para llevar a cabo una caracterización más detallada de las microtexturas, se utilizó el microscopio de foco variable 3D InfiniteFocus G5+ de Alicona. Para analizar superficies con la información aportada por este equipo se ha usado el software MountainsMap. Consiste en una plataforma de análisis y tratamiento de superficies desarrollada específicamente para la interpretación de datos obtenidos mediante técnicas de medición óptica o táctil [378]. Este software permite generar reconstrucciones topográficas tridimensionales a partir de nubes de puntos, facilitando la extracción de parámetros metrológicos clave conforme a estándares internacionales, como la norma ISO 25178 para superficies 3D. Entre sus funcionalidades destacan el filtrado inteligente de ruido, la segmentación de estructuras geométricas, y el cálculo de parámetros de rugosidad, forma y textura con elevada fiabilidad. Gracias a estas prestaciones, MountainsMap ha sido una herramienta básica para los estudios dimensionales desarrollados en esta investigación, asegurando un análisis cuantitativo preciso y trazable de las superficies microtexturizadas evaluadas [379]. Un ejemplo de la interfaz de usuario se muestra en la Figura 3.21.

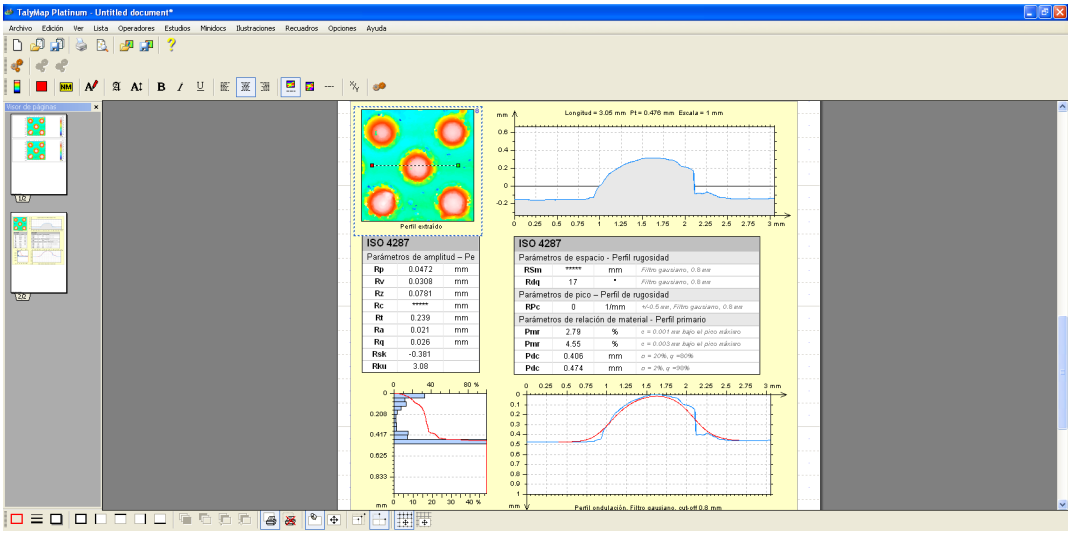
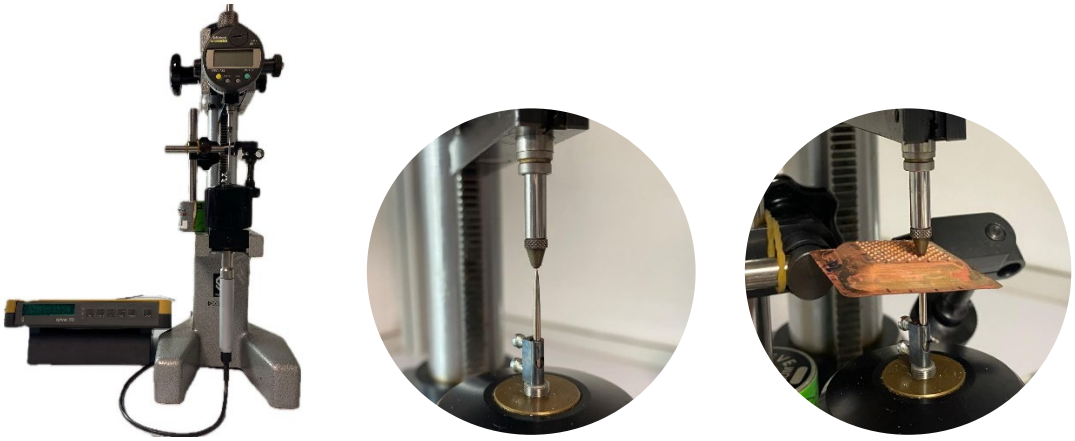


Figura 3.21. Ejemplo de uso del programa MountainsMap® con textura de semiesferas.

Para la medición del espesor de las cáscaras electroconformadas, especialmente en zonas críticas como cavidades profundas, se utilizó un comparador mecánico Mitutoyo ID-C112B, montado sobre

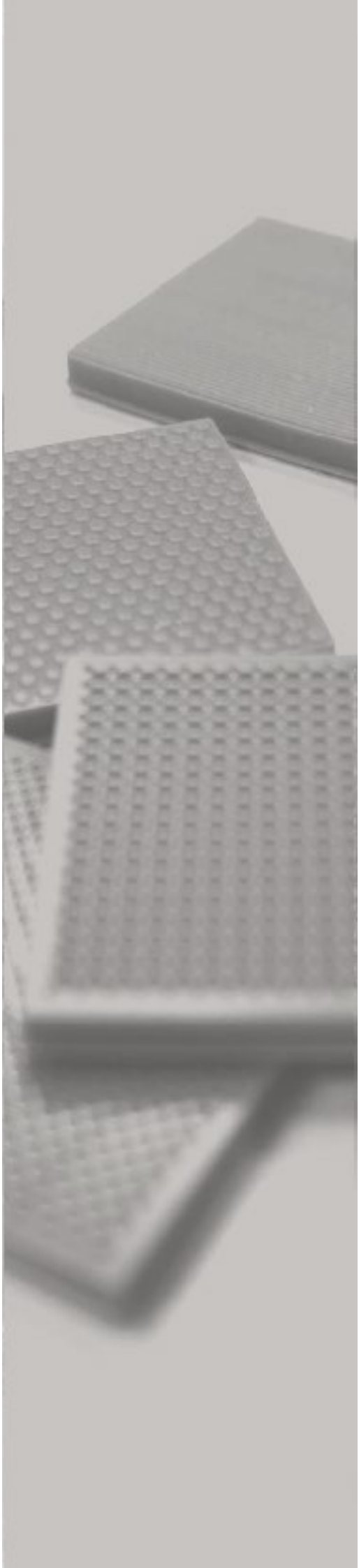
un banco de verificación específico. Dado que los palpadores convencionales no permiten acceder a las microgeometrías diseñadas con precisión, se diseñó un útil de medición personalizado: una aguja de máquina de coser adaptada como palpador, que puede introducirse en áreas de difícil acceso sin comprometer la integridad del electrodo, tal y como se ilustra en la Figura 3.22.



a) b) c)

Figura 3.22. a) Banco con el comparador; b) Vista inferior del conector modelado; c) Aguja hipodérmica adaptada como palpador de contacto.

Este sistema de medición, de desarrollo propio, ofreció resultados altamente precisos y fue clave para validar la geometría final de las cáscaras como herramientas funcionales para SEDM.



CAPÍTULO IV

Diseño y fabricación de piezas modelo

4. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS MODELO

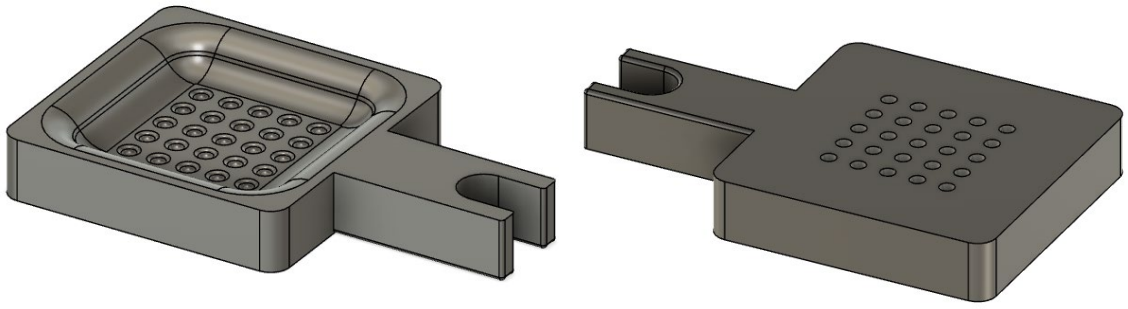
Tal como se ha expuesto en el capítulo anterior, la primera etapa del proceso combinado que se propone consiste en la fabricación de la pieza modelo, la cual constituye un elemento esencial en la estrategia de replicación texturizada. Este componente, portador de la microtextura a transferir, puede concebirse con una función específica o bien responder a fines estéticos, en función de los objetivos que se persigan.

4.1. Diseño de partida

El diseño de partida fue previamente desarrollado en el contexto de la tesis doctoral titulada *"Desarrollo de un equipo de micro-electroconformado. Estudio experimental de aplicación a la fabricación de herramientas"*. En ese trabajo de investigación previo se abordó la texturización de superficies estructuradas mediante un prototipo funcional que permitió la realización de ensayos experimentales y la validación operativa del sistema de microelectroconformado.

La continuidad metodológica entre ambos trabajos, los cuales se enmarcan en el proyecto de investigación "RETO", ha motivado la conservación del diseño original de la pieza modelo utilizado para la implementación de la microtextura. Esta decisión ha favorecido la cooperación técnica con la Universidad de Cádiz, entidad que participa activamente en la realización de esta tesis mediante el acceso al equipamiento ya mencionado.

El diseño adoptado corresponde al denominado modelo funcional Evo 4, la versión más avanzada obtenida en el marco de los desarrollos anteriores. En esta versión se resolvieron diversas problemáticas asociadas a la acumulación de residuos de resina, especialmente en las zonas de geometría semiesférica presentes en modelos anteriores. Para mitigar este inconveniente, se incorporaron microperforaciones cónicas de 250 µm de diámetro mínimo en las superficies texturizadas, las cuales atraviesan completamente el espesor del componente hasta alcanzar su cara posterior. Esta modificación geométrica se traduce en una mejora significativa de la evacuación de resina y en la estabilidad del proceso de replicación. La geometría resultante puede observarse en la Figura 4.1.



a) b)

Figura 4.1. Modelo funcional Evo 4 de partida: a) vista de perspectiva de la pieza; b) ilustración de la cara posterior con perforaciones pasantes.

4.2. Consideraciones de diseño y rediseño del electrodo

El diseño y posterior rediseño de la pieza modelo destinada al proceso de *electroforming* representa una etapa crucial para asegurar tanto la funcionalidad como la calidad de las cáscaras de cobre obtenidas. Esta fase implica identificar oportunidades de mejora sobre el diseño original, teniendo

en cuenta, además, las particularidades técnicas de los procesos de fabricación aditiva que se emplearán. En este apartado se abordan los principios clave de diseño asociados a la tecnología MSLA, así como las estrategias implementadas para optimizar el rendimiento y eficiencia de la pieza modelo.

4.2.1. Consideraciones de diseño

El desarrollo de piezas mediante tecnologías aditivas requiere un enfoque integral que contemple desde las limitaciones del proceso hasta las necesidades funcionales del producto final.

En esta investigación, en el diseño de la pieza modelo hay que considerar que se quiere fabricar con ella una cáscara por electroconformado, y este proceso introduce consideraciones de diseño mucho más restrictivas que las propias de la Fabricación Aditiva. Los radios de redondeo amplios en el contorno son motivados para evitar la atracción de bordes y aristas vivas, y facilitar que la zona funcional de la pieza modelo se vea penalizada. Esta zona tiene que estar en plano más bajo que el borde para que al montar la cáscara en el portaelectrodos, esta sobresalga del mismo. Se han reducido al mínimo estas diferencias de altura entre estos planos, pero teniendo en cuenta que la superficie del portaelectrodos debe mantenerse separado una distancia suficiente de la superficie a erosionar.

A continuación, se detallan las principales consideraciones aplicadas al rediseño de la pieza modelo.

1. **Resolución y tamaño mínimo de las texturas**
    - Las texturas deben adaptarse a los límites de resolución de la tecnología MSLA, evitando defectos derivados de la dispersión de luz o de las limitaciones del proyector.
    - Es fundamental que los detalles sean lo suficientemente grandes para reproducirse con fidelidad, previniendo la aparición de bordes difusos que comprometan la calidad final.
2. **Reducción de irregularidades superficiales**
    - Se aplicaron ajustes al diseño para minimizar imperfecciones superficiales que podrían interferir en la liberación de la cáscara tras el electroforming.
    - Se consideraron técnicas de postprocesado como la limpieza ultrasónica para optimizar el acabado superficial y mejorar el rendimiento funcional.
3. **Orientación de las estructuras y uso de soportes**
    - La orientación de la pieza se definió para eliminar el uso de estructuras de soporte, evitando marcas no deseadas.
4. **Optimización del grosor y estabilidad estructural**
    - Se buscó un balance entre la reducción de material y la rigidez de la pieza. Las piezas más delgadas son más susceptibles a deformaciones.
5. **Precisión dimensional en zonas críticas**
    - Se consideraron las tolerancias propias del proceso MSLA, realizando ajustes que compensen posibles contracciones o deformaciones durante el curado.
6. **Compatibilidad de las resinas empleadas**
    - El diseño y la elección del material garantizaron la mejora de la resistencia mecánica y estabilidad térmica.

7. **Uniformidad en la adhesión del recubrimiento conductor**
    - Se diseñaron superficies que favorecen una aplicación homogénea del recubrimiento, evitando acumulaciones o vacíos que afecten el proceso de *electroforming*.
8. **Control de deformaciones térmicas**
    - Se evaluó el comportamiento térmico del material durante el curado, eligiendo resinas con bajo coeficiente de expansión térmica para mantener la precisión dimensional.
9. **Verificación de detalles funcionales y texturas pequeñas**
    - Se analizaron cuidadosamente los elementos de las microtexturas para asegurar que no se obstruyan ni generen contrasalidas en la extracción de la cáscara final.

Estas consideraciones guiaron un rediseño orientado a dos objetivos principales: ampliar la variedad y definición de texturas a escala microscópica, y reducir el uso de material sin sacrificar estabilidad ni funcionalidad. Este enfoque no solo optimiza recursos, sino que mejora las propiedades técnicas de las cáscaras obtenidas.

4.2.2. Rediseño pieza modelo

El rediseño de la pieza modelo se enfocó principalmente en reducir el uso de material. Esta metodología integra tecnologías complementarias para la fabricación de electrodos para EDM, permitiendo mayor rapidez, menor consumo de insumos y geometrías más complejas que las posibles con métodos tradicionales.

Siguiendo esta lógica de mejora continua, se implementó una reducción del espesor de la pieza modelo de 8 mm a 6 mm. Este ajuste fue posible dado que el área central, donde se aplica la texturización, no requiere profundidades superiores a 1 mm. Los 2 mm restantes permiten conservar la integridad estructural sin afectar la funcionalidad ni las texturas aplicadas (ver Figura 4.2).

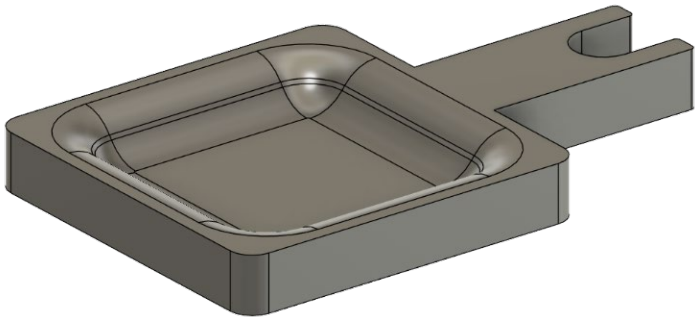


Figura 4.2. Pieza modelo rediseñada con espesor reducido.

Durante los ensayos iniciales, se desarrolló una variante simplificada de la pieza modelo totalmente plana y sin texturas, cuyo objetivo fue evaluar la deposición metálica sin la influencia de la textura. Esta versión conservó únicamente el área de contacto con el ánodo para poder emplear los mismos sistemas del equipo de electroforming. Se muestra en la Figura 4.3.

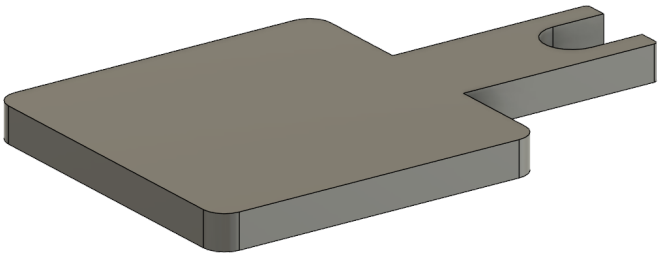
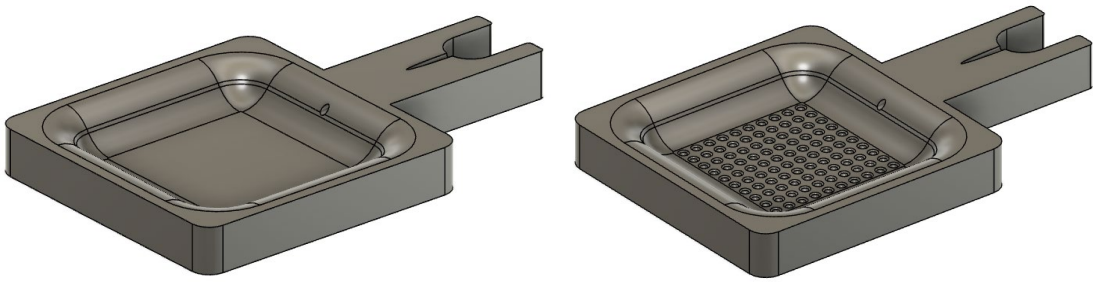


Figura 4.3. Pieza modelo plana (Modelo EMT_P_0).

En esta etapa se detectaron problemas de continuidad en el contacto eléctrico con la fina capa de metalizado de la superficie activa en la zona de sujeción de la pieza modelo. Como primera solución, se incorporó un canal que conecta el mango de la pieza con la superficie texturizada para insertar un hilo de cobre, que mejoró significativamente la conductividad y la fiabilidad del proceso de electroconformado (Figura 4.4).



a) b)

Figura 4.4. Pieza modelo: a) geometría base sin textura (Modelo EMT_C_0); b) Pieza modelo texturizada (Modelo EMT_T1).

Sin embargo, con el avance de los ensayos, se identificó un nuevo desafío: el hilo de cobre, al tener cierta libertad de movimiento, generaba fricción con la superficie interna de la pieza modelo y en la zona de sujeción. Este roce eliminaba parte de la capa conductora, ocasionando fallos en la deposición de cobre. Ante esta situación, se diseñó un nuevo sistema de sujeción para estas piezas modelo que permitió simplificar esa geometría de la zona de contacto y eliminar esta problemática. El nuevo diseño del electrodo presentó un mango completamente rectangular, eliminando los elementos rebajados que generaban inestabilidad. Este rediseño definitivo, que se muestra en la Figura 4.5, se adoptará para las siguientes etapas de la investigación.

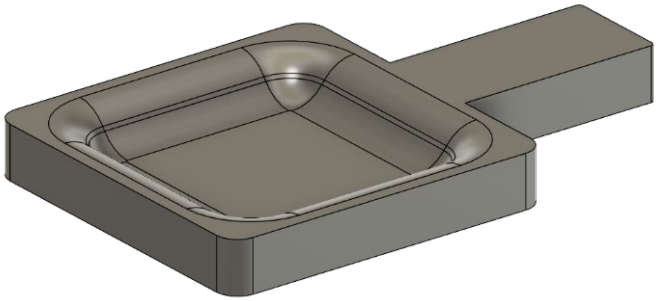


Figura 4.5. Pieza modelo definitiva.

La incorporación y diseño de microtexturas en superficies funcionales constituyen un área de investigación de creciente relevancia, al posibilitar la optimización de propiedades mecánicas, la mejora del rendimiento funcional y la creación de experiencias sensoriales sofisticadas. Para abordar este campo, en esta investigación se propone una clasificación de las texturas en tres categorías fundamentales: geométricas, bioinspiradas y estéticas, cada una orientada a satisfacer demandas específicas que abarcan desde la eficiencia técnica hasta el atractivo visual.

Las texturas geométricas se fundamentan en patrones matemáticos repetitivos, los cuales confieren propiedades estructurales particulares a la superficie. Por otro lado, las texturas bioinspiradas se derivan de soluciones evolutivas presentes en la naturaleza y se adaptan a las exigencias tecnológicas actuales, mientras que las texturas estéticas se centran en potenciar la interacción usuario-producto, enfatizando la percepción sensorial. Esta división no solo permite un análisis más profundo de cada tipo de textura, sino que también subraya su importancia en aplicaciones industriales y de diseño [1–4].

En el diseño de patrones texturizados, el concepto de repetición se define por la reiteración de un módulo geométrico básico, lo cual facilita la generación de configuraciones ordenadas. El patrón estructural más básico es la cuadrícula: una serie de líneas verticales y horizontales separadas por la misma distancia que se cruzan entre sí. Sus líneas, nodos o espacios resultantes ofrecen la posibilidad de ubicar elementos en ellos para generar un texturizado. La variación en proporción, dirección, desplazamiento o curvatura de la cuadrícula permite a su vez generar infinitas configuraciones diferentes que establezcan nuevos patrones estructurales para la generación de texturizados. En contraposición a los patrones estructurales, que son composiciones ordenadas y formales [5,6], también se puede hacer uso de patrones aleatorios. Los patrones aleatorios son aquellos que no son predecibles a simple vista y en los que no es posible reconocer la secuencia que los determina. Estos pueden ser generados de forma digital, introduciendo un número de variables tal que su disposición da la ilusión de estar determinada por el caos [6]. Estos patrones son especialmente interesantes desde el punto de vista del diseño, ya que permiten la creación de diseños orgánicos. El uso de estas estructuras puede ser la base de una propuesta de texturizado, combinada con el uso de diferentes geometrías.

4.3.1. Selección de texturas

En los siguientes apartados se describirán los diseños desarrollados para cada uno de los grupos de texturas. Se puede apreciar la diversidad de enfoques y la versatilidad de las técnicas aplicadas en la generación de microtexturas para superficies funcionales.

4.3.1.1. Geometrías geométricas

Las texturas geométricas se caracterizan por patrones matemáticos regulares y repetitivos, como polígonos, fractales o redes modulares. Estos diseños se emplean en diversas aplicaciones industriales debido a su capacidad para mejorar propiedades estructurales, como la distribución uniforme de tensiones, la reducción de peso y el control de fenómenos dinámicos como vibraciones o absorción de energía [3,7].

La simetría y la periodicidad son principios clave que maximizan la eficiencia del material, proporcionando un balance entre funcionalidad y estética. Por ejemplo, estudios sobre metamateriales han demostrado cómo patrones geométricos pueden generar estructuras ligeras y resistentes, ideales para su uso en arquitectura, robótica y diseño de productos avanzados [8,9].

Estas texturas pueden clasificarse en dos grandes categorías según su configuración en la superficie: en bajo relieve, donde los patrones se graban o hunden en el material, y en sobre relieve, donde las texturas se elevan sobre la superficie base. Las texturas en bajo relieve se emplean para mejorar la

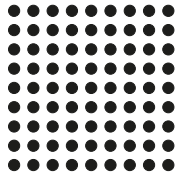
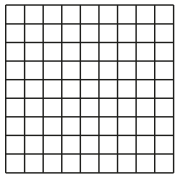
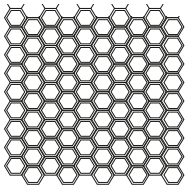
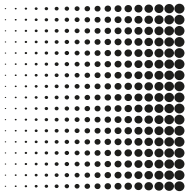
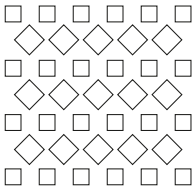
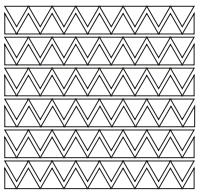
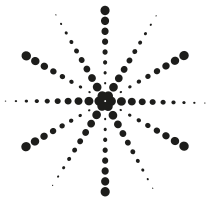
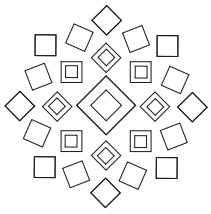
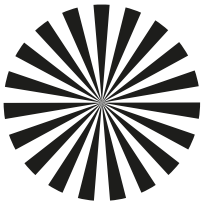
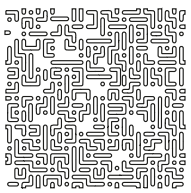
aerodinámica y reducir la fricción en fluidos, como ocurre en aplicaciones de transporte o ingeniería marina [10]. Por otro lado, las texturas en sobre relieve son utilizadas para incrementar la resistencia al desgaste, la tracción o la adherencia, siendo comunes en superficies funcionales como herramientas o componentes robóticos [11,12].

El potencial de las texturas geométricas se amplifica al combinar diferentes patrones en una misma superficie, generando efectos sinérgicos que optimizan múltiples propiedades. Ejemplos notables incluyen:

- Texturas bimodales: combinan patrones grandes y pequeños para maximizar la interacción con fluidos mientras se reduce la fricción [13].
- Híbridos de bajo y sobre relieve: aplicados en herramientas de corte para mejorar tanto la durabilidad como la capacidad de evacuación de materiales.
- Gradientes geométricos: superficies donde los parámetros de los patrones varían gradualmente, adaptándose a diferentes requerimientos funcionales en una sola pieza [8].

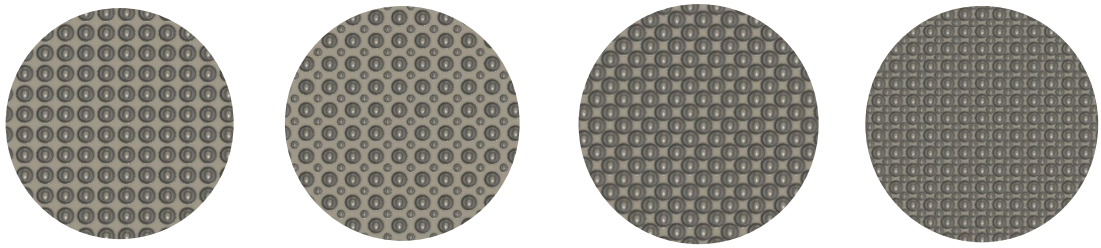
Las texturas geométricas, ya sean en bajo o sobre relieve, ofrecen soluciones multifacéticas para abordar desafíos en la ingeniería de superficies. Su capacidad para combinar patrones y personalizar propiedades funcionales las convierte en elementos esenciales para sectores como la energía, la fabricación avanzada y la biomecánica, demostrando su impacto transformador en la optimización de productos y procesos. Es por ello por lo que teniendo esto en cuenta a continuación en la Tabla 4.1 se muestran las primeras texturas desarrolladas teniendo en cuenta los elementos geométricos como base para la generación de las mismas.

Tabla 4.1. Ejemplos de texturas geométricas aplicadas en las piezas modelo.

Texturas geométricas			
Círculos	**Cuadrados**	**Triángulos**	**Otros**
			
			
			

Un aspecto ventajoso de este grupo de microtexturizados reside en que, al estar conformadas por elementos geométricos básicos, dichas texturas pueden ser modificadas de forma ágil mediante programas de diseño vectorial básicos, lo que posibilita una adaptación rápida del diseño y la obtención de múltiples configuraciones en cuestión de minutos, sin necesidad de generar los elementos en 3D directamente en la pieza modelo. Una vez se han analizado y se han completado los diseños en formato 2D, estos se importan a Fusion 360. En este último paso se incrementa aún más las posibilidades, puesto que cada textura puede extruirse en positivo, en negativo o mediante la combinación de ambas opciones, ampliando de manera significativa el abanico de soluciones

disponibles para este grupo de microtexturas. En la siguiente Figura 4.6 se pueden observar un ejemplo de diferentes combinaciones de texturizados aplicando semiesferas entrantes y salientes.



a) b) c) d)

Figura 4.6. Combinaciones de texturizados aplicando semiesferas: a) semiesferas de 1 mm; b) semiesferas de 1 mm y 0.5 mm; c) semiesferas de 1 mm; d) semiesferas de 1 mm y 0.5 mm.

4.3.1.2. Geometrías bioinspiradas

Las texturas bioinspiradas adoptan patrones derivados de la naturaleza, diseñados para optimizar propiedades como la hidrofobicidad, la fricción controlada, la aerodinámica y la autolimpieza. Estas texturas replican estructuras presentes en hojas de loto, pieles de reptiles, conchas marinas y escamas de peces, entre otros ejemplos [11,14].

Un enfoque destacado en este campo es el uso de texturas en relieve para superficies hidrofóbicas, que imitan las propiedades autolimpiantes. Por otro lado, las texturas en bajo relieve son empleadas en aplicaciones de reducción de resistencia al flujo, como en aerodinámica, donde se optimiza la interacción con fluidos sin comprometer la estabilidad estructural [10,11]. Estas soluciones, adaptadas de sistemas naturales altamente eficientes, encuentran aplicaciones en ingeniería de materiales, transporte y diseño industrial, proporcionando herramientas innovadoras para abordar desafíos tecnológicos complejos [10,11].

Si bien, con la fabricación aditiva se podría conseguir replicar a niveles micro la gran mayoría de formas complejas de la naturaleza, para este trabajo se ha tenido que hacer una selección de aquellas cuyo diseño permiten posteriormente una adecuada generación y extracción de la cáscara de cobre, pues elementos como las asperezas diseñadas para replicar el pie de los geckos sería imposible de realizar, ya que al contener un elemento cilíndrico de mayor diámetro en la parte superior de la espiga, se generarían interferencias geométricas que imposibilita la extracción de la cáscara, tal y como se ilustra en la Figura 4.7.

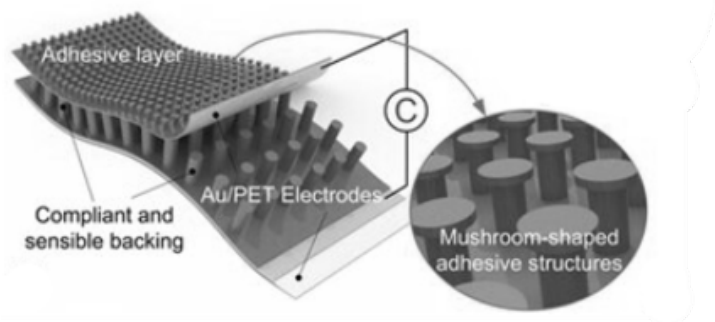


Figura 4.7. Características de los pies de los geckos. Imagen modificada de [15].

Es por ello que fue necesario hacer una selección de las diferentes propuestas establecidas, valorando diversos aspectos como pueden ser: facilidad de diseño, originalidad, estética, funcionalidad, viabilidad para convertirse en cáscara electroconformada. En la Tabla 4.2. se presentan las diferentes

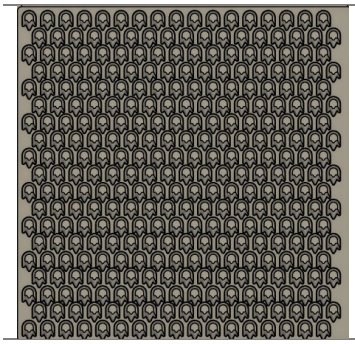
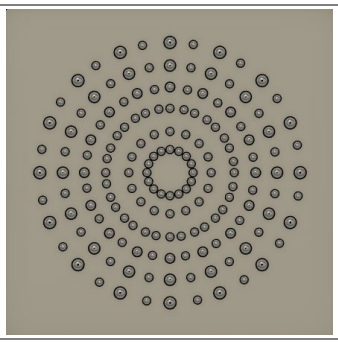
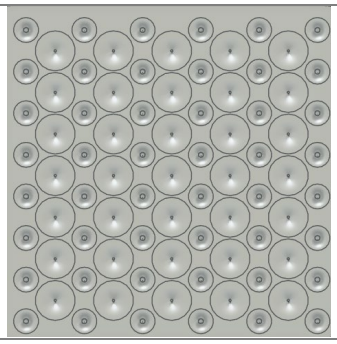
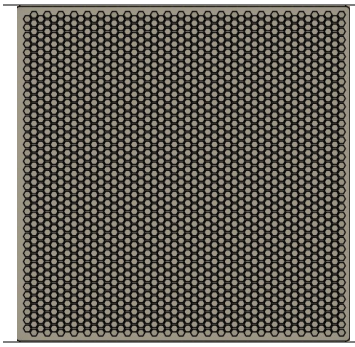
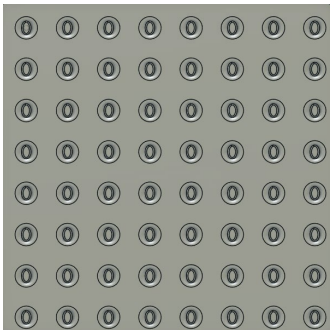
propuestas y la valoración del grado de adecuación para cada una, donde "1" es poco o nada, "2" es algo y "3" es mucho.

Tabla 4.2. Clasificación de las posibles texturas bioinspiradas a realizar.

		Dificultad	Funcionalidad	Estética	Originalidad	Viabilidad FA	Viabilidad Electroforming
Animales	*Piel de tiburón*	3	3	3	3	3	3
	Pie de gecko	2	3	3	3	3	1
	Tentáculo pulpo	1	3	3	3	3	2
	Piel escarabajo	1	3	1	2	3	3
	Ala mariposa	1	3	3	3	1	1
	Ojo mosquito	1	3	2	3	3	3
	Erizo de mar	1	1	2	2	3	3
Plantas	*Fresa*	1	1	3	3	3	2
	Hoja de loto	1	3	1	1	3	3
	Yaka	3	1	3	3	3	3
	Piña canaria	3	1	3	3	3	1
	Piel de aguacate	2	1	1	3	3	3
Otros	*Panal de abeja*	1	3	3	1	3	3
	Voronoi	1	1	3	1	3	3
	Telaraña	1	3	3	3	3	3

A continuación, en la Tabla 4.3. se ilustran algunas de las texturas seleccionadas con la imagen de referencia y el diseño llevado a cabo directamente en Fusión 360.

Tabla 4.3. Ejemplos de texturas bioinspiradas aplicadas en las piezas modelo.

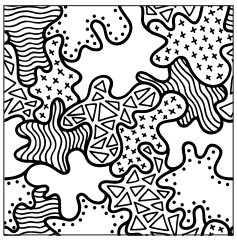
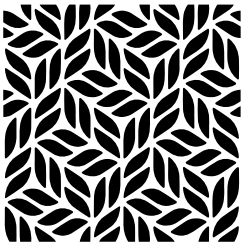
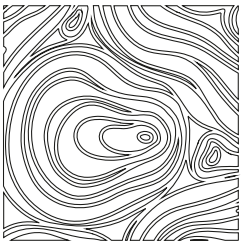
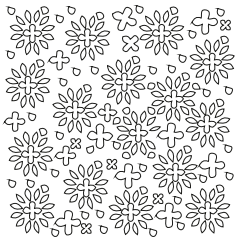
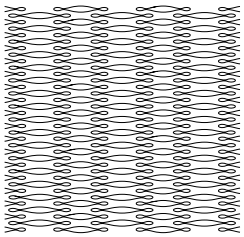
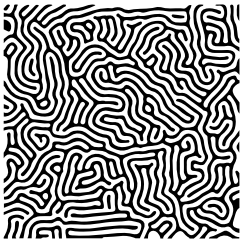
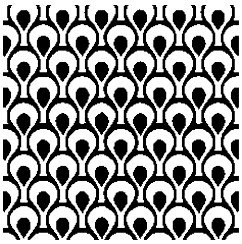
Texturas bioinspiradas		
Texturizado	**Elemento**	Texturizado
		
Piel de tiburón	Erizo de mar	Piel de escarabajo
		
Panal de abeja	Beta madera	Fresa

4.3.1.3. Geometrías estéticas

Las texturas estéticas, por su parte, priorizan el impacto visual y táctil de las superficies, creando conexiones emocionales entre el usuario y el producto. Estas texturas se diseñan para mejorar la experiencia sensorial del usuario, influyendo en su percepción y aumentando la satisfacción mediante patrones atractivos y tactos agradables [4,16].

Investigaciones en percepción y diseño han demostrado cómo elementos como la rugosidad controlada o la suavidad de las superficies pueden generar respuestas emocionales positivas, fomentando la interacción prolongada con los objetos [4,17]. Además, estas texturas desempeñan un papel importante en la diferenciación de marcas y en el diseño de experiencias multisensoriales, aportando valor añadido a productos comerciales [4,16]. En la Tabla 4.4 se ilustran algunos de los diseños desarrollados en este marco.

Tabla 4.4. Ejemplos de texturas estéticas aplicadas en las piezas modelo

Texturas estéticas			
			
			

Es importante destacar que, aunque el desarrollo de texturizados estéticos no constituye el foco principal de esta tesis—dado que se ha otorgado mayor relevancia al estudio y desarrollo de microtexturas con funcionalidad específica—, cualquier diseño estético se elabora inicialmente en dos dimensiones, siguiendo el mismo rigor metodológico aplicado a los texturizados geométricos, y posteriormente se replica en tres dimensiones sobre el área funcional de la pieza modelo.

4.4. Rediseño de microtexturas empleando herramientas paramétricas

El diseño inicial de micro texturas, descrito previamente, proporcionó una base sólida para la fabricación de electrodos. Sin embargo, se identificó la necesidad de implementar un sistema que permitiera ajustar estas texturas a diferentes escalas sin tener que reiniciar el diseño desde cero. Este enfoque no solo optimiza el tiempo de desarrollo, sino que también incrementa la flexibilidad y la adaptabilidad del diseño frente a nuevos requisitos geométricos o funcionales.

En este contexto, se adoptaron herramientas paramétricas avanzadas que facilitan la modificación precisa de texturas mediante la variación de parámetros definidos. A continuación, se describe el uso de estas herramientas y su impacto en el rediseño y mejora de las micro texturas.

4.4.1. Herramientas paramétricas

El acceso a información gráfica en formato digital resulta crucial para la fabricación de productos mediante las tecnologías y procesos mencionados previamente. Esto se debe a que algunos métodos, como la estereolitografía, utilizan directamente esta información digital. Los avances tecnológicos recientes han facilitado la creación de soluciones digitales que abordan problemas convencionales, transformando significativamente el ámbito del diseño. Entre estas innovaciones, destaca el diseño paramétrico, que ha revolucionado las metodologías de diseño al introducir herramientas flexibles y eficientes.

El diseño paramétrico se basa en la definición de parámetros que determinan las características de un diseño. Al variar estos parámetros, el diseño se adapta y modifica automáticamente dentro del sistema establecido [17]. Por ejemplo, en una circunferencia definida por su centro y radio, cualquier cambio en estos valores generará una nueva configuración geométrica. Esta capacidad para realizar modificaciones en cualquier etapa del proceso es una de las principales ventajas del diseño paramétrico frente al diseño digital convencional. Además, al estar el diseño determinado por un conjunto de parámetros y no por su forma estática, es posible adaptarlo fácilmente a nuevas escalas o requisitos específicos.

En el contexto del desarrollo de microtexturas, el diseño paramétrico permite realizar ajustes precisos en las características geométricas, optimizando tanto el tiempo de diseño como la flexibilidad en las etapas posteriores. Por ejemplo, tras el desarrollo inicial de las texturas descritas en capítulos anteriores, se identificó la necesidad de mejorar el diseño para facilitar su escalado sin reiniciar el proceso desde cero. Este enfoque permite una reducción significativa del tiempo requerido, aumentando la eficiencia en la adaptación a nuevos requisitos o geometrías.

4.4.1.1. Software paramétrico: Rhinoceros 7 +plug-in Grasshopper

En este trabajo, se utilizó Rhinoceros 7, un software de diseño asistido por computadora (CAD) especializado en modelado tridimensional. Rhinoceros 7 es ampliamente empleado en áreas como la arquitectura y la joyería debido a su capacidad para generar y modificar formas complejas de manera sencilla y eficiente. Entre las ventajas más destacadas de este programa se encuentra su compatibilidad con complementos (plug-ins) gratuitos, que amplían sus funcionalidades mediante la incorporación de módulos y herramientas específicas.

Uno de estos complementos es Grasshopper, un lenguaje de programación visual integrado en Rhinoceros (véase Figura 4.8). Grasshopper utiliza bloques gráficos interconectados que definen parámetros y operaciones, permitiendo el desarrollo de sistemas paramétricos de diseño [19]. Este enfoque es especialmente útil en la generación de microtexturas, ya que facilita la creación de geometrías complejas y su manipulación mediante funciones matemáticas.

Para este trabajo, se desarrolló una metodología en Grasshopper basada en la clasificación de bloques en tres categorías principales:

- **Parámetros:** Bloques que permiten establecer valores fijos o variables, como números, texto o coordenadas.
- **Geometría:** Bloques encargados de generar formas bidimensionales o tridimensionales, como puntos, superficies o sólidos.
- **Operaciones:** Bloques que modifican las geometrías existentes, realizando acciones como extrusión, duplicación o escalado.

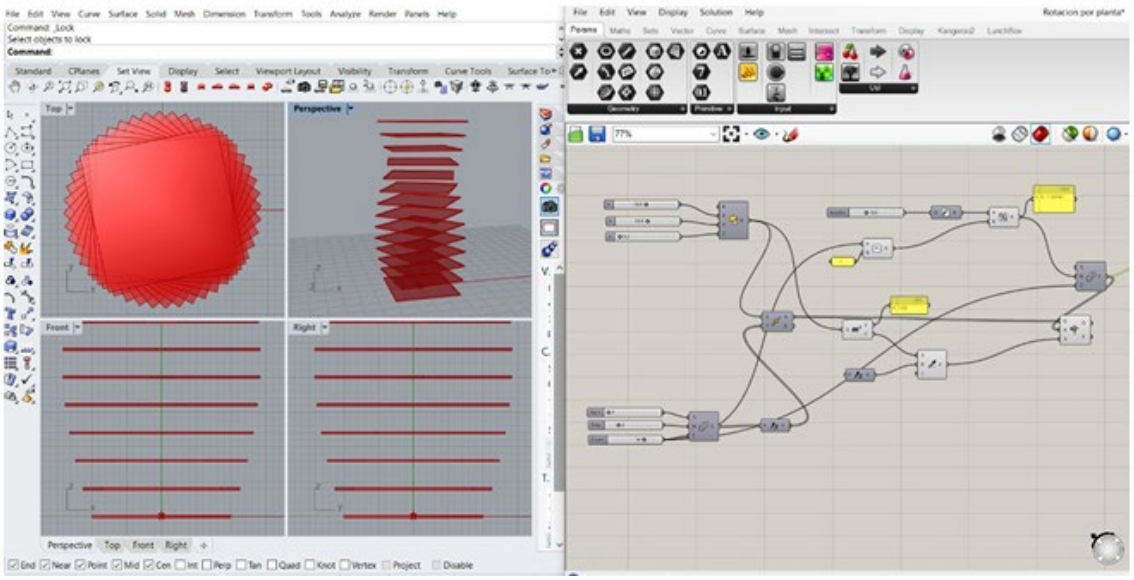


Figura 4.8. Plug-in de Grasshopper integrado en Rhinoceros.

La integración de Grasshopper y Rhinoceros permite una visualización directa de las geometrías generadas, además de la posibilidad de transferir elementos entre ambos entornos, tal y como se ilustra en la Figura 4.7, donde la pantalla de la izquierda representa el entorno de visualización de Rhinoceros y el de la derecha el de programación mediante Grasshopper. Este sistema flexible y visual es ideal para el diseño paramétrico de texturas, ya que permite ajustar parámetros clave de forma dinámica y eficiente.

4.4.2. Diseño de metodología

Dado el limitado número de recursos bibliográficos en el ámbito del diseño industrial enfocado al texturizado superficial, ya sea estético o funcional, y especialmente aquellos relacionados con el diseño paramétrico y la biomimética, surge la necesidad de crear material que sirva como guía. Este material busca ser una referencia para el desarrollo de texturizados que utilicen dichas técnicas y tecnologías avanzadas de fabricación.

En este contexto, como parte de la investigación desarrollada en esta Tesis, se llevó a cabo la tutorización de un Trabajo Fin de Grado que abordó el establecimiento de una metodología específica para la generación de texturizados superficiales tanto funcionales como estéticos. Este trabajo, titulado *"Desarrollo De Texturizados Superficiales Estéticos Y/O Funcionales"*, se desarrolló una metodología basada en el uso de herramientas paramétricas y principios biomiméticos [18], integrando ejemplos prácticos que demuestran las aplicaciones y el potencial de estas técnicas. A continuación, se presenta una descripción sintética de dicha metodología.

Para alcanzar los resultados esperados en el diseño de superficies texturizadas, es imprescindible seguir una metodología que permita la abstracción y la replicación de estructuras naturales. En los últimos años, se han propuesto diversas metodologías de diseño fundamentadas en principios biomiméticos; no obstante, ninguna de estas ha sido sistematizada o regulada. Estas metodologías suelen compartir etapas similares y se basan en principios comunes, como se sintetiza en la Figura 4.9.

Tras una revisión bibliográfica realizada, se ha identificado una carencia notable en cuanto a estudios, metodologías específicas y ejemplos prácticos relacionados con el desarrollo de texturizados superficiales mediante diseño paramétrico. Aunque los avances en biomimética han generado un notable interés en el análisis de superficies y estructuras naturales microscópicas, los resultados

obtenidos en este ámbito han sido, hasta el momento, insuficientes para abordar de manera integral el diseño y fabricación de texturizados funcionales o estéticos.

En la actualidad, no existe una metodología estandarizada que establezca pautas claras para la generación de texturas superficiales, ya sea con fines funcionales o estéticos. Además, los ejemplos prácticos que combinan técnicas avanzadas de fabricación con principios biomiméticos son limitados. En lo que respecta al diseño paramétrico, aunque su aplicación está ampliamente extendida en disciplinas como la arquitectura, su adopción en el diseño industrial y en el desarrollo de productos sigue siendo incipiente.



Figura 4.9. Metodologías empleadas para diseño biomiméticos. Basado en [19,20].

En este contexto, se ha identificado un vacío significativo en la intersección de tres áreas clave: la biomimética, las tecnologías de fabricación avanzada y las herramientas de diseño paramétrico. Este vacío representa una oportunidad para explorar y desarrollar nuevas metodologías que integren estos campos, ofreciendo un potencial significativo para el diseño y la funcionalidad de texturizados en aplicaciones industriales y de producto.

Cabe señalar que los texturizados superficiales ya cuentan con diversas aplicaciones en la actualidad. Durante la elaboración de esta investigación, se han analizado numerosos casos prácticos con el propósito de comprender y aprender de los desarrollos previos en este ámbito. Un aporte relevante en esta línea es el trabajo de David A. Torreblanca-Díaz y Ever Patiño Mazo, quienes en su obra *"Texturas bioinspiradas y fabricación digital"* [19], publicada por la Universidad Pontificia Bolivariana, exploran el diseño y la generación digital de texturas bioinspiradas mediante herramientas paramétricas como Rhinoceros 7 y Grasshopper.

En su estudio, los autores proponen metodologías generales para el diseño y fabricación de texturas, además de ilustrar sus posibles aplicaciones con ejemplos concretos (véase Figura 4.10). Estos trabajos proporcionan una base valiosa sobre la cual esta investigación busca construir, integrando nuevas aproximaciones metodológicas y explorando aplicaciones innovadoras en la generación de texturizados.



a) b)

Figura 4.10. Aplicación de texturización de superficies. a) Envase; b) Protector modular para motoristas. Obtenido de [19].

- **Metodología empleada**

Esta metodología se divide en etapas definidas que permiten abordar de manera ordenada la generación de texturizados, como se ilustra en la Figura 4.11 del documento original.



Figura 4.11. Metodología desarrollada para el diseño bioinspirado.

Además, se presenta una versión simplificada de este enfoque, como se observa en la Figura 4.12. Esto es trasladable a texturas no bioinspiradas, y en este caso la abstracción de la solución natural no entraría en juego, puesto que, si trabajamos por ejemplo con texturas geométricas, ya se trabaja con formas simples.

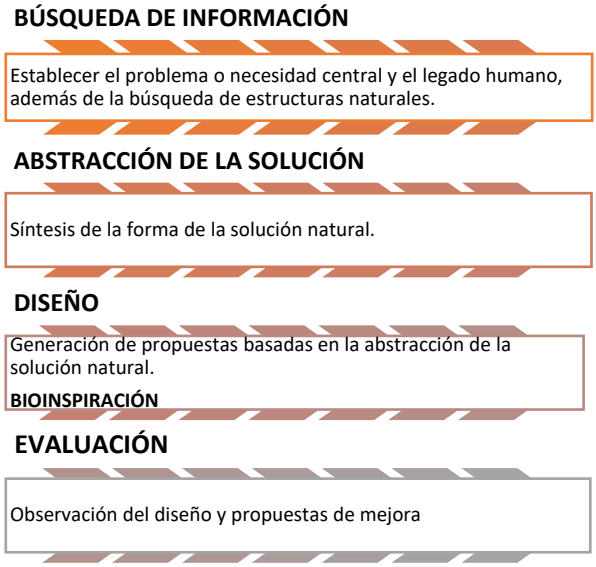


Figura 4.12. Metodología simplificada desarrollada para el diseño bioinspirado.

El uso de herramientas paramétricas, como Rhinoceros y su lenguaje de programación visual Grasshopper, ha sido clave en el desarrollo de este trabajo. Sin embargo, la naturaleza visual y la interfaz en inglés de Grasshopper pueden dificultar el proceso para diseñadores no familiarizados. Por ello, este trabajo propone una metodología específica que organiza y guía la generación de geometrías paramétricas. En la Figura 4.13 se muestra la propuesta utilizada en el mencionado TFG.



Figura 4.13. Metodología para el diseño paramétrico con Rhinoceros y Grasshopper. Desarrollado en [18].

La metodología incluye un esquema que clasifica los elementos de diseño en cuatro categorías principales:

- **Parámetros**: Valores definidos por el usuario que determinan variables clave del diseño.
- **Geometría**: Generación de formas básicas en dos y tres dimensiones.
- **Operaciones**: Transformaciones aplicadas a la geometría existente.

- **Geometría resultante**: Formas finales obtenidas tras aplicar las operaciones.

Esta organización permite optimizar los flujos de trabajo y facilita la comprensión y el manejo de los elementos en el diseño paramétrico, tal y como se ilustra en le Figura 4.14.

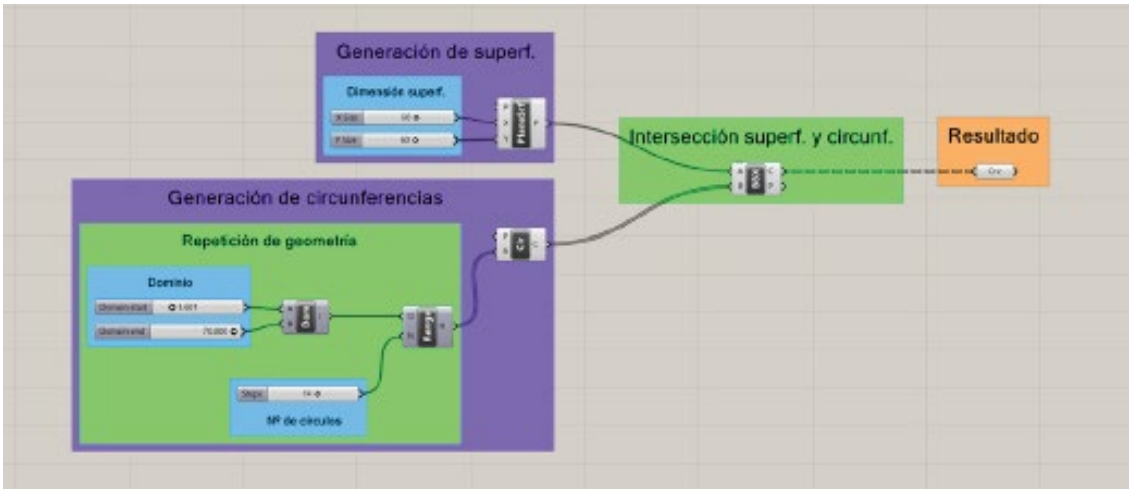


Figura 4.14. Código de colores en Grasshopper. Desarrollado en [18].

4.4.3. Colección de texturas parametrizadas

Tras describir en el apartado anterior la metodología utilizada para la optimización de texturas mediante parametrización, este apartado se centra en las modificaciones realizadas en dos tipologías principales de texturas: las geométricas y las biomiméticas. Estas modificaciones fueron implementadas utilizando herramientas paramétricas avanzadas, lo que permitió una mayor flexibilidad y precisión en el diseño, adaptando las texturas a las necesidades específicas del proceso de fabricación y a las características de las piezas modelo.

Aunque el trabajo se ha realizado consistentemente sobre la pieza modelo base definida al inicio del capítulo, se introdujo un enfoque para optimizar el proceso de diseño y texturización. Para ello, la pieza se dividió en dos componentes: la zona funcional plana, que alberga la textura, y el resto de la geometría de la pieza modelo, que actúa como soporte estructural (Figura 4.15). Esta división tiene como objetivo reducir el peso y la complejidad de la superficie sobre la que se aplican las texturas, facilitando su diseño.

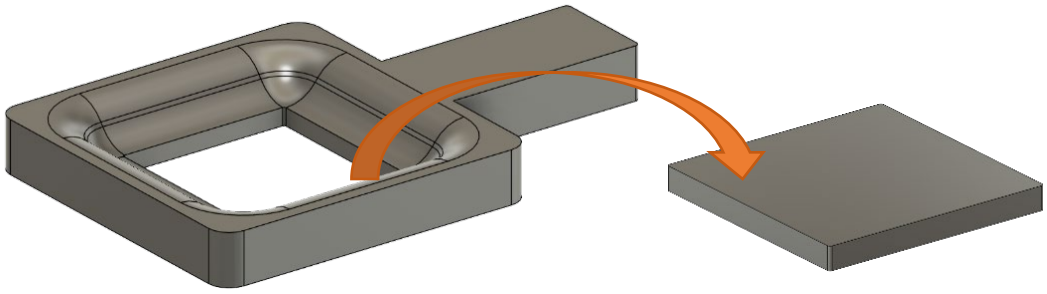


Figura 4.15. Separación de la pieza modelo en dos elementos para facilitar el trabajo de texturización.

El procedimiento adoptado para trabajar en las texturas incluye los siguientes pasos:

1. Diseñar la textura exclusivamente en la zona central funcional separada, garantizando que esta etapa sea independiente del resto de la pieza modelo.

2. Una vez completado el diseño de la textura, se integra nuevamente con el resto de la pieza modelo, uniendo ambos componentes.

3. Exportar el modelo final en formato STL, que incluye tanto la textura optimizada como la estructura completa de la pieza, para su posterior procesamiento y fabricación.

Este enfoque permite una mayor eficiencia en el proceso de diseño, ya que las modificaciones paramétricas realizadas sobre la textura no afectan al resto de la pieza modelo. Además, asegura que los parámetros esenciales para la fabricación, como la resolución y los requerimientos geométricos, se ajusten de manera óptima.

En los apartados siguientes, se detallarán las características específicas de las texturas optimizadas, destacando las ventajas obtenidas mediante el uso de parametrización. En los anexos de este documento de tesis se recogen algunos de los códigos de programación desarrollados.

4.4.3.1. Texturas geométricas

El presente apartado se centra en el desarrollo de texturizados fundamentados en elementos geométricos primarios. Para ilustrar la metodología previamente descrita, se ilustra a continuación un ejemplo representativo: una cuadrícula aleatoria compuesta por cubos de dimensiones variables.

- **Cuadrícula aleatoria**

La propuesta consiste en generar una textura sobre una superficie plana utilizando una cuadrícula de 9×9 celdas, la cual se extruye hacia el exterior para generar un efecto en sobre relieve. Cada celda posee un lado de 2 milímetros, y la altura de cada elemento se asigna de manera aleatoria, variando entre 0,5 y 1,5 milímetros (véase Figura 4.16).

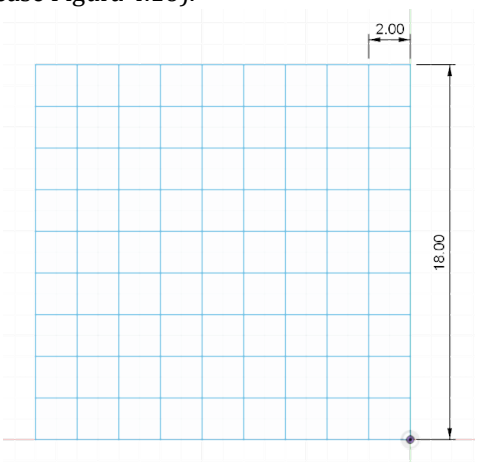


Figura 4.16. Dimensiones de la cuadrícula aleatoria.

El proceso de diseño se inicia con la definición de la superficie destinada al texturizado, que en este caso corresponde a la zona funcional de la pieza modelo. Se establece un punto de referencia en el origen del sistema de coordenadas (0, 0, 0) utilizando el comando correspondiente para construir un punto. Con este punto inicial, se procede a generar la cuadrícula mediante el comando "*square (sd grid)*", configurando las dimensiones de las celdas y la cantidad de elementos en los ejes x e y (véase Figura 4.17).

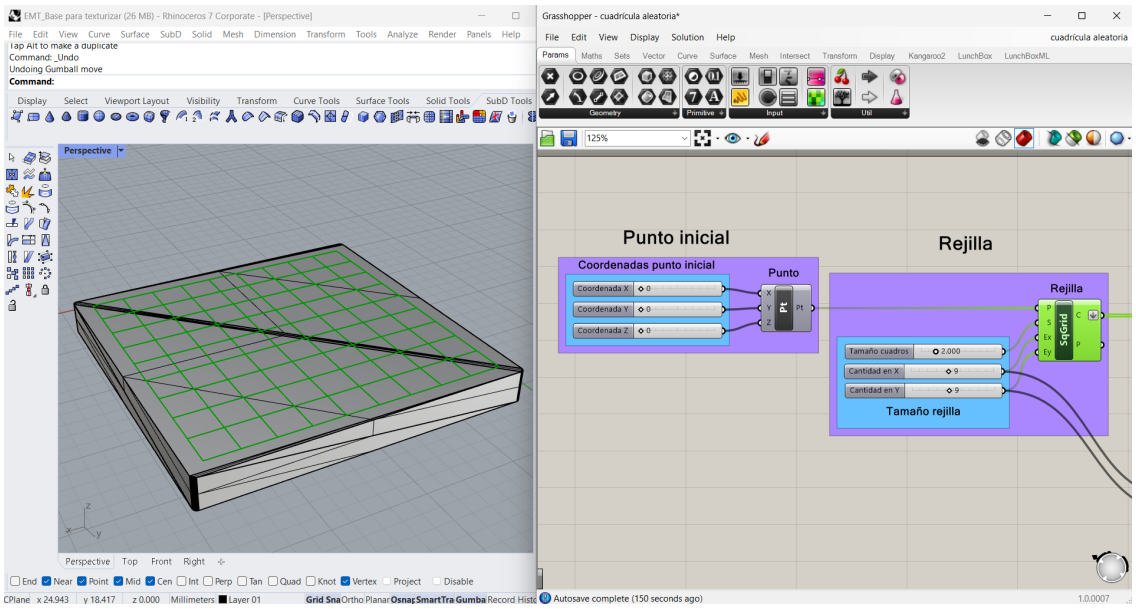


Figura 4.17. Punto inicial y generación de la cuadrícula.

Una vez establecida la cuadrícula, se duplican las celdas para aplicar la extrusión. Se utiliza el comando "*move*" para desplazar cada elemento en la dirección del eje z (hacia arriba), y se introduce la aleatoriedad en la altura mediante el comando "*random*". Este comando permite definir un rango de valores (establecido mediante "*construct domain*" entre 1 y 2,5 milímetros), así como la cantidad de valores (determinada por el número total de celdas, producto de la multiplicación de las cantidades en los ejes x e y). La variación en la altura de los elementos se ilustra en la Figura 4.18.

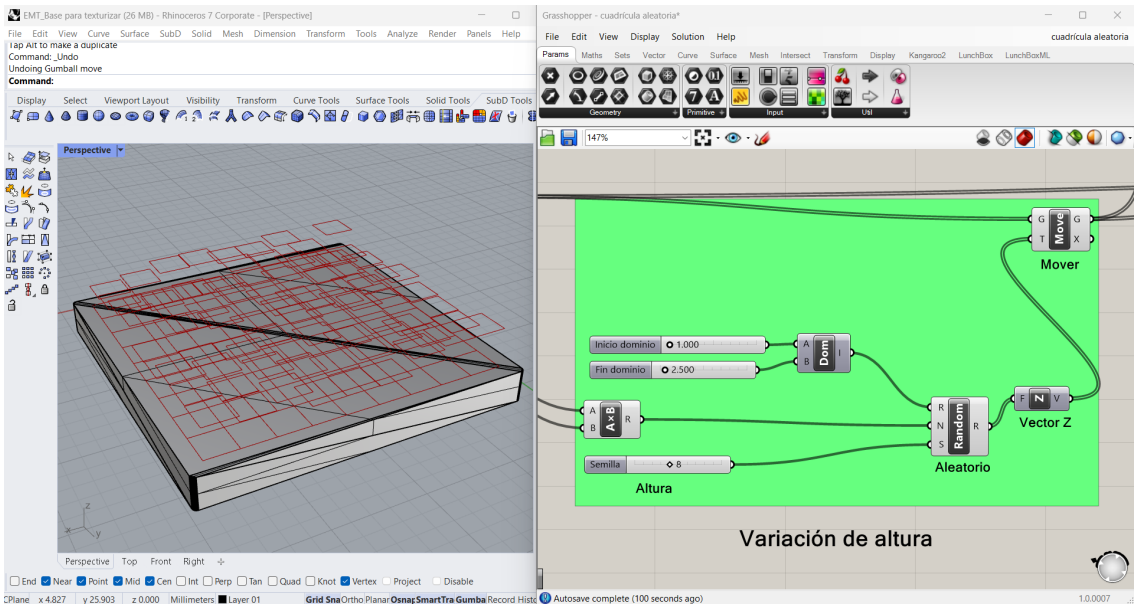


Figura 4.18. Variación de la altura de la geometría.

Posteriormente, se incorpora un componente aleatorio que modifica la orientación de los elementos en los ejes x e y. Para ello, se deconstruye el plano de cada celda utilizando el comando "*deconstruct plane*", obteniéndose el centro de cada uno. A continuación, mediante el comando "*random*" y definiendo un intervalo de variación (entre -10° y 10°) para cada eje, se aplica la rotación correspondiente (véase Figura 4.19).

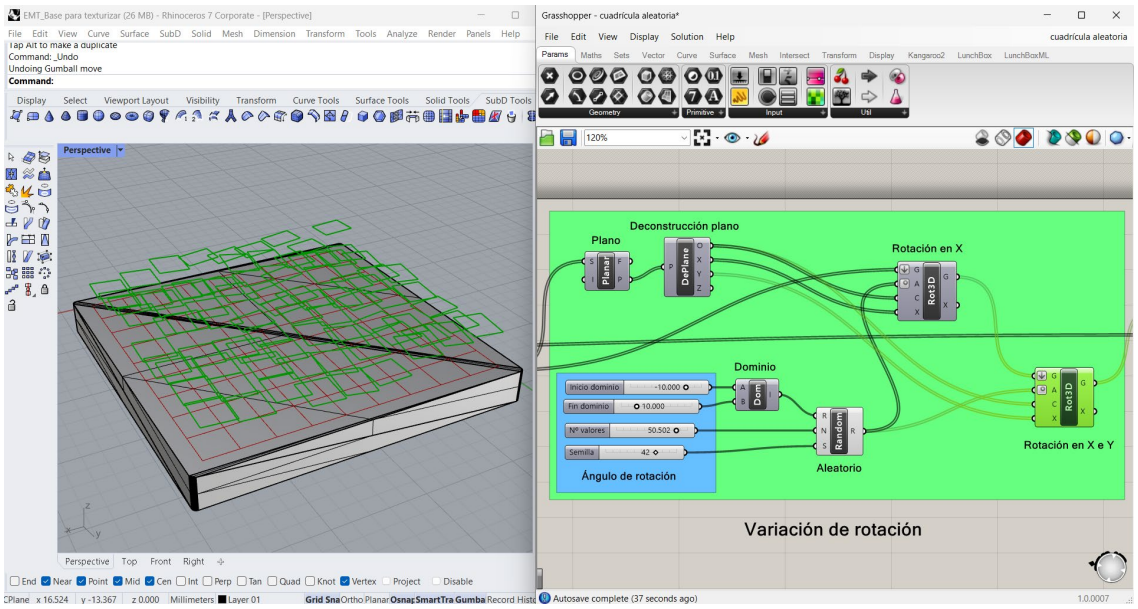


Figura 4.19. Variación de la altura de la geometría.

Para integrar la base original de la cuadrícula con los elementos modificados, se utiliza el comando "*loft*", que permite generar una superficie continua a partir de las curvas obtenidas. Con el fin de eliminar los huecos en las partes superior e inferior de la estructura, se aplica el comando "*cap holes*", obteniéndose así la geometría final del texturizado (véase Figura 4.20).

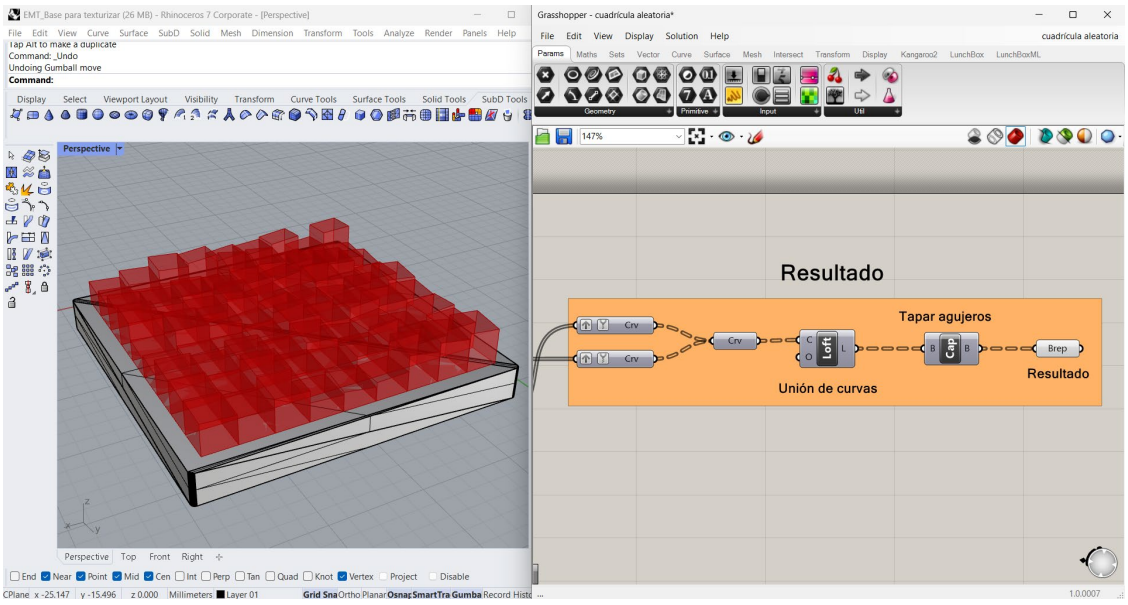


Figura 4.20. Previsualización del resultado final.

La visualización completa del diseño se efectúa mediante el comando "*Brep*", que posibilita la revisión final del modelo. La opción "*Bake*" dentro del comando consolida el diseño en un conjunto de polisuperficies, permitiendo la integración del texturizado con la pieza modelo y facilitando su exportación en formato STL para su posterior fabricación (véase Figura 4.21).

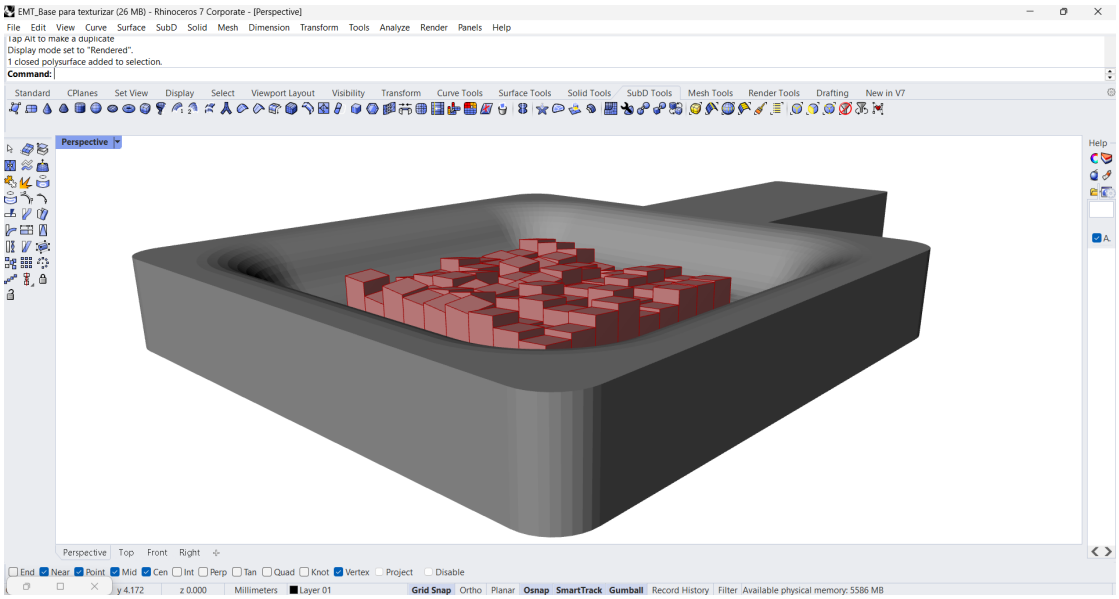


Figura 4.21. Pieza modelo con texturizado parametrizado en Rhinoceros.

El resultado es un texturizado aleatorio caracterizado por un alto grado de variabilidad y personalización, lo que evidencia el potencial de las herramientas utilizadas. Además, la implementación del código resulta concisa y de fácil modificación, permitiendo la rápida generación de diferentes configuraciones de la cuadrícula, como se ilustra en la Figura 4.22.

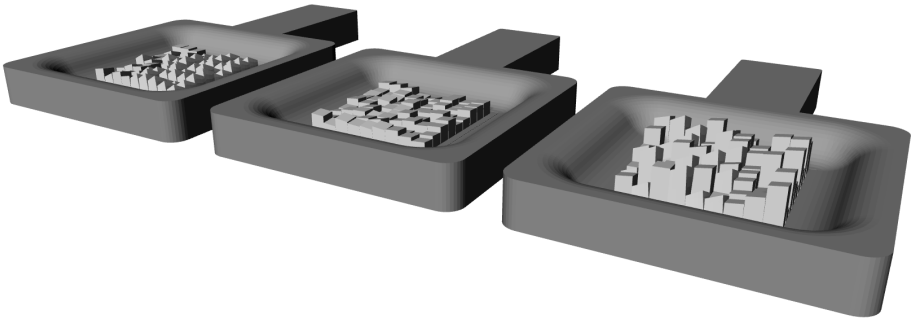


Figura 4.22. Posibles variaciones de la cuadrícula aleatoria.

Con el objetivo de reducir el peso del archivo y centrar el análisis en la zona funcional del electrodo, se ha trabajado únicamente sobre la región interna, de forma que los ejemplos presentados a continuación reflejen exclusivamente el área en la que se aplican los diseños texturizados.

- **Patrón triangular**

El primer ejemplo, ilustrado en la Figura 4.23, se basa en la generación de un patrón de estructuras triangulares utilizando el comando "*substrate*". Este componente posibilita la creación de formas similares a fragmentos de cristal roto, introduciendo un alto grado de aleatoriedad en parámetros como densidad, ángulo de inclinación, desviación y la semilla del elemento generador (valor utilizado para generar aleatoriedad). La variabilidad inherente a este enfoque lo convierte en una herramienta potente para el diseño de texturizados personalizados.

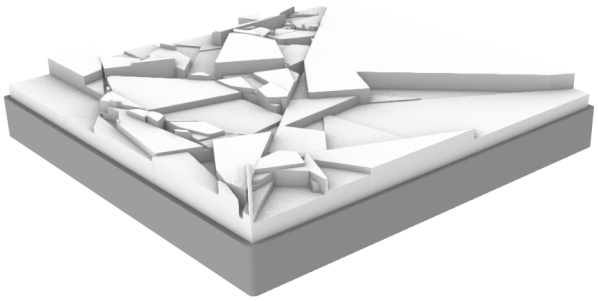


Figura 4.23. Patrón substrate.

En otro ejemplo, se diseñó un patrón triangular con menor aleatoriedad. En este caso, el elemento generador se parametrizó de modo que los triángulos se unieran de forma continua, facilitando así la correcta extracción de la cáscara durante el proceso de electroconformado (véase Figura 4.24). Este enfoque permite mantener la variabilidad inherente del diseño sin sacrificar la integridad estructural necesaria para la aplicación funcional.

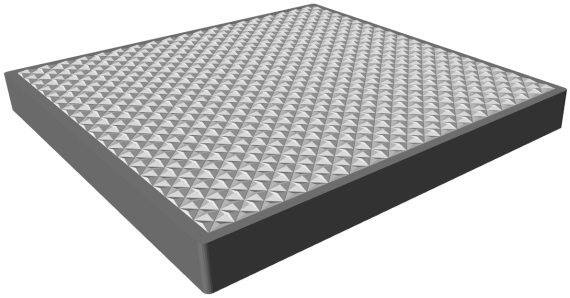


Figura 4.24. Patrón de cuadrícula de elementos triangulares.

- **Patrones mediante paneles de "LunchBox"**

Adicionalmente, se han explorado patrones geométricos obtenidos mediante paneles preestablecidos en Grasshopper, a través del paquete *LunchBox*, que simplifica la creación de retículas mediante algoritmos predefinidos. Estos paneles permiten la generación de retículas simples que facilitan la creación de texturas estéticamente coherentes, con un código de programación básico y, a la vez, optimizan la extracción de cáscaras. En este sentido, se emplearon distintos paneles:

  - **Patrón de Cuadrícula ("*Quad*")**: Este panel genera una matriz de cuadrados uniformes que, mediante ajustes en el tamaño, pueden transformarse en rectángulos. En el ejemplo ilustrado en la Figura 4.25 se observa una retícula homogénea compuesta por cuadrados, demostrando la precisión y uniformidad del diseño.

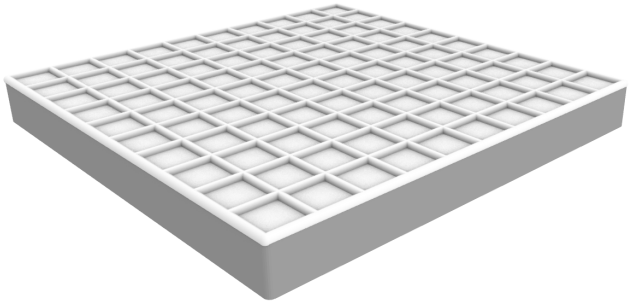


Figura 4.25. Texturizado de cuadrados formada por el panel "*Quad*".

- **Patrón de Cuadrícula Desfasada ("*Staggered Quad*")**: Este panel produce una retícula de rectángulos en la que se introduce el parámetro "semilla" para generar variabilidad en la longitud de los elementos transversales. Tal variación permite formar rectángulos de diferentes dimensiones y ajustar la cantidad de elementos por fila, como se muestra en la Figura 4.26.

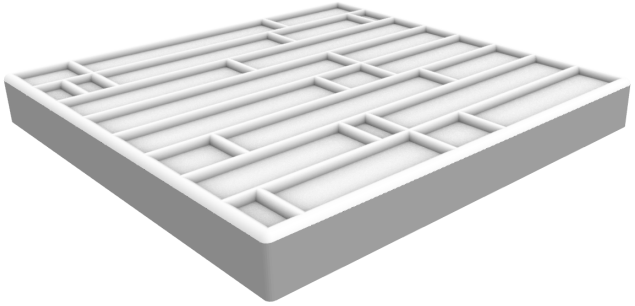


Figura 4.26. Texturizado generado por el panel "*Staggered Quad*".

Asimismo, se han implementado paneles que generan texturas a partir de formas triangulares. Dependiendo de la orientación y el número de triángulos, se pueden obtener soluciones muy variadas. Las Figuras 4.27, 4.28a y 4.28b muestran ejemplos de texturizados obtenidos con los paneles "*Triangular C*", "*Triangular B*" y "*Triangular A*", respectivamente, evidenciando la versatilidad de estos métodos para producir patrones complejos.

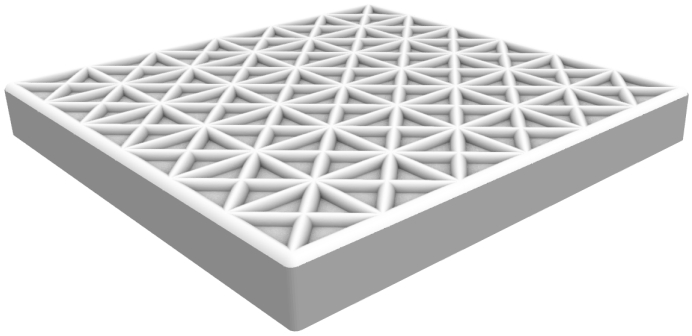
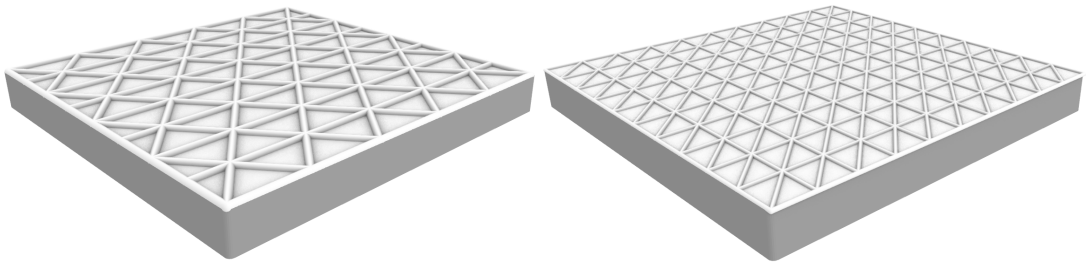


Figura 4.27. Texturizado generado con el panel "*Triangular C*".

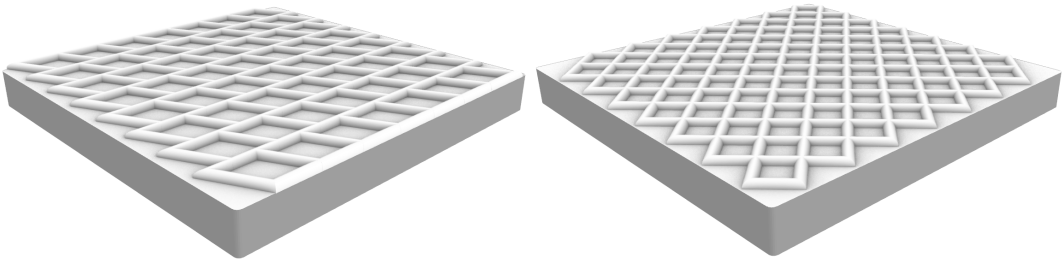


a) b)

Figura 4.28. a) Texturizado generado con el panel "*Triangular B*"; b) Texturizado generado con el panel "*Triangular A*".

Finalmente, se presentaron diseños en los que el elemento generador es el romboide. En el primer caso, se empleó el panel "*Skewed*", donde el parámetro principal fue la inclinación, lo que confirió al diseño un aspecto ladeado (Figura 4.29a). En el otro caso, usando el panel *Diamond*", la única

variación permitida fue en el número de elementos romboides a generar en cada eje de la superficie, resultando en un patrón con distribución homogénea (Figura 4.29b).



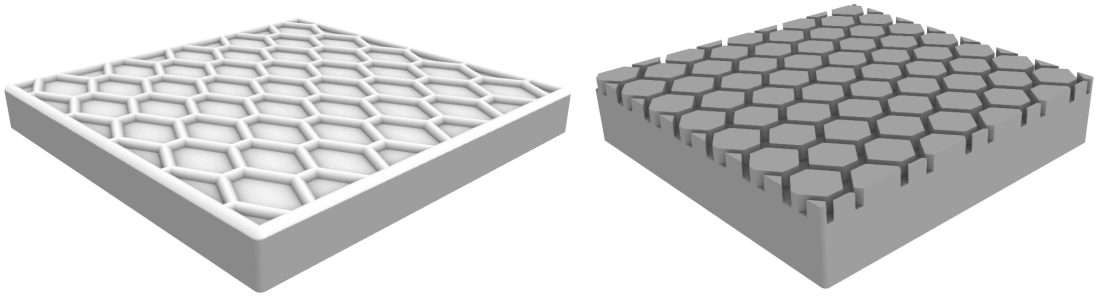
a) b)

Figura 4.29. a) Texturizado generado con el panel "*Skewed*"; b) Textura generada con el panel "*Diamond*".

4.4.3.2. Texturas bioinspiradas

Dentro del grupo de texturas bioinspiradas se han desarrollado diversas propuestas que imitan estructuras presentes en la naturaleza, aprovechando la versatilidad de la parametrización en Grasshopper.

En primer lugar, se implementó una textura inspirada en el panal de abeja. Para ello, se utilizó el panel "*Hexagon Cells*" del paquete *LunchBox*, que genera una retícula de hexágonos sobre la superficie. Este panel permite ajustar el número de hexágonos en cada eje, modificando así la densidad de la retícula. La modalidad de relieve —ya sea bajo o sobre relieve— se obtiene mediante operaciones adicionales. En el caso de un bajo relieve, este se obtiene directamente de la operación generada en Grasshopper; mientras que para obtener un sobre relieve, se aplica una operación booleana que sustrae un sólido, dejando los hexágonos en una posición destacada respecto al fondo (véase Figura 4.30).



a) b)

Figura 4.30. a) Texturizado generado con el panel "*Hexagon*" bajo relieve; b) Textura generada con el panel "*Hexagon*" sobre relieve.

Posteriormente, se desarrolló un texturizado basado en la estructura de Voronoi. Este enfoque consiste en generar una estructura matemática a partir de una colección de puntos distribuidos aleatoriamente sobre la superficie, utilizando el comando *populate geometry* para definir la densidad y su "semilla". La integración del comando de Voronoi permite ajustar el número de elementos únicos y su grado de aleatoriedad. Además, la introducción de patrones de atracción, que alteran la densidad local de puntos, posibilita obtener geometrías con un aspecto más orgánico y variable, tal como se ilustra en la Figura 4.31.

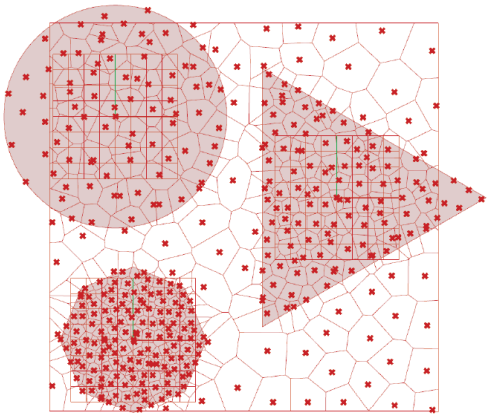
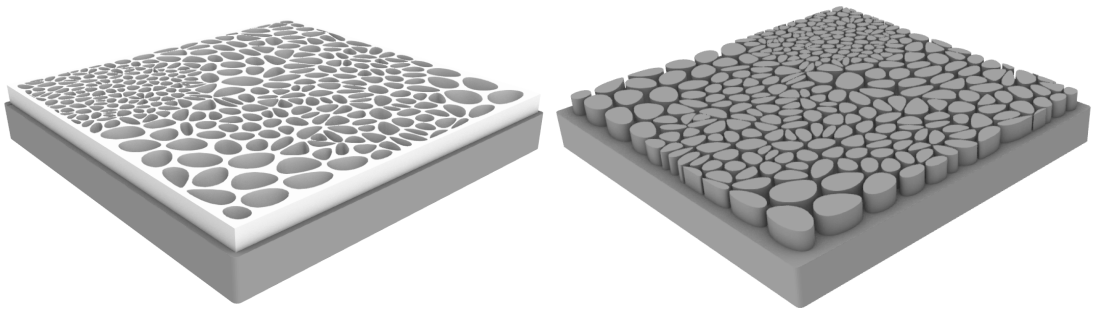


Figura 4.31. Áreas de atracción de Voronoi. Obtenido de [18].

Como se evidencia en la Figura 4.32, el resultado de esta propuesta es un texturizado de notable atractivo, cuya configuración está completamente determinada por parámetros matemáticos. De manera similar al texturizado inspirado en el panal de abeja, esta técnica permite generar superficies tanto en modalidad de bajo relieve como de sobre relieve, ofreciendo así diversas alternativas de diseño para adaptarse a los requerimientos específicos de cada aplicación.



a) b)

Figura 4.32. a) Texturizado voronoi bajo relieve; b) Texturizado voronoi sobre relieve.

Otra de las texturas seleccionadas, que permite un alto grado de variabilidad, se inspira en la fruta yaca. La piel de esta fruta presenta una estructura interesante compuesta por protuberancias irregulares. Aunque la organización de dichas protuberancias guarda similitud con la estructura Voronoi, la forma base se asimila a un cono truncado. Este diseño se replica de forma escalada a alturas aleatorias, generando una sublevación entre los elementos que resulta en la característica morfología de la textura de la yaca. Además, se aplicaron áreas de atracción para ampliar aún más la variabilidad del patrón, tal como se muestra en la Figura 4.33.

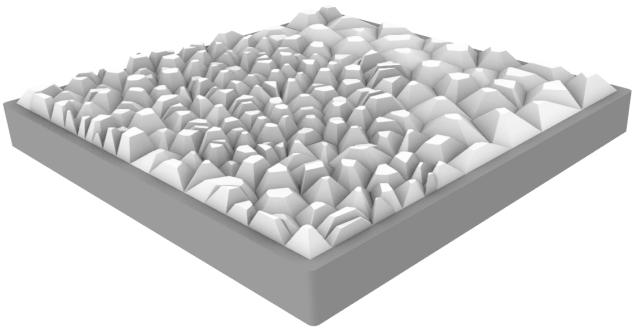
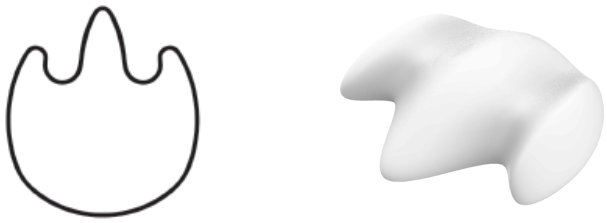


Figura 4.33. Texturizado de yaka sobre relieve.

Entre las texturas más estudiadas en el ámbito de la biomímesis se encuentra la piel del tiburón, conocida por sus escamas que confieren un comportamiento hidrofóbico. La parametrización de esta textura presenta mayor complejidad, ya que requiere la generación previa de la escama. Estas escamas están compuestas por tres elementos salientes, en los cuales el elemento central presenta una mayor longitud, resultando en una forma similar a un tridente. Siguiendo la metodología establecida, se realizó inicialmente la abstracción de la escama (véase Figura 4.34a) para posteriormente construir su modelo tridimensional (véase Figura 4.34b).



a) b)

Figura 4.34. a) Abstracción de la piel del tiburón; b) Modelado de la escama. Modificado de [18].

Se observó que, desde los primeros diseños, la disposición de las escamas formaba un patrón en diamante, similar al estudiado en el apartado de texturas geométricas. Con la geometría base definida, se generó el patrón utilizando el comando D*iamond panels*, que permitió disponer una escama en cada nodo de una estructura romboidal. Para conferir un aspecto más orgánico, se aplicaron transformaciones de escala (comando *Scale*) y rotación (comando R*otate*) para introducir variaciones aleatorias en la orientación y el tamaño de las escamas, obteniéndose un texturizado complejo y con alto grado de aleatoriedad (véase Figura 4.35).

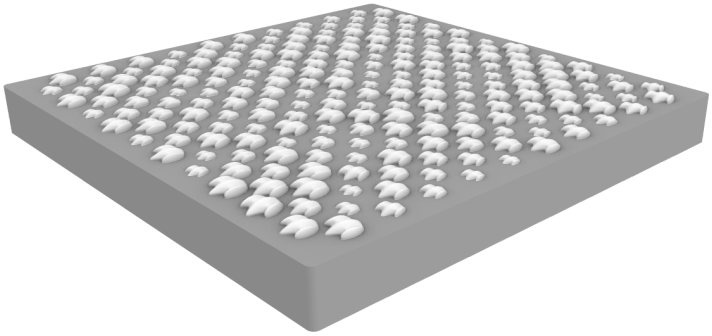


Figura 4.35. Texturizado de piel de tiburón parametrizado.

Por último, se abordó el desarrollo de una textura inspirada en la piña del *Pinus canariensis*, especie forestal característica del archipiélago canario. Las piñas presentan una morfología muy variable, compuesta por estructuras alargadas que convergen en un elemento cilíndrico común, el cual actúa como soporte del piñón. La propuesta se inspiró en las escamas leñosas que recubren el exterior de la piña y se superponen en forma de espiral para proteger las semillas. Cada escama posee una forma similar a un rombo con un elemento triangular en su base. Siguiendo una metodología análoga a la utilizada en la textura de la piel del tiburón, se realizó primero la abstracción del elemento generador (Figura 4.36) y, posteriormente, se aplicó el comando *diamond panels* para la parametrización, obteniéndose la textura final (Figura 4.37).

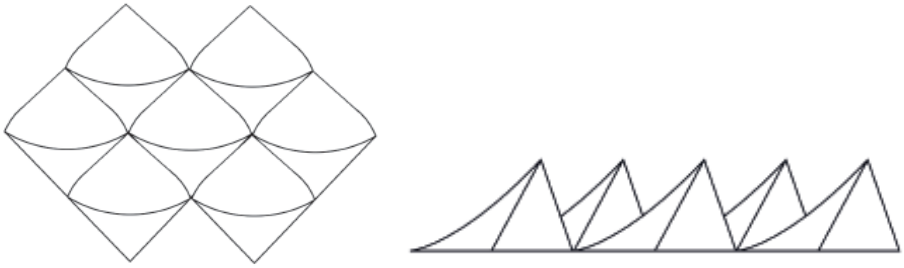


Figura 4.36. Abstracción del elemento generador de la textura de piña canaria.

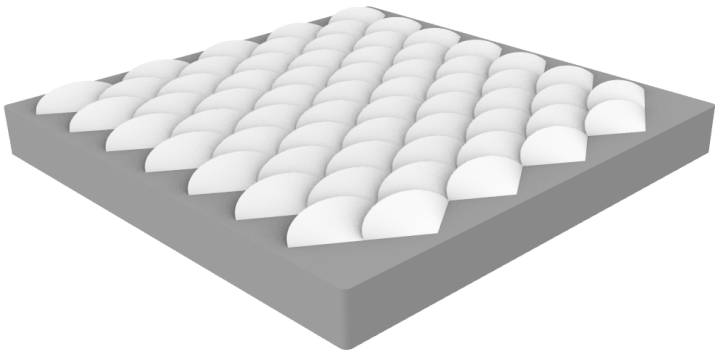


Figura 4.37. Texturizado de piña canaria.

4.4.3.3. Texturas estéticas

Si bien el enfoque principal de esta tesis se centró en el desarrollo de microtexturas funcionales, se incluyó una prueba preliminar para demostrar que el programa es igualmente capaz de parametrizar texturas con un valor estético, sin necesariamente buscar una funcionalidad específica. En este caso, se diseñó una textura compuesta por ondas, inspirada en el movimiento y la dinámica de las olas.

Para su generación, la superficie se dividió en ambos ejes y, mediante el comando *move*, se introdujo una variabilidad aleatoria en la dirección del eje Z, lo que confiere a la textura un aspecto dinámico y en constante movimiento. La creación de estas capas consecutivas se complementó con una operación de extrusión, que permite unir las capas y formar una superficie cerrada. Este proceso asegura que el texturizado pueda integrarse como pieza modelo en el proceso de electroconformado, tal y como se muestra en la Figura 4.38.

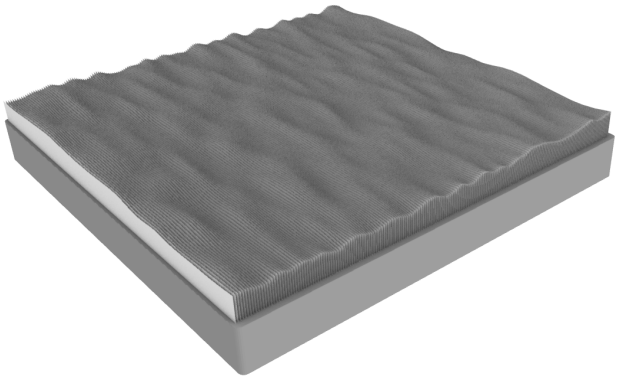


Figura 4.38. Texturizado compuesto por ondas.

En resumen, la parametrización mediante Rhinoceros y Grasshopper ha permitido desarrollar una amplia gama de microtexturas, desde patrones altamente aleatorios hasta configuraciones ordenadas y repetitivas. La capacidad de controlar de manera precisa los parámetros de diseño facilita la adaptación del texturizado a las necesidades funcionales de la pieza, lo que resulta esencial para aplicaciones como el electroconformado. Los ejemplos aquí presentados evidencian el potencial de estas herramientas para generar soluciones innovadoras en el diseño de superficies microtexturizadas.

4.5. Rediseño de textura mediante simplificación del diseño

Uno de los principales desafíos identificados en el desarrollo de esta investigación ha sido la capacidad limitada de los equipos disponibles para procesar archivos de microtexturas complejas. A medida que se reduce el tamaño de las matrices con estas texturas, se observa una ralentización significativa en el proceso de generación y manipulación de modelos CAD, lo que compromete la eficiencia del diseño y la fabricación.

Para abordar esta problemática, se ha adoptado una estrategia basada en el *slicing* de la geometría generadora de la textura. Este enfoque consiste en dividir el elemento base de la textura en las capas que lo conformarán durante la fabricación, simplificando la geometría de cada capa mediante una estructura escalonada. Dado que el proceso de fabricación aditiva por MSLA incorpora de manera inherente un redondeo de bordes debido a la interacción de la luz con el material fotopolimérico, se evita la necesidad de operaciones adicionales de suavizado en el diseño CAD. En consecuencia, se trabaja directamente con la forma base, permitiendo que la propia tecnología de fabricación homogenice y suavice la textura final. Un ejemplo de esta optimización de diseño se observa en la Figura 4.39.

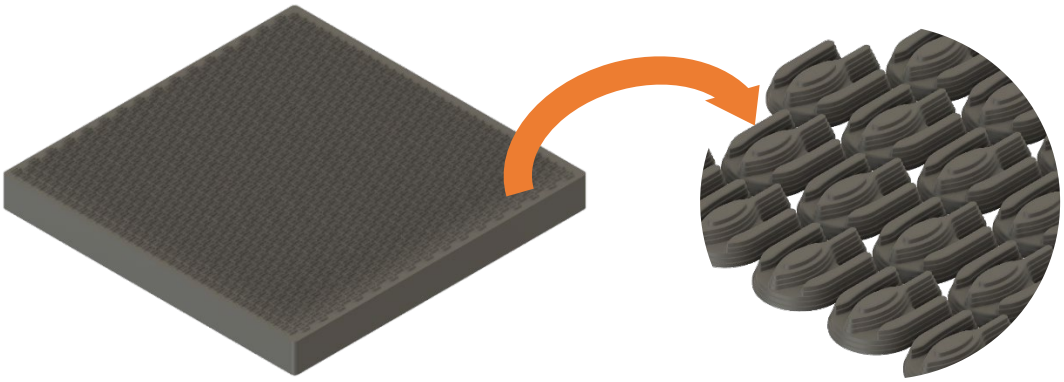


Figura 4.39. Micro textura piel de tiburón simplificada con altura de capa de veinticinco micras.

Si bien este método implica un mayor número de operaciones en la fase de modelado CAD, ofrece beneficios significativos en términos de reducción del tamaño de la textura y aumento de la densidad del patrón. Además, al exportar los modelos optimizados, se observa que el peso del archivo no se ve afectado negativamente, lo que mejora la eficiencia en el procesamiento de datos sin sobrecargar los recursos computacionales disponibles.

Dentro de las diferentes texturas diseñadas, la piel de tiburón ha despertado un creciente interés en la ingeniería de superficies debido a su capacidad para reducir el arrastre en entornos fluidodinámicos. La piel de tiburón presenta varias características únicas que contribuyen a su eficacia en la reducción de arrastre y protección contra el biofouling. Estas características incluyen:

1. **Dermal Denticles**: La piel de tiburón está cubierta por pequeñas estructuras llamadas dentículos dérmicos, que son similares a los riblets. Estas estructuras están alineadas en la dirección del flujo de agua y tienen formas que reducen la turbulencia.
2. **Textura y Forma**: Los dentículos tienen formas variadas y están dispuestos de manera que crean un patrón que minimiza la resistencia al movimiento a través del agua. Esto permite que los tiburones nadan de manera más eficiente.
3. **Propiedades Hidrofóbicas**: La piel de tiburón tiene una superficie que repele el agua, lo que ayuda a reducir la adherencia de organismos marinos y, por lo tanto, disminuye el biofouling.

Mediante la estrategia descrita, es posible obtener patrones más densos y eficientes sin incrementar la carga computacional, facilitando la integración de estas texturas en procesos de fabricación aditiva de alta precisión. No obstante, con el objetivo de reducir la complejidad del diseño y facilitar su manufactura, se han desarrollado versiones simplificadas que preservan las propiedades funcionales clave de la piel de tiburón. Estas simplificaciones presentan ventajas en términos de:

1. **Facilidad de Fabricación**: La reducción en la complejidad geométrica permite replicar las propiedades aerodinámicas de la piel de tiburón sin necesidad de estructuras detalladas a nivel microscópico, lo que simplifica la producción y reduce costos.
2. **Optimización del Rendimiento**: Al concentrarse en los riblets (escamas) como elemento esencial para la reducción del arrastre, se logran superficies eficientes sin necesidad de replicar la estructura natural en su totalidad.
3. **Aplicaciones Diversas**: La simplificación del diseño permite su implementación en sectores como la industria aeroespacial, la náutica y la indumentaria deportiva, donde la reducción de fricción es un factor crítico.
4. **Mejora en el Rendimiento**: Las estructuras simplificadas optimizan el comportamiento del flujo, proporcionando mejoras en el rendimiento hidrodinámico y aerodinámico en comparación con superficies lisas o de menor eficiencia.

En síntesis, la piel de tiburón representa un modelo natural excepcional para la reducción de arrastre, y su simplificación geométrica permite trasladar estas ventajas a aplicaciones prácticas sin comprometer su eficacia [21].

- **Diseño y análisis de riblets**

Diversos estudios han abordado la optimización de los riblets como estrategia para la reducción de fricción en flujos turbulentos. Investigaciones como las de Lee y Kim [22] han determinado que la eficiencia de estos patrones depende de parámetros geométricos específicos, como la relación altura-longitud de los riblets, que influye directamente en la vorticidad secundaria y en la reducción del arrastre. En sus experimentos (véase Figura 4.40), se establecieron dimensiones óptimas de riblets en torno a los 305 µm de longitud, con alturas comprendidas entre 20 y 40 µm y un ancho aproximado de 277,13 µm, demostrando que valores fuera de este rango pueden comprometer la eficiencia aerodinámica.

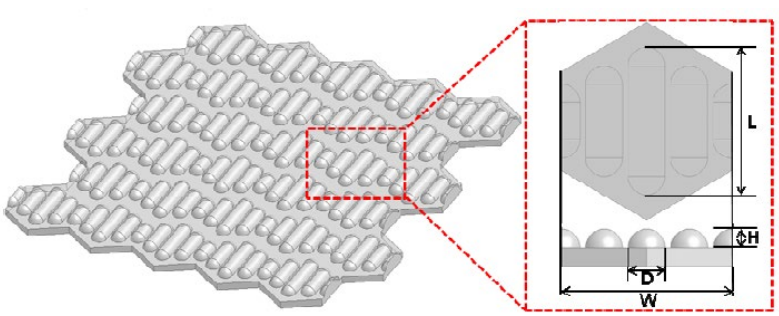


Figura 4.40. Diseño de riblets mediante uso de elementos cilíndricos. Obtenido de [22].

Estudios adicionales, como los de Hamilton et al. [23], han analizado la configuración óptima de los riblets triangulares, identificando que ángulos de faceta primaria de 10º y un espaciamiento entre riblets de aproximadamente 585 µm proporcionan una reducción de arrastre significativa. Realizaron simulaciones paramétricas para evaluar el comportamiento de los riblets triangulares asimétricos (ATR) en un rango de dimensiones La relación entre la altura del surco y el espaciamiento (h/s) ha sido calculada en función de la ecuación $h = 2s \sin^2(\alpha)$, donde valores adecuados permiten mejorar la eficiencia en la reducción del arrastre hasta en un 9,1% en comparación con superficies planas. La Figura 4.41 ilustra el diseño empleado por estos autores.

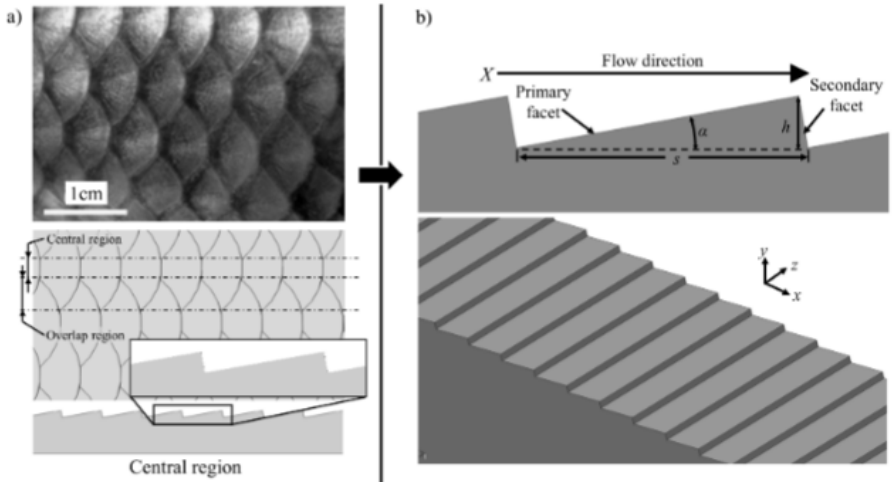


Figura 4.41. Visión general de la geometría de las escamas de pez: (a) topografía de las escamas de pez típicas, y (b) diseño propuesto de riblets triangulares asimétricos. Obtenido de [23].

En cuanto a la clasificación de los riblets, investigaciones como las de Dean y Bhushan [21], han definido tres tipologías principales: riblets en forma de diente de sierra (sawtooth riblets), riblets con forma de escamas (scalloped riblets) y riblets tipo cuchilla (blade riblets) como se observa en la Figura 4.42.

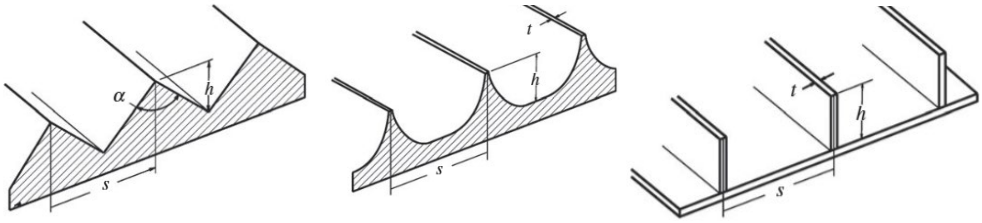


Figura 4.42. Tipologías de riblets: a) riblets en forma de diente de sierra; b) riblets con forma de escamas y c) riblets tipo cuchilla.

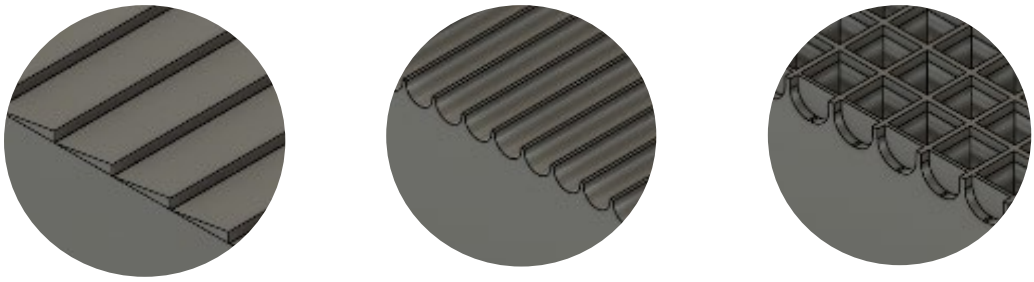
A continuación, se detallan ejemplos de posibles medidas que se pueden utilizar para cada caso.

1. Riblets en forma de diente de sierra: Estos presentan una reducción óptima del arrastre cuando el ángulo α es de 54º, con una relación h/s cercana a 0,98.

2. Riblets con forma de escamas: Se ha demostrado que su desempeño es óptimo con una relación h/s de 0,7, aunque valores de 0,5 mantienen una eficiencia aerodinámica significativa.

3. Riblets tipo cuchilla: Su rendimiento es máximo con h/s de 0,5, donde el grosor de la cuchilla (t) también desempeña un papel importante, estableciendo una relación óptima de t/s = 0,04.

La optimización geométrica de los riblets biomiméticos permite alcanzar una reducción significativa del arrastre en flujos turbulentos, al tiempo que facilita su fabricación mediante estrategias de simplificación en el diseño CAD. A partir de la revisión de la literatura, se ha determinado que la relación geométrica de los riblets es un factor clave para maximizar su desempeño aerodinámico e hidrodinámico. La selección de la tipología adecuada debe considerar las condiciones del flujo y los objetivos específicos de cada aplicación, con el fin de obtener superficies funcionales optimizadas para la reducción de fricción y mejora de la eficiencia en diversos sectores industriales. A continuación, se ilustran algunos de los diseños de riblets desarrollados, cuya propiedad hidrofóbica se estudiará en otro apartado (véase Figura 4.43).



a) b) c)

Figura 4.43. Diseños simplificados de la textura de piel de tiburón: a) riblets triangulares; b) riblets en forma de escama; c) riblets en forma de escama cruzados.

4.6. Selección de texturas a estudiar

Durante el desarrollo de esta investigación como se ha descrito en apartados previos se generaron diversos tipos de texturas, empleando tanto métodos manuales a través del software *Fusion 360* como técnicas paramétricas mediante *Rhinoceros* y su complemento *Grasshopper*, lo que permitió una mayor flexibilidad y rapidez en la parametrización de los diseños.

Sin embargo, dado que en paralelo se realizaron experimentos vinculados al proceso de electroconformado, fue necesario seleccionar dos texturas con comportamientos diferenciados para establecer comparativas. La selección se realizó con base en criterios tanto técnicos como funcionales, eligiendo las siguientes microtexturas para su estudio en profundidad:

- **Textura de semiesferas bajo relieve**: Entre las distintas configuraciones evaluadas, se optó por una matriz conformada por semiesferas entrantes de 1.2 mm de diámetro. Esta elección respondió inicialmente a las limitaciones de resolución de la impresora *Wanhao*, la cual, en ese momento, permitía replicar con precisión geometrías en torno a estas dimensiones. A pesar de la posterior mejora del equipo, se continuó trabajando con esta textura debido a que la presencia de cavidades de tamaño relativamente grande dificultaba la deposición de cobre durante el proceso de electroconformado, lo que la convertía en un caso de estudio relevante para analizar los desafíos asociados a la conformación de geometrías complejas. Además, desde un punto de vista funcional, esta textura se seleccionó debido a su potencial comportamiento hidrofílico, lo que abre la posibilidad de futuras investigaciones en múltiples aplicaciones. La Figura 4.44 muestra la textura seleccionada.

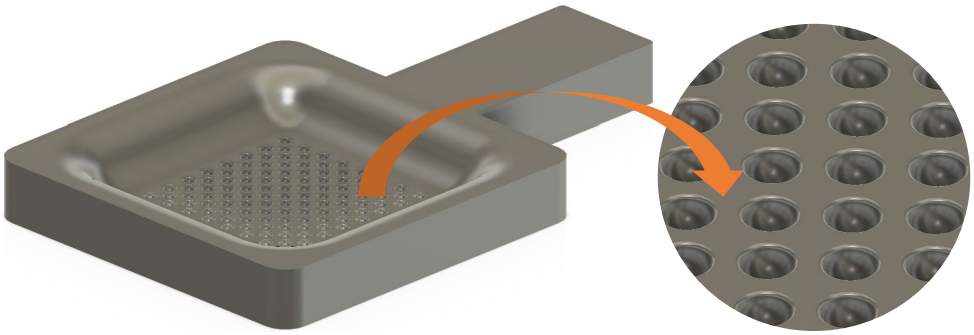


Figura 4.44. Textura bajo relieve seleccionada para realizar las diversas investigaciones (EMT_SE_BR).

- **Textura de piel de tiburón sobre relieve**: Entre las distintas configuraciones desarrolladas de esta textura, se optó por trabajar con la primera versión diseñada. Esta decisión se fundamentó, en primer lugar, en la optimización del tamaño del archivo, ya que, si bien la parametrización realizada mediante *Grasshopper* permitía generar escamas con mayor fidelidad geométrica, el peso del archivo resultante dificultaba su exportación y procesamiento. Asimismo, aunque en algunos modelos se introdujeron simplificaciones para representar el comportamiento de esta textura, se priorizó un diseño que reflejara con la mayor fidelidad posible la morfología real de las escamas. Otro criterio clave en la selección de esta textura fue su contraste con la de semiesferas, dado que presenta un comportamiento hidrofóbico y las texturas están dispuestas en sobre relieve. Esto permitía evaluar diferencias en el comportamiento del proceso de electroconformado en función de la morfología y disposición de la textura. La Figura 4.45 muestra la pieza modelo trabajada.

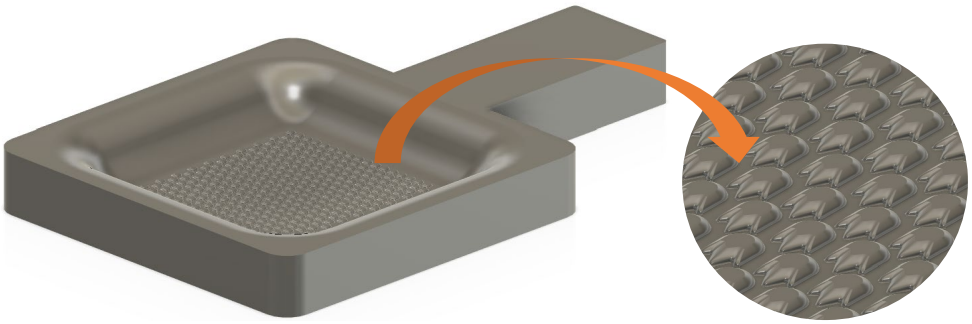


Figura 4.45. Textura sobre relieve seleccionada para realizar las diversas investigaciones (EMT_TIB).

Cabe señalar que, debido a la naturaleza secuencial del proceso de replicación empleado en esta investigación, que implica la generación de una cáscara metálica a partir de una pieza modelo, seguida de su uso como electrodo en el proceso SEDM, la morfología de la textura sufre una inversión geométrica en cada etapa. Así, una textura generada en la pieza modelo en forma de depresión (es decir, hacia el interior del volumen) se transformará en una protrusión en la superficie interna de la cáscara electroformada, y volverá a reproducirse como depresión en la pieza erosionada, replicando de forma fiel la intención de diseño original. Este fenómeno es inherente al principio de transferencia volumétrica por moldeado e inversión sucesiva, y ocurre indistintamente en todas las texturas, independientemente de su tipología ya sean superficiales, profundas, regulares o bioinspiradas, como la textura de piel de tiburón.

Por esta razón, y con el fin de evitar confusiones terminológicas a lo largo de esta tesis, todas las referencias a la geometría de la textura (relieve, orientación o profundidad) se harán siempre tomando como referencia la pieza modelo, es decir, el diseño inicial definido digitalmente y fabricado mediante impresión MSLA.

4.7. Mejoras externas al diseño de las micro texturas

A lo largo del desarrollo de esta investigación, además de las mejoras implementadas en el diseño de texturas y piezas modelo, se obtuvieron avances significativos en otros aspectos del proceso. Uno de los hitos más importantes fue la incorporación de un equipo de impresión 3D con características avanzadas, lo que permitió alcanzar una mayor precisión en los diseños y mejorar la calidad final de las piezas fabricadas. Paralelamente, se optimizó el protocolo de postprocesado, introduciendo procedimientos de limpieza más rigurosos. Estas medidas no solo garantizaron una mayor consistencia en los resultados, sino que también redujeron la incidencia de defectos que se plantearon en una en las etapas posteriores, consolidando un enfoque integral hacia la mejora continua en términos de diseño y fabricación.

4.7.1. Optimización del equipo de FA

Para la fabricación de piezas modelo se empleó inicalmente la tecnología de fabricación aditiva mediante fotopolimerización en tanque, en su variante de procesamiento digital por luz (DLP) con pantalla de cristal líquido (LCD). Este proceso, inicialmente conocido como SLA/DLP-LCD (del inglés: Stereolithography Apparatus/Digital Light Processing - Liquid Crystal Display), actualmente es denominado como esteriolitografía por máscara (MSLA). Fue seleccionado debido a su disponibilidad y adaptabilidad a los requerimientos de las piezas modelo y a sus capacidades para la reproducción de detalles finos, bajo coste operativo y accesibilidad.

4.7.1.1. Fabricación de las primeras piezas modelo

En el trabajo de investigación previo a esta tesis doctoral y durante los primeros ensayos la fabricación de las piezas se realizó mediante la impresora Wanhao Duplicator 7 (D7 V1.4) (Wanhao 3D printer, Jinhua, China), debido a la disponibilidad de este equipo en el departamento de Ingeniería Mecánica de la ULPGC [55]. El funcionamiento de la Wanhao D7 se basa en la proyección de imágenes en negativo de la geometría deseada a través de una pantalla LED (Figura 4.46), lo cual permite que cada capa del modelo se forme al solidificar selectivamente la resina líquida fotosensible. Durante el proceso de impresión, la luz digital proyectada endurece la resina en capas sucesivas; cada imagen proyectada representa una sección del modelo que se solidifica antes de proceder a la siguiente capa, de acuerdo con el tiempo de exposición programado, hasta completar la impresión.



Figura 4.46. Impresora Wanhao Duplicator 7 (D7).

La solidificación de cada capa de resina se realiza sobre una plataforma de impresión que se desplaza verticalmente en dirección ascendente, capa por capa. Este método de construcción presenta la particularidad de que la pieza se conforma en posición invertida, de manera que queda suspendida y adherida a la plataforma de impresión. Esta adhesión inicial es crucial, ya que asegura que la primera

capa proyectada se mantenga firmemente sujeta, permitiendo que las sucesivas capas se solidifiquen de forma precisa y alineada. Este proceso de fabricación invertida es característico de las impresoras de estereolitografía LCD y es esencial para evitar deformaciones y mantener la integridad estructural del modelo durante el curado y la solidificación de las capas subsiguientes.

Esta impresora es ideal para la creación de piezas muy pequeñas, pudiendo trabajar con resinas que tengan longitudes de onda entre 395 y 405 nm. Tiene una tolerancia de posicionamiento de la plataforma de de ± 0,03mm, lo que permite obtener un buen acabado y nivel de detalle respecto a otras tecnologías de FA de bajo coste.

La Wanhao D7, a diferencia de otros, incorpora una Raspberry Pi 3 que facilita el control remoto de la impresora a través de su conexión wifi, mediante la cual se accede a la interfaz de impresión *NANODLP*.

Al conectarse a la red wifi de la impresora, el usuario puede ingresar al programa NANODLP accediendo a la dirección web http://192.168.1.10/. En la interfaz principal de NANODLP (ver Figura 4.47), se presenta un historial de impresiones, donde se pueden visualizar modelos impresos anteriormente, sus capas y opciones para editar o reimprimir el archivo. En esta pantalla, también es posible observar el progreso de impresión capa por capa y detener el proceso en caso de que se detecte alguna anomalía mediante el botón de "Stop".

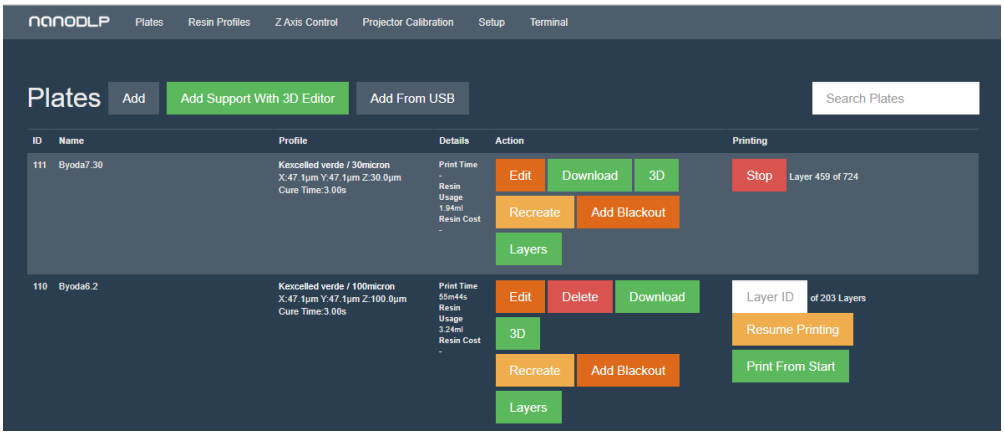


Figura 4.47. Interfaz principal programa de impresión de la Wanhao Duplicator 7.

En la sección "Plates" se pueden cargar los archivos STL que se desean imprimir, mientras que la sección "Resin Profiles" almacena los perfiles de resina, donde se indican parámetros óptimos como el tiempo de exposición y el espesor de capa, adaptados a las propiedades específicas de cada resina utilizada. Estos archivos STL pasarán primero por un programa de slice como es el Chitubox, del que saldrán los archivos con la terminación concreta para cada máquina.

NANODLP permite ajustar parámetros como la duración de exposición o el espesor de capa a través del perfil de resina seleccionado (ver Figura 4.48). Esto resulta especialmente útil para adaptar el proceso de impresión a distintas configuraciones de resina sin necesidad de generar un nuevo archivo de slicing.

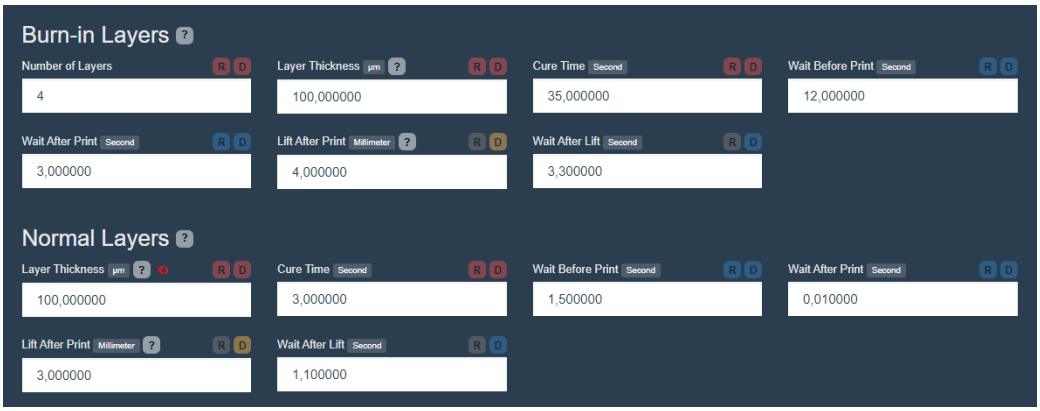


Figura 4.48. Perfil de resina del programa de impresión de la Wanhao Duplicator 7.

Antes de iniciar la impresión, se verifica que los datos del perfil de resina sean correctos y se asigna el perfil al modelo STL cargado en el pendrive. Debido a que los parámetros de soporte y espesor de capa ya fueron configurados en Chitubox, no es necesario realizar ajustes adicionales en NANODLP. Durante la impresión, la interfaz muestra el tiempo transcurrido, el número de capas completadas, la posición de la mesa de trabajo y la opción de detener la impresión si se identifica algún error.

No obstante, como se puede ver, este proceso requiere de muchos pasos en los que se pueden cometer errores con relativa facilidad.

4.7.1.2. Fabricación de piezas modelo finales

Durante el desarrollo de esta investigación se vio la necesidad de mejorar la calidad de las texturas y optimizar su tamaño a niveles más pequeños por lo que se adquirió un nuevo equipo MSLA, el Phrozen Sonic Mini 8K (véase Figura 4.49). El Sonic Mini 8K es un equipo de impresión 3D basado en tecnología LCD que destaca por su excepcional precisión y capacidad para reproducir detalles muy finos, con una resolución XY de 22 µm (1152 ppi).



Figura 4.49. Impresora Phrozen Mini 8K.

Su pantalla LCD monocroma de 7,1 pulgadas y un eje Z de 180 mm de recorrido proporcionan un amplio espacio de impresión, mientras que la incorporación de guías lineales duales ultraestables garantiza la obtención de modelos de alta calidad con estabilidad extrema durante el proceso de fabricación. La placa de construcción, fabricada mediante corte láser en material esmerilado, asegura una adhesión firme del modelo, y el módulo LED de proyección lineal contribuye a mejorar la uniformidad de la luz, lo que resulta en impresiones nítidas y con un alto nivel de detalle.

La preparación de los modelos se realiza mediante el software de corte CHITUBOX (versión 1.9.0 o superior), y la conectividad se facilita a través de un puerto USB frontal. La impresión se efectúa

utilizando una fuente de luz LED de proyección lineal y una película FEP de liberación, lo que posibilita trabajar con espesores de capa desde 0,010 hasta 0,30 mm y alcanzar velocidades máximas de impresión de 80 mm/h.

4.7.1.3. Comparativa entre equipos MSLA

A modo resumen para que se pueda apreciar la diferencia entre un equipo y otro se hará una tabla comparativa (véase Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Comparativa entre equipos MSLA empleados en la investigación.

Características	Wanhao D7	Phrozen Mini 8K
Resolución XY	47 micrones	22 micrones
Resolución Z (altura de capa)	35-100 micrones	10-50 micrones
Tamaño de pantalla LCD	5.5 pulgadas	7.1 pulgadas
Tecnología de pantalla	LCD monocromática	LCD monocromática 8K
Compatibilidad con resinas	Resinas estándar	Resinas estándar, biocompatibles y de ingeniería
Velocidad de impresión	Moderada	Alta
Tamaño de construcción	120 × 68 × 200 mm	165 × 72 × 180 mm
Precio	300 – 400 €	600 – 700 €

Como se puede observar, para la fabricación de microtexturas mediante estereolitografía por máscara (MSLA), las mejoras aportadas por la impresora Phrozen Mini 8K son notables debido a su elevada resolución en el plano XY (22 µm), su capacidad para trabajar con alturas de capa reducidas (hasta 10 µm), así como su compatibilidad con resinas de ingeniería y biocompatibles. En contraste, equipos más económicos como la Wanhao D7 representa una alternativa adecuada en aplicaciones de resolución y precisión menos exigentes.

Durante el proceso de impresión mediante MSLA, se presentan ciertas limitaciones derivadas de las características del equipo utilizado. Uno de los principales factores que afectan la calidad de las microtexturas es la resolución de la pantalla LCD. En el caso de la Wanhao D7, con un tamaño de píxel de 47 µm, se requiere una matriz mínima de 25 × 25 píxeles para definir con precisión una geometría circular en la estructura generadora de la textura de semiesferas. Sin embargo, si esta forma no se encuentra perfectamente centrada en la matriz, pueden generarse distorsiones geométricas significativas, como se ilustra en la Figura 4.50. En el caso de texturas más irregulares, como las inspiradas en estructuras biomiméticas, estas distorsiones pueden ser aún más pronunciadas en aquellas zonas donde los detalles presentan dimensiones próximas al tamaño del píxel.

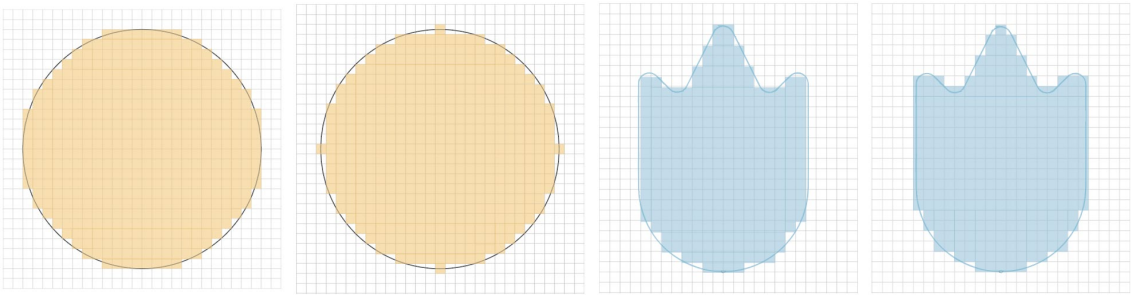


Figura 4.50. Representación de distorsión dimensión atribuida a la resolución de la pantalla de la impresora 3D.

Además de las limitaciones impuestas por la resolución de pantalla, el proceso de impresión genera distorsiones geométricas en la formación de capas sucesivas, las cuales son consecuencia de la adhesión residual de resina líquida a las superficies solidificadas. Esta resina remanente es nuevamente expuesta a la luz en la generación de la capa siguiente, provocando una solidificación no

intencionada y alterando la fidelidad del modelo. La magnitud de este efecto está influenciada por la facilidad de desplazamiento de la resina líquida durante los movimientos de la plataforma de construcción. En aquellas geometrías que favorecen el atrapamiento de resina, como las texturas en bajo relieve, este fenómeno es más pronunciado que en aquellas estructuras en sobre relieve (Figura 4.51).

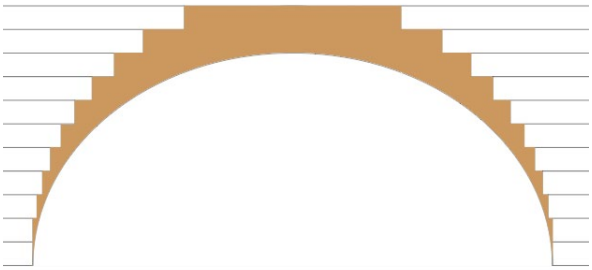


Figura 4.51. Atrapamiento de resina en geometría entrantes.

De manera adicional, durante el proceso de fabricación mediante MSLA, la interacción combinada de estos factores amplifica las distorsiones geométricas, a lo que se suma la posible falta de repetibilidad en el posicionamiento horizontal de la placa de construcción en los movimientos de ascenso y descenso. Este error puede estar condicionado tanto por el diseño mecánico del equipo como por el estado de conservación de sus componentes, lo que introduce un factor adicional de imprecisión en la reproducción de las texturas (Figura 4.52).

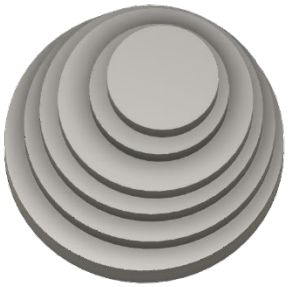


Figura 4.52. Error generado por la placa de construcción.

Estos aspectos ponen de manifiesto que la capacidad de reproducción de microtexturas mediante MSLA está determinada por tres factores clave: la resolución de pantalla, la precisión mecánica del equipo y las propiedades reológicas de la resina empleada. La incorporación de un equipo de mayor precisión, como la Phrozen Mini 8K, permite minimizar estos defectos y optimizar la fidelidad en la réplica de texturas complejas, alcanzando un mayor nivel de detalle y precisión en la fabricación de estructuras funcionales.

Un ejemplo de esta mejora se observa en la textura de piel de tiburón. Como se muestra en la Figura 4.53, la optimización del equipo permitió la reproducción fiel del modelo CAD, mientras que con el equipo previo se generaba un redondeo no deseado en la estructura de las escamas, suavizando significativamente la forma original. Adicionalmente, la capacidad de imprimir con menores alturas de capa ha permitido mejorar la resolución en la generación de los patrones texturizados, proporcionando superficies más definidas y con una mayor fidelidad al diseño original.



a) b)

Figura 4.53. Error generado por la placa de construcción.

4.7.2. Optimización de resina fotosensible

Las impresoras MSLA utilizan resinas fotosensibles que se solidifican mediante exposición a luz ultravioleta, lo que permite la fabricación de piezas con alta precisión y nivel de detalle. Los parámetros de impresión recomendados suelen estar definidos por los fabricantes de las impresoras, sin embargo, en numerosas ocasiones es necesario trabajar con resinas de proveedores distintos a los del equipo de fabricación. A esto se suma que las resinas con el paso del tiempo y su uso van cambiando sus propiedades, por lo que es necesario ajustar los parámetros constructivos. Esto hace imprescindible su calibración antes de proceder a la fabricación de piezas con requisitos específicos de calidad y fidelidad geométrica.

En el desarrollo de esta investigación, se empleó una pieza patrón para la calibración de las distintas resinas utilizadas, permitiendo la determinación de los parámetros óptimos de exposición a la luz UV. La Figura 4.54 muestra el modelo de calibración empleado, cuya validación se basa en la correcta reproducción de pines y orificios de referencia.

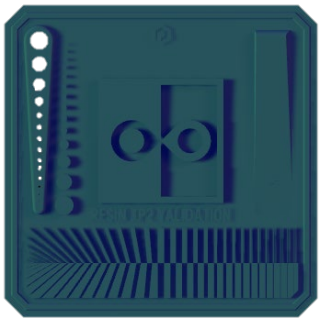


Figura 4.54. Pieza patrón para calibrar las resinas.

Si el número de pines impresos es inferior al esperado, indica una insuficiente exposición de la resina a la luz UV, mientras que una reducción en el número de orificios impresos sugiere una sobreexposición de la resina durante el proceso de curado.

- **Selección y evaluación de resinas fotosensibles**

En las pruebas iniciales realizadas con la impresora MSLA Wanhao Duplicator 7, se utilizó la resina Kexcelled S6100 Green, formulada para trabajar con una longitud de onda de 405 nm. Esta resina fotopolimérica es reconocida por su estabilidad y alto rendimiento en la fabricación de piezas con gran fidelidad en los detalles, siendo comúnmente empleada en la producción de componentes de

precisión como piezas de maquinaria, juguetes y elementos artísticos. Su capacidad para mantener dimensiones exactas y bordes bien definidos la hace adecuada para aplicaciones exigentes.

Además, la transparencia de la S6100 Green facilitaba la posterior caracterización de las piezas en el proceso de electroconformado. No obstante, durante la impresión de las piezas modelo con microtexturas, se identificaron numerosas inconsistencias y errores en la reproducción de los detalles, lo que llevó a descartar esta resina para el presente estudio.

Como alternativa, se optó por emplear una resina transparente del mismo fabricante de la impresora, Wanhao Clear Resin. Esta resina se caracteriza por ofrecer un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, presentando además una baja viscosidad que mejora su manejo y optimiza la precisión en la impresión. Su contracción mínima durante el curado favorece la conservación de la fidelidad geométrica de las piezas fabricadas, mientras que su resistencia mecánica y estabilidad térmica garantizan la integridad de las microtexturas. Estas propiedades la hacen altamente compatible con la impresora Wanhao Duplicator 7, proporcionando resultados satisfactorios en términos de calidad y definición de las texturas diseñadas.

A medida que avanzó la investigación y se cambió el equipo de fabricación aditiva, se propuso reducir la altura de capa de 50 µm a 25 µm, lo que permitió una mejora significativa en la resolución de las microtexturas. Sin embargo, con la incorporación de este nuevo equipo con mayor resolución, se consideró oportuno evaluar una resina diseñada específicamente para las mejoras tecnológicas del equipo.

Para ello, se seleccionó la Phrozen Aqua 8K Resin, formulada para resaltar detalles extremadamente finos en impresoras de alta resolución, como la Phrozen Sonic Mini 8K. Esta resina presenta una baja viscosidad, lo que optimiza el flujo durante la impresión y facilita el postprocesado. Además, su baja contracción y alta precisión garantizan una estabilidad dimensional óptima en piezas de microtexturas complejas. Otra ventaja relevante es su mínima emisión de olores durante el proceso de impresión, mejorando así la experiencia del usuario.

La elevada precisión de la Phrozen Aqua 8K Resin permitió trabajar con alturas de capa de hasta 10 µm, obteniendo resultados excepcionales en la definición de microtexturas. Por esta razón, las piezas modelo destinadas a los ensayos de electroconformado fueron fabricadas principalmente con esta resina. No obstante, algunas piezas fueron impresas con Wanhao Clear Resin con el objetivo de evaluar la capacidad de recubrimiento de cobre en las primeras fases de deposición durante el proceso de electroconformado por ser transparente.

En la Tabla 4.6 se resumen los parámetros de proceso establecidos para cada una de las resinas utilizadas en la investigación, estableciendo comparaciones en términos de exposición, altura de capa y otros factores clave que impactan la calidad de las piezas obtenidas.

Tabla 4.6. Parámetros empleados para las diferentes resinas utilizadas.

Parámetros		Valor	Resina		
			Kexcelled S 6100 Green	**Wanhao Clear**	**Phrozen 8K**
Capas iniciales	Número de capas	nº	4	4	4
	Grosor de capa	µm	50	50/30	50/25
	Tiempo de curado	s	35	40	35
	Elevación después de la impresión	mm	4	6	6
	Velocidad de elevación	mm/min	60	60	60
Capas normales	Grosor de capa	µm	50	50/30	50/25
	Tiempo de curado	s	4	10	2
	Elevación después de la impresión	mm	3	6	6
	Tiempo de descanso después de retractar	s	1.1	3	3
	Velocidad de elevación	mm/min	60	60	60

4.7.3. Optimización del postprocesado

El postprocesado en la fabricación aditiva mediante estereolitografía desempeña un papel crucial en la definición de la calidad superficial y la funcionalidad de las piezas fabricadas. En particular, cuando se trabajan microtexturas, la remoción de resina residual es un factor determinante en la obtención de estructuras bien definidas y reproducibles. Durante el desarrollo de esta investigación, se evaluaron diferentes estrategias de postprocesado para optimizar la limpieza y curado de las piezas, lo que permitió mejorar la calidad de las microtexturas fabricadas.

Inicialmente, se empleó un protocolo manual basado en estudios previos. Este procedimiento consistía en extraer la pieza de la plataforma de impresión, aplicar alcohol isopropílico mediante pulverización manual, limpiar con aire a presión y someter la pieza a un curado al curado final de la misma.

Sin embargo, a medida que las texturas adquirieron mayor complejidad geométrica y escalas más pequeñas, la eficiencia de este protocolo resultó insuficiente. Como respuesta a esta problemática, se implementó un protocolo de limpieza asistida mediante equipos especializados de Phrozen (véase Figura 4.55), incluyendo la estación de lavado con vórtice Phrozen Wash, el sistema de limpieza ultrasónica Phrozen Ultra-Sonic Cleaner y la estación de secado y curado Phrozen Cure Kit.

El protocolo de postprocesado se estructuró en cinco fases secuenciales:

1. Lavado inicial en la estación Phrozen Wash: La plataforma de impresión con las piezas adheridas se sumerge en el tanque con alcohol isopropílico. Se activa la agitación por vórtice durante 2 minutos, permitiendo la eliminación de la mayor cantidad de resina superficial.
2. Separación de las piezas: Una vez finalizado el lavado inicial, las piezas se retiran manualmente de la plataforma de impresión.
3. Limpieza ultrasónica: Las piezas se introducen en el tanque del Phrozen Ultra-Sonic Cleaner, donde se someten a dos ciclos de limpieza de 5 minutos cada uno. La cavitación generada permite la remoción de residuos en zonas de alta complejidad geométrica.
4. Secado con aire comprimido: Las piezas se secan completamente con aire a presión para eliminar cualquier traza de alcohol isopropílico antes del curado.
5. Curado final en la estación Phrozen Cure Kit: Se aplica un ciclo de 2 minutos de secado previo, seguido de un curado UV de 2 minutos, asegurando una polimerización completa y homogénea.

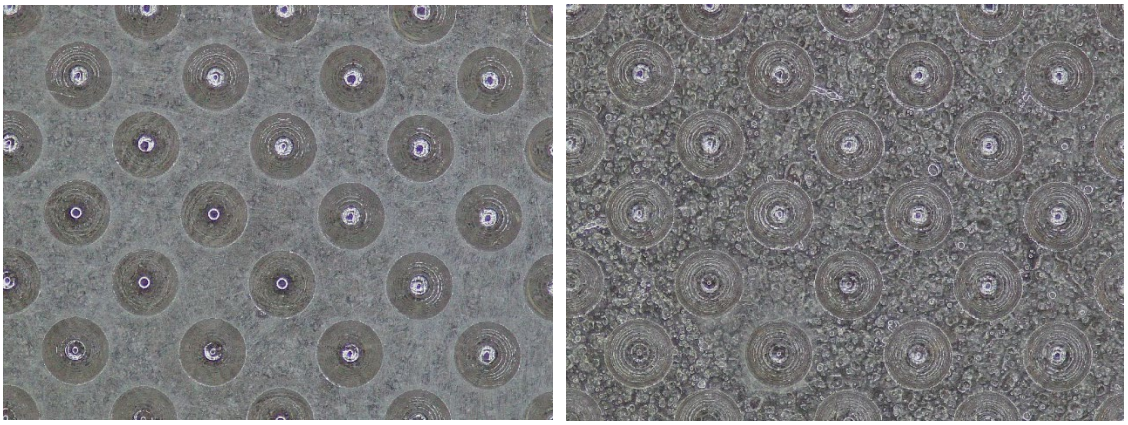


a) b) c)

Figura 4.55. a) Estación de lavado de Phrozen; b) Equipo de limpieza ultrasónica; c) Estación de secado y curado de Phrozen.

La implementación de este protocolo ha permitido mejorar significativamente la calidad superficial de las microtexturas, garantizando la eliminación efectiva de resina residual sin afectar la integridad

geométrica de los patrones. Además, el proceso optimizado reduce la aparición de defectos superficiales y mejora la reproducibilidad de las estructuras fabricadas. Ejemplo de ello son las imágenes representadas en la Figura 4.56, donde se puede ver la mejora en la definición de detalles superficiales de las piezas modelo obtenidas mediante un protocolo de limpieza más exhaustivo. En el capítulo VI se estudiará el análisis realizado a las piezas modelo, comparando los diferentes protocolos de limpieza y su impacto en la calidad de las mismas.



a) b)

Figura 4.56. Efecto de la limpieza mediante equipo de ultrasonido: a) pieza sin limpieza ultrasónica; b) pieza con limpieza ultrasónica.

4.8. Conclusiones

Este capítulo ha permitido avanzar significativamente en la comprensión y optimización del proceso de diseño, fabricación y evaluación de piezas modelo microtexturizadas para su aplicación en procesos de electroconformado y posterior uso como electrodos en EDM.

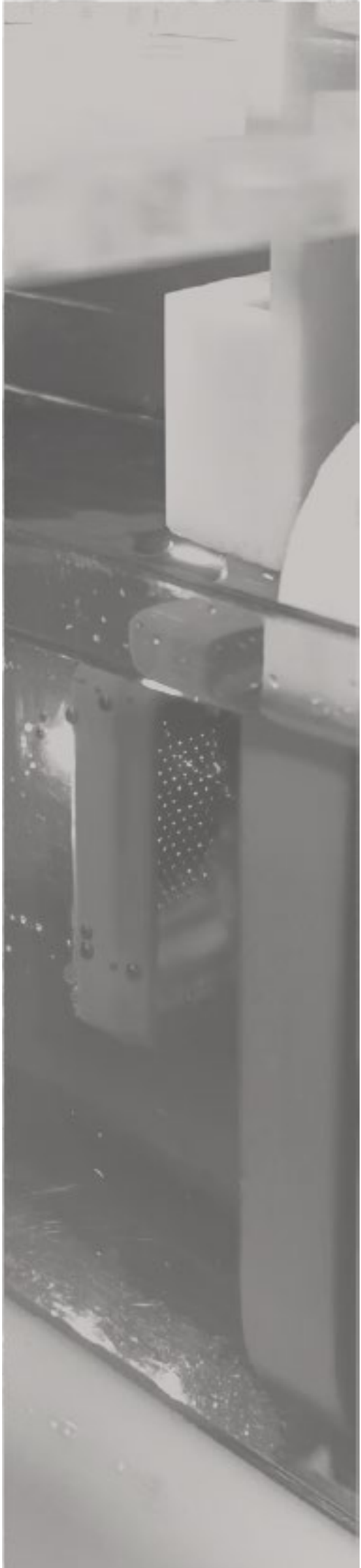
Una de las principales aportaciones ha sido la validación de que el uso de herramientas de diseño paramétrico, como *Grasshopper*, permite generar geometrías altamente adaptables y diversificadas, mejorando la eficiencia del proceso de diseño y facilitando su adecuación a requisitos funcionales específicos. Esta versatilidad ofrece un enorme potencial para desarrollar estructuras bioinspiradas con propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas diferenciadas.

En la parte experimental, se ha demostrado que ciertas texturas complejas no son viables cuando se enfrentan a las limitaciones del proceso de electroconformado, ya sea por dificultades en la extracción de la cáscara metálica o por deficiencias en la reproducción geométrica. Este resultado confirma que no todas las configuraciones serían replicables con éxito.

Además, se ha observado que la calidad de las piezas fabricadas mediante tecnologías aditivas depende directamente de la resolución del equipo utilizado. Al comparar impresoras con resoluciones distintas se ha observado una mejora significativa en la fidelidad de las texturas fabricadas. Las geometrías obtenidas con la impresora de mayor precisión presentaron una correspondencia más exacta con los modelos CAD, tanto en dimensión como en forma.

Finalmente, la estandarización del protocolo de limpieza posterior a la impresión, combinando agitación por vórtice y ultrasonidos, ha demostrado ser eficaz en la eliminación de residuos sin comprometer la geometría. Esta técnica mejora la calidad superficial y funcionalidad de las piezas texturizadas, y confirma la importancia de los sistemas de limpieza especializados. Este protocolo estandarizado proporciona un método replicable en futuras investigaciones y aplicaciones industriales.

La convergencia entre diseño paramétrico, fabricación aditiva de alta resolución y estrategias de limpieza eficiente constituye, por tanto, un enfoque sólido para el desarrollo de herramientas funcionales de alto valor añadido. Este marco metodológico no solo permite abordar los retos actuales en procesos de electroerosión por penetración, sino que abre la puerta a futuras aplicaciones en sectores como biomateriales, superficies inteligentes y tecnología de fluidos.



CAPÍTULO V

Electroconformado de cáscaras de cobre microtexturizadas

5. ELECTROCONFORMADO DE CÁSCARAS DE COBRE MICROTEXTURIZADAS

El proceso de electroconformado aplicado al ámbito de la microfabricación es una línea de trabajo de gran interés por la comunidad científica, aunque por su naturaleza especializada y restricciones comerciales, su uso es relativamente pequeño y orientado a aplicaciones muy específicas. Los escasos equipos disponibles en el mercado, por lo general, están configurados para trabajar en otras aplicaciones diferentes a las planteadas para estos trabajos de investigación. En este contexto es donde surgió la necesidad de diseñar un equipo de laboratorio dirigido específicamente para la fabricación de cáscaras microtexturizadas. Su diseño debía contemplar la modificación y el control de muchas de las variables operativas, y lograr los patrones geométricos de las texturas con la precisión y nivel de detalles requerido.

A partir de la investigación previa, en la que se desarrolló el equipo de partida, ya se identificó la necesidad de estudiar el efecto de varios parámetros operativos: la separación ánodo–cátodo, cuyo impacto en la distribución del espesor está ampliamente documentado; la valoración del efecto de renovar el baño además de su agitación mediante una recirculación continua del electrolito; y la realización de un análisis detallado de la distribución de espesores que se podría obtener con patrones geométricos en bajo relieve o sobre relieve. Las primeras pruebas pusieron de manifiesto algunos problemas de fiabilidad y falta de repetibilidad en los resultados obtenidos, incluso tras introducir modificaciones parciales. Estos hallazgos llevaron a la decisión de realizar un importante rediseño de muchos sistemas del equipo de microelectroconformado.

Este capítulo se organiza en cuatro secciones principales. En la primera se describe la preparación necesaria de las piezas modelo para usarse como cátodos, así como la correspondiente selección del baño electrolítico. La segunda describe el equipo de partida y se analizan los resultados de los ensayos iniciales, así como sus deficiencias. La tercera sección detalla los nuevos elementos incorporados durante el rediseño. Finalmente, el cuarto apartado presenta los ensayos ejecutados en condiciones estables con el equipo rediseñado, encaminados a determinar los parámetros operativos más adecuados para generar cáscaras de cobre microtexturizadas. El objetivo de este trabajo de investigación no era el optimizar el proceso de electroconformado, sino establecer un conjunto de parámetros operativos que con el equipo diseñado permitiera alcanzar cáscaras de cobre microtexturizadas aptas para su aplicación como herramientas SEDM.

5.1. Preparativos previos a la generación de cáscaras de cobre

Previo al inicio del proceso de electroconformado, es imprescindible realizar una preparación adecuada de las piezas modelo, con el objetivo de conferirles conductividad eléctrica en sus zonas funcionales. Dado que los modelos empleados son fabricados mediante MSLA, los materiales base utilizados son inherentemente dieléctricos. Por tanto, se requiere una etapa de metalizado superficial que transforme estas piezas en sustratos conductores aptos para funcionar como cátodos durante el proceso de electrodeposición.

Para conferir conductividad eléctrica a las piezas modelo generadas mediante fabricación aditiva, y preservar con máxima fidelidad las microtexturas, se empleó la técnica de sputtering como método de metalizado. Este procedimiento consiste en la deposición física de una delgada capa metálica sobre la superficie de la pieza, mediante la pulverización catódica de un blanco metálico (target) en condiciones de vacío controlado. La energía cinética de los iones inertes (habitualmente argón) es utilizada para desprender átomos del target, los cuales se condensan sobre la superficie del sustrato, formando una película conductora continua y homogénea.

En esta investigación, las piezas fueron sometidas a dos ciclos consecutivos de deposición, cada uno con una duración de 180 segundos. Esta doble capa permitió garantizar una cobertura completa de las microtexturas presentes en las zonas funcionales de la pieza, asegurando una adecuada continuidad eléctrica. La aplicación sucesiva de dos capas delgadas, en lugar de una única capa más

gruesa, se implementó con el fin de minimizar el riesgo de formación de irregularidades que pudieran afectar la replicación precisa durante el proceso posterior de electroconformado.

Durante la investigación se emplearon diferentes equipos como se indicó en el Capítulo III, pero todo con el mismo funcionamiento. No obstante, se produjeron interrupciones puntuales en la disponibilidad de los equipos de sputtering, lo que llevó a explorar técnicas alternativas que permitieran continuar con la fabricación sin comprometer la fidelidad geométrica de las texturas. Las opciones consideradas fueron:

- **Electrodeposición química (Electroless)**: técnica que permite el recubrimiento metálico sin aplicar corriente externa, mediante reacciones autocatalíticas. Con un control adecuado de concentración, temperatura y tiempo, permite obtener capas finas, útiles para iniciar el proceso de electroconformado sin distorsionar la textura [1,2].
- **Recubrimiento con nanopartículas metálicas**: método basado en la adhesión química o electrostática de nanopartículas (plata, titanio, sílice) sobre la superficie. Proporciona una excelente homogeneidad y una capa conductora ultrafina, sin enmascarar microestructuras [3,4].
- **Deposición por vapor (PVD/CVD)**: técnicas avanzadas que ofrecen control preciso del espesor de capa mediante deposición física o química en vacío. Aunque ideales en cuanto a calidad, requieren infraestructura especializada [5].
- **Métodos híbridos**: combinación de un recubrimiento inicial (electroless o nanopartículas) seguido por un refuerzo mediante galvanoplastia. Esta estrategia permite optimizar tanto la conductividad como la fidelidad geométrica.

La exploración de estas alternativas no solo permitió mantener el ritmo experimental ante contratiempos técnicos, sino que también aportó una metodología más robusta y adaptable.

Otro de los aspectos esenciales a considerar antes de preparar el equipo de laboratorio de electroconformado es la elección del baño electrolítico, ya que este determina en gran medida la calidad, uniformidad y propiedades finales de las capas depositadas. En esta investigación se ha optado por utilizar el mismo baño que se empleó en los trabajos previos que dieron origen al equipo de partida, garantizando así la continuidad metodológica y la compatibilidad técnica con los protocolos previamente validados.

El baño seleccionado es un baño de cobre ácido de alto rendimiento para electroconformado, comercializado bajo la denominación *High Performance Electroforming Bright Copper Bath* (n.º de artículo 3060400202) del sistema WILAPLAT. Se trata de una solución formulada específicamente para la deposición de cobre brillante, dúctil y prácticamente libre de grietas o tensiones internas [6].

Desde el punto de vista operativo, este baño contiene 50–60 g/l de cobre metálico y 50–65 g/l de ácido sulfúrico, manteniéndose a una temperatura de trabajo entre 20 y 30 °C, con una densidad de corriente recomendada entre 1,0 y 6,0 A/dm^2 y un pH inferior a 1. El voltaje operativo se sitúa entre 0,3 y 1,6 V, siendo necesaria la agitación del electrolito o del sustrato durante la deposición para asegurar una distribución uniforme del cobre [6].

Este baño ha demostrado ser altamente eficaz para la fabricación de cáscaras electroconformadas, permitiendo una replicación fiel de las microtexturas con buena adherencia, bajo nivel de defectos y propiedades mecánicas adecuadas para su posterior aplicación en SEDM.

5.2. Análisis del equipo de partida

Para responder a los requerimientos identificados en una investigación anterior, se diseñó y desarrolló un sistema de electroconformado compuesto por la integración de varios sistemas. Este

equipo combinaba elementos disponibles en el mercado con componentes de diseño y fabricación propios adaptados a las características geométricas y funcionales de las piezas modelo utilizadas en esa fase de la investigación (véase la Figura 5.1).

Aunque las dimensiones del tanque de ensayo y sus componentes fueron ajustadas a la escala de las piezas estudiadas en dicho trabajo, los sistemas de control implementados se concibieron con suficiente flexibilidad para permitir su adaptación a otras configuraciones geométricas, incluidas aquellas con dimensiones mayores. Esta versatilidad no solo amplía el espectro de aplicaciones del equipo, sino que también permite un funcionamiento estable y eficiente bajo diversas condiciones operativas.

Ese equipo de electroconformado se componía de los siguientes sistemas, ilustrados en la Figura 1:

1. **Fuente de alimentación:** Proporciona la energía eléctrica necesaria para el proceso de deposición, además de controlar y registrar los parámetros eléctricos del proceso.
2. **DCAB:** Sistema de control automático del equipo.
3. **Puente de sujeción:** Estructura que mantiene en posición las piezas modelo durante el proceso.
4. **Retroiluminación:** Facilita la inspección visual del progreso del electroconformado y permite la vigilancia del proceso.
5. **Sistema de agitación del baño:** Responsable de la homogeneidad del electrolito, que permite mejorar la uniformidad del depósito metálico.
6. **Tanque de micro electroconformado:** Depósito que contiene el electrolito y en el cual se desarrollan las reacciones electroquímicas.
7. **Cámara de vigilancia:** Permite monitorear en tiempo real el proceso, para identificar posibles anomalías operativas en remoto y la grabar el proceso.

Este enfoque modular y adaptable del equipo de electroconformado no solo satisfacía los requerimientos específicos de la investigación original, sino que también constituyó una base sólida para la evolución del sistema empleado en esta tesis. Se realizaron diversas modificaciones y mejoras que permitieron optimizar el equipo para los objetivos específicos del presente trabajo. Así, el sistema desarrollado en esta investigación se posiciona como una herramienta avanzada en el campo de la micro texturización y la fabricación mediante técnicas electroquímicas, consolidando su utilidad para futuras aplicaciones en este ámbito.

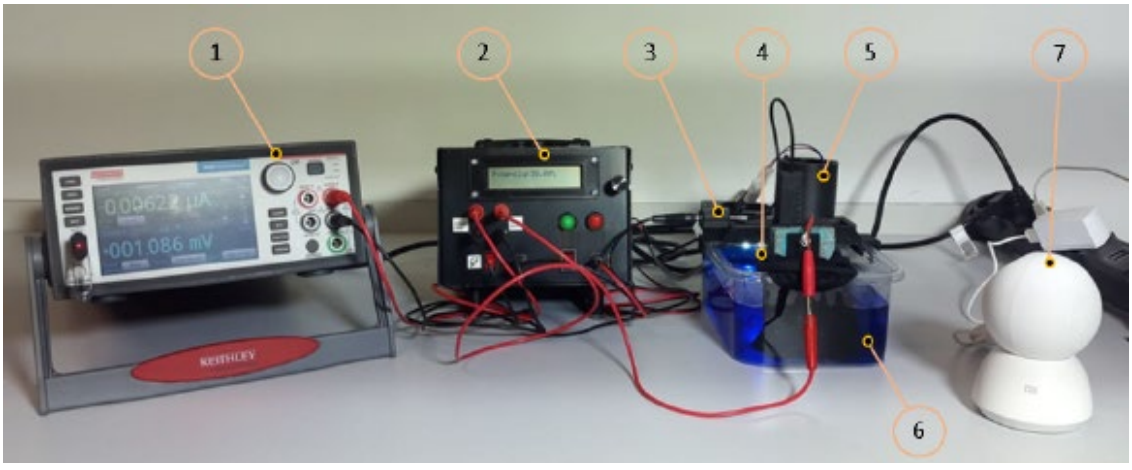


Figura 5.1. Componentes del equipo de micro electroconformado de partida. Imagen tomada de [7].

A continuación, se detallará brevemente cada uno de los elementos para poner en contexto, aquellos elementos que se seguirán usando en el presente estudio.

5.2.1. Fuente de alimentación

Para el proceso de electroconformado, se ha seleccionado como fuente de energía el KEITHLEY 2460 SourceMeter®, desarrollado por Keithley Instruments. Este dispositivo cumple una doble función como fuente de alimentación y como instrumento de medición, integrando ambas capacidades en lo que el fabricante denomina SMU (Source Measure Unit) [8]. Esta unidad permite realizar mediciones precisas de los parámetros eléctricos fundamentales que se derivan de la Ley de Ohm, como el voltaje, la corriente y la resistencia. Además, proporciona energía configurable tanto en términos de voltaje como de corriente, en función de las necesidades específicas del usuario. En la Figura 5.2 se presenta el panel de control del equipo.

En esta investigación, el KEITHLEY 2460 se ha utilizado como fuente de alimentación y, simultáneamente, como instrumento para la medición de los parámetros eléctricos relevantes durante el proceso de electroconformado. La capacidad de combinar en un solo equipo la generación de energía, la medición en tiempo real de los parámetros eléctricos del baño, el almacenamiento de los datos obtenidos y su posterior exportación representa un sistema imprescindible para los experimentos desarrollados en estos trabajos de investigación. Además, la facilidad de uso del equipo, gracias a su interfaz intuitiva, facilita la interacción del operador, optimizando los tiempos de operación.

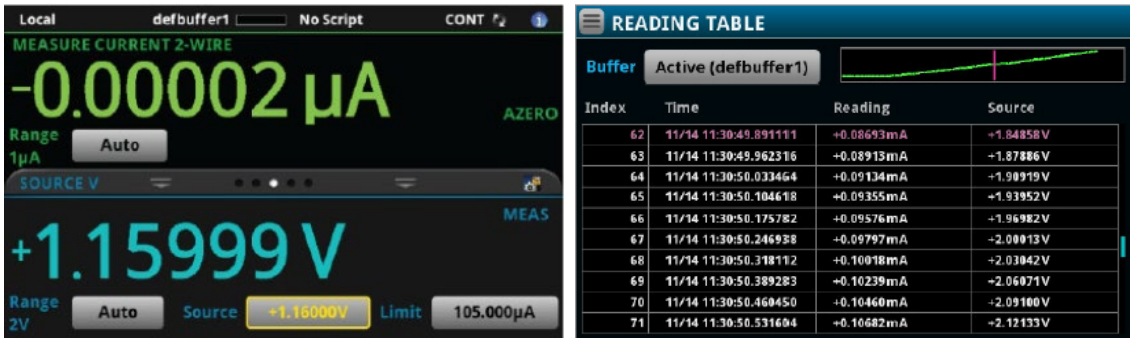


Figura 5.2. Equipo KEITHLEY 2460 SourceMeter®. Imagen obtenida de [8].

Este dispositivo destaca por su versatilidad y precisión en las mediciones, lo que lo convierte en una herramienta idónea para trabajar con componentes electrónicos y sistemas complejos. Según la documentación técnica proporcionada por el fabricante [8], es especialmente adecuado para la caracterización de semiconductores, dispositivos y materiales a escala nanométrica, así como para semiconductores orgánicos, circuitos impresos y dispositivos con geometrías reducidas y bajo consumo energético.

El KEITHLEY 2460 ofrece una precisión básica de medición del 0,012%, con una resolución de hasta 6 dígitos, lo que garantiza un alto nivel de fiabilidad en los resultados. La sensibilidad del equipo se extiende a rangos mínimos de 20 mV y 10 nA, tanto para la generación como para la medición de los parámetros eléctricos. Este rango de precisión permite su uso en aplicaciones exigentes, donde la estabilidad y exactitud de los datos son esenciales.

El equipo está equipado con una pantalla táctil de 5 pulgadas, lo que facilita una interacción rápida y eficaz por parte del operador. La interfaz gráfica, representada en la Figura 5.3, destaca por ser intuitiva y funcional, permitiendo una configuración ágil de los parámetros operativos. Esta característica, junto con la capacidad de almacenamiento y exportación de datos, convierte al KEITHLEY 2460 en una herramienta fundamental para los procesos experimentales, garantizando la eficiencia tanto en el control como en el análisis de los resultados.



a) b)

Figura 5.3. a) KEITHLEY 2460 - Pantalla de medición; b) KEITHLEY 2460 - Pantalla de lectura de datos. Imágenes obtenidas de [8].

5.2.2. Dispositivo de control automático (DCAB)

Este equipo ha sido desarrollado internamente utilizando componentes electrónicos de bajo costo, con el propósito de facilitar su replicación en diversos laboratorios. Esta concepción flexible permite que el sistema pueda ser adaptado a las condiciones particulares de distintas líneas experimentales.

El DCAB es un dispositivo electrónico cuya función principal es regular la agitación del baño electrolítico. Además de controlar el flujo de la bomba de impulsión, este equipo actúa como una interfaz entre la fuente de alimentación y los componentes del sistema electrolítico. Adicionalmente, también proporciona potencia para el sistema de retroiluminación LED.

Las características principales se describen a continuación:

- **Entrada:** AC universal con rango completo.
- **Protección:** Incluye un fusible de vidrio de 0,5A para evitar cortocircuitos.
- **Refrigeración:** Por convección, mediante libre circulación de aire.
- **Indicadores LED:** Uno para el encendido del equipo y otro para la retroiluminación (salida a 24 VDC).
- **Salidas:** Provisión de múltiples salidas de 24 VDC/1,5 Ah.
- **Conexiones:** Dos pares de terminales banana en el panel frontal (positivo y negativo) y dos salidas de 24 V en el mismo panel.
- **Interfaz:** Pantalla LCD alfanumérica para la interacción con el usuario.
- **Controles:** Botones en el panel frontal para configurar el funcionamiento.
- **Modos de operación:** Control manual o automático de la potencia de salida.
- **Dimensiones:** 205 mm (largo) x 170 mm (ancho) x 125 mm (alto).

En la Figura 5.4 se presenta una vista detallada de los componentes principales del DCAB. Para obtener una descripción más profunda de cada uno de estos elementos, se recomienda consultar el trabajo de Sánchez-Morales [7].

En lo que respecta a su funcionamiento, el DCAB ajusta la velocidad de la bomba mediante la regulación del voltaje de salida. Este dispositivo ofrece dos modos operativos: manual y automático.

- **Modo manual:** En esta modalidad, el operador tiene control directo sobre la velocidad de giro de la bomba, lo que a su vez determina el flujo del electrolito. Dos botones ubicados en el panel frontal permiten ajustar la velocidad: el botón rojo incrementa el voltaje de salida y, por ende, el flujo, mientras que el botón verde lo disminuye. Si no se realizan ajustes, el sistema conserva el último valor establecido. La pantalla LCD muestra el valor de referencia en forma de porcentaje, indicando la proporción respecto a la potencia nominal de la bomba.

- **Modo automático:** En esta configuración, el equipo gestiona de manera autónoma el funcionamiento de la bomba, requiriendo la intervención del operador solo para modificar el valor de referencia. El sistema realiza mediciones continuas de la corriente que atraviesa el circuito, comparándolas con la intensidad de referencia programada. En función de la diferencia detectada, el DCAB ajusta automáticamente la potencia de salida. Durante este modo, la pantalla LCD no solo muestra el valor de consigna, sino también la corriente medida en tiempo real y la intensidad de referencia programada.

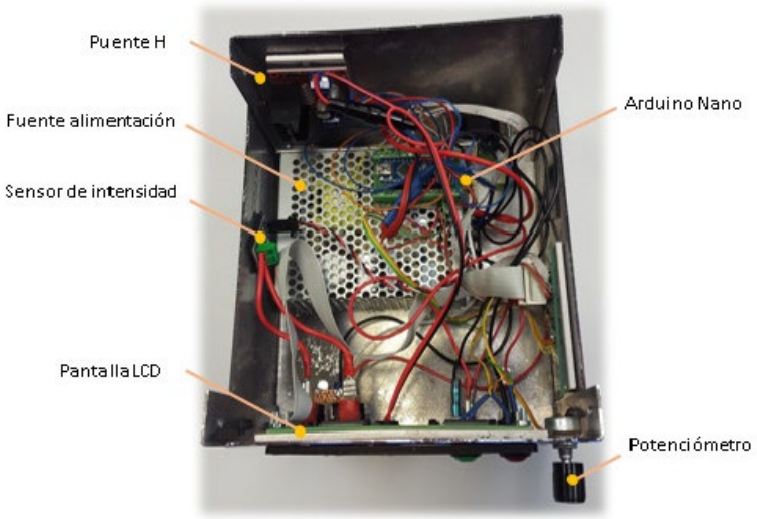


Figura 5.4. Componentes principales del CDAB. Obtenido de [7].

Este diseño de doble modalidad garantiza tanto la flexibilidad operativa como la eficiencia en la gestión del equipo de laboratorio, permitiendo al operador seleccionar la configuración más adecuada según las condiciones experimentales.

5.2.3. Puente para sujeción del cátodo o pieza modelo

El puente de sujeción constituye un componente de diseño propio, cuya función principal es proporcionar soporte a la pieza modelo sobre la que se lleva a cabo el proceso de deposición, además de permitir la conexión con los demás componentes del sistema, completando el circuito eléctrico necesario para la operación.

La necesidad de este sistema surgió debido a las características geométricas particulares de las distintas piezas modelo, las cuales demandaban una solución específica para la fijación y la conexión eléctrica. Con base en estos requerimientos, se diseñó un sistema de fijación basado en una estructura tipo puente biapoyado, que incorpora un mecanismo de desplazamiento mediante sistema de corredera. Este diseño permite adaptar la posición de la pieza modelo en función de las necesidades del proceso experimental. Las dimensiones generales del puente se establecieron en 154 mm x 32 mm x 80 mm (largo, ancho y alto, respectivamente).

El puente de sujeción se compone de cuatro elementos principales: la estructura de soporte, la mecha, el anillo de desplazamiento, y el bulón de bloqueo. Cada uno de estos elementos contribuye a la estabilidad y precisión del sistema, facilitando tanto la fijación segura de la pieza modelo como la correcta alineación con los componentes eléctricos. La Figura 5.5 muestra la disposición y ensamblaje de estos elementos.

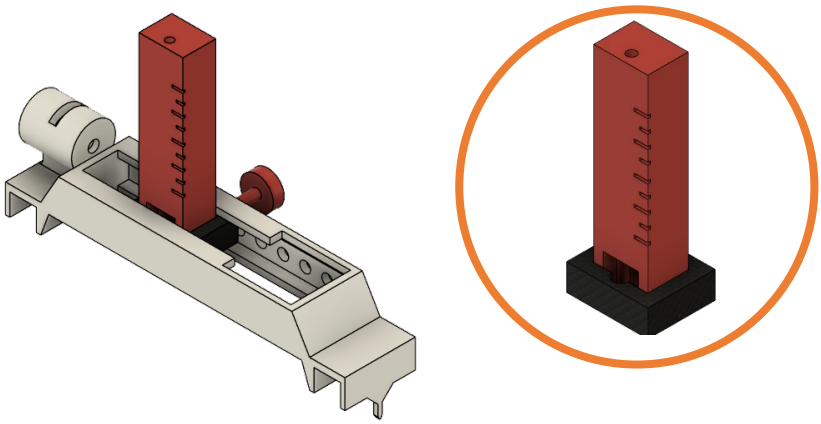


Figura 5.5. Modelado del puente de sujeción. Información obtenida de [7].

Para una explicación más detallada sobre las características individuales de cada componente y su interacción dentro del sistema, se remite al trabajo de Sánchez-Morales [7], donde se describe con mayor profundidad la funcionalidad y los criterios de diseño que guiaron la creación de este sistema.

5.2.4. Retroiluminación

La retroiluminación consiste en la integración de un módulo LED encapsulado con doble óptica, ubicado en la parte posterior externa del tanque de ensayos. Este sistema se activa de forma manual mediante un interruptor situado en la esquina inferior derecha del panel frontal del DCAB.

Este sistema resulta especialmente útil en el análisis de piezas modelo elaboradas con materiales transparentes o semitransparentes, ya que permite identificar áreas opacas formadas durante el proceso, lo que facilita la evaluación de la deposición en curso. De esta manera, el investigador puede verificar, en tiempo real, las zonas donde la deposición ha ocurrido correctamente y aquellas donde es insuficiente o ausente.

Una de las principales ventajas del sistema es que permite realizar inspecciones intermedias sin interrumpir el experimento, aportando información continua sobre el desarrollo del proceso. Esto es clave para detectar irregularidades tempranas y ajustar las condiciones operativas con mayor precisión. La Figura 5.6 muestra el efecto del sistema de retroiluminación durante el servicio.

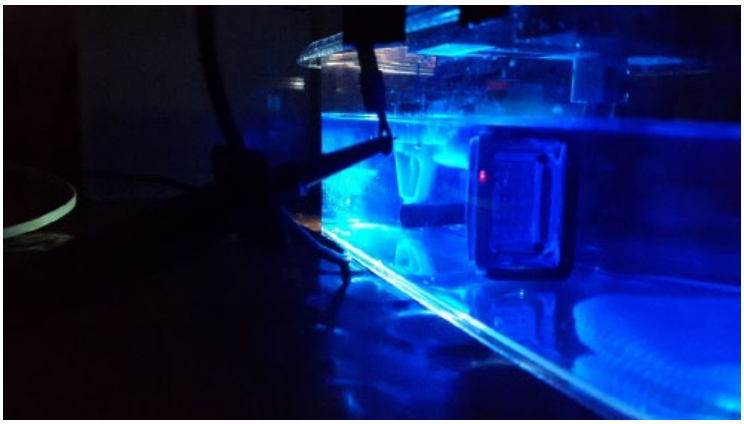


Figura 5.6. Tanque de ensayos con sistema de retroiluminación activa. Obtenido de [7].

Como se puede observar, este seguimiento resulta crucial en las fases iniciales del proceso, permitiendo entender mejor cómo la forma del objeto influye en la distribución del material depositado y optimizar el diseño experimental sin necesidad de detener el ensayo.

5.2.5. Sistema de agitación del baño

El sistema incorpora una bomba centrífuga de flujo radial para generar la impulsión del fluido. En este tipo de bomba, el flujo a la salida del rodete es perpendicular al eje de rotación; el fluido entra de forma axial por la boquilla de aspiración, atraviesa el rodete y es descargado hacia la carcasa. El rodete o impulsor utilizado es de tipo abierto, lo que favorece su operación en condiciones específicas.

Este dispositivo, diseñado inicialmente para tratamientos de hemodiálisis, está preparado para trabajar en contacto con fluidos corrosivos. Todas las partes que interactúan con el fluido, como la carcasa, el rodete, y los conductos de aspiración e impulsión, están fabricadas con materiales plásticos para asegurar su resistencia química. El accionamiento del sistema se realiza mediante un campo magnético, lo que permite que rotor y estator permanezcan aislados y completamente estancos, minimizando el desgaste y el riesgo de contaminación. La Figura 5.7 muestra una imagen detallada de la bomba.

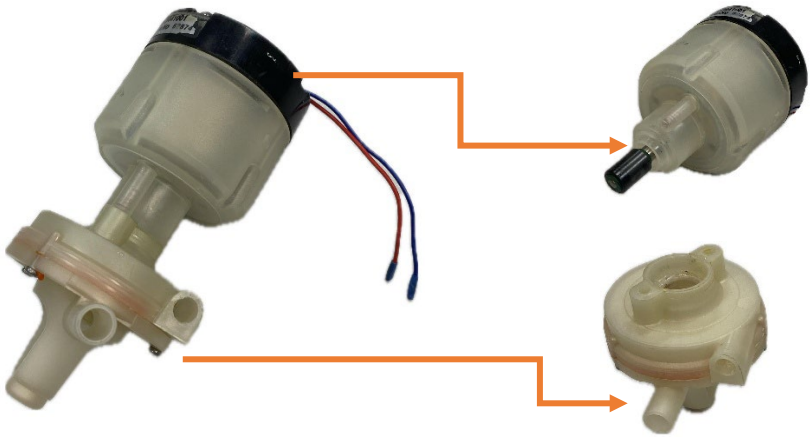


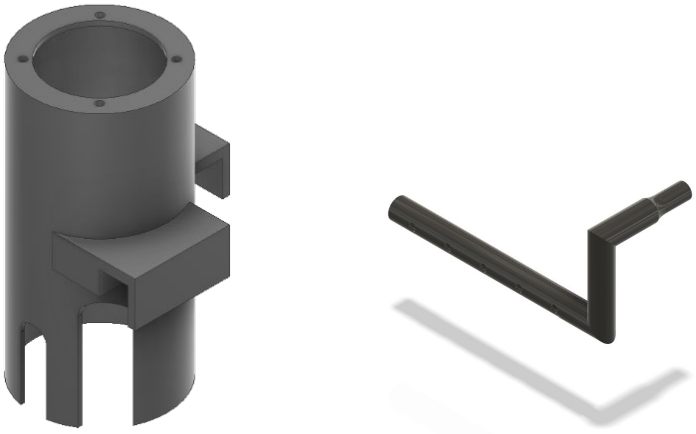
Figura 5.7. Imagen de la bomba centrífuga utilizada.

El parámetro más relevante para describir el desempeño de la bomba es el caudal, cuyo control es fundamental para regular el grado de agitación del baño electrolítico. Modificar el flujo permite optimizar las condiciones del proceso experimental, garantizando una distribución uniforme del electrolito y favoreciendo una deposición controlada.

Para asegurar la integración de la bomba en el sistema experimental y adaptar su funcionamiento al tanque, se desarrollaron varios componentes adicionales, los cuales se describen brevemente a continuación:

- **Carcasa:** Elemento de diseño propio que sirve como sistema de fijación y protección de la bomba. Su geometría fue diseñada para adaptarse a las dimensiones específicas del tanque de experimentación.
- **Colector:** Componente también de diseño propio, cuya función es distribuir el flujo de agitación generado por la bomba, asegurando una circulación uniforme del fluido dentro del baño.

Estos componentes accesorios (Figura 5.8) fueron fundamentales para lograr la correcta operación del sistema de agitación, maximizando la eficiencia del proceso y un control preciso del entorno experimental.



a) b)

Figura 5.8. Sistema de agitación: a) carcasa para bomba; b) colectores.

5.2.6. Tanque de microelectroconformado

El tanque experimental es el componente destinado a contener el baño electrolítico en el que se llevarán a cabo los ensayos. Dada la geometría del modelo funcional, se estableció que la profundidad mínima del recipiente debía ser de 50 mm para asegurar una inmersión adecuada. Además, se determinó que la transparencia era una propiedad imprescindible, ya que permitía una interacción visual con el proceso, incluso en las zonas sumergidas.

Con base en estos criterios, se seleccionó un recipiente transparente fabricado en polipropileno, cuyas dimensiones son 205 mm x 126 mm x 70 mm (largo, ancho y fondo), con una capacidad máxima de 1,5 litros. La elección de este material no solo garantiza la transparencia requerida, sino que también proporciona resistencia química adecuada para el contacto prolongado con el electrolito.

Para aumentar la versatilidad de los ensayos, el tanque se equipó con dos escalas de medición regulares y discretas, ubicadas en los ejes horizontal y vertical (Figura 5.9). La escala horizontal presenta divisiones de 10 mm, facilitando la configuración de ensayos de tipo ánodo-cátodo. En el eje vertical, se incluyó una escala con incrementos de 100 ml, destinada a medir con precisión el volumen del baño electrolítico durante las pruebas. Estas escalas permiten un control más detallado de las variables experimentales, contribuyendo a la reproducibilidad y precisión de los resultados obtenidos.

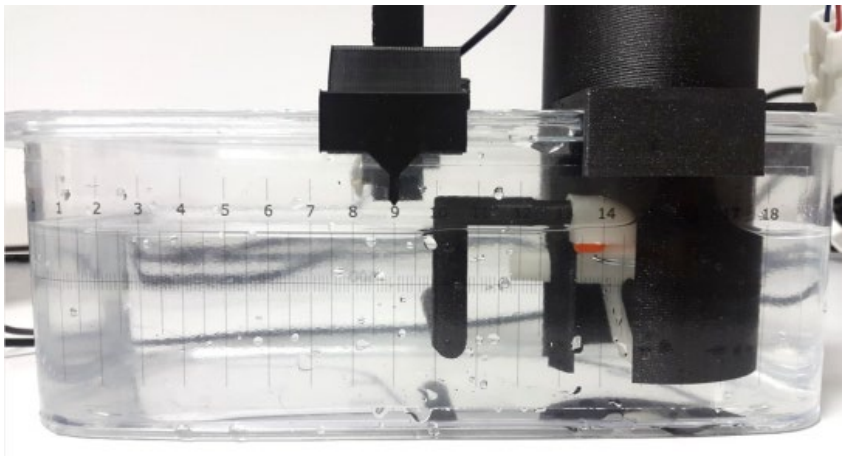


Figura 5.9. Escalas del tanque de deposición. Imagen obtenida de [7].

5.2.7. Fijación del ánodo

La fijación del ánodo es un componente derivado del diseño desarrollado en estudios previos, destinado a soportar y posicionar el ánodo dentro del tanque de ensayos. Su configuración se ajustó a las dimensiones del ánodo de cobre utilizado, el cual presenta una sección rectangular con medidas de 100 mm x 50 mm x 10 mm (largo, ancho y espesor).

Como se muestra en la Figura 5.10, la estructura tiene una forma en "h", lo que permite un desplazamiento lateral del ánodo. Esta característica facilita la alineación precisa con los demás elementos del sistema, para buscar una distribución lo más uniforme posible del campo eléctrico.

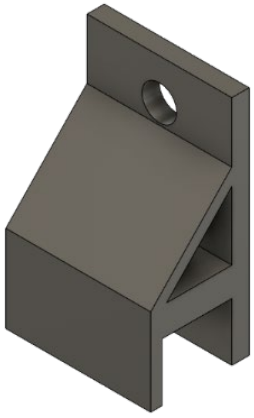


Figura 5.10. Elemento de fijación del ánodo. Hacer mi imagen.

5.2.8. Máscara protectora para la pieza modelo

Durante los primeros ensayos con modelos funcionales se detectó un crecimiento no controlado de la cáscara en los bordes de las piezas modelos, como muestra la Figura 5.11. Estos crecimientos se extendían incluso hacia la parte trasera de los mismos debido al efecto de crecimiento de borde, que resta deposición del metal en las zonas funcionales, además de dificultar la separación de la cáscara.



Figura 5.11. Metalizado de la pieza modelo en la parte no funcional.

Para evitar estos crecimientos indeseados, fue necesario desarrollar una máscara adaptada al contorno exterior de la pieza modelo. El diseño priorizó la facilidad de montaje y desmontaje sin interferir en la funcionalidad de la geometría del modelo. La máscara, de sección cuadrada con dimensiones de 40,9 mm x 40,9 mm, incorpora un escalón saliente de 1,25 mm x 1,20 mm (alto x ancho) que actúa como barrera para impedir la propagación de la deposición hacia los bordes. Además, incluye un rebaje para ajustarse al elemento saliente de la zona de fijación de la pieza modelo.



Figura 5.12. Máscara protectora de la pieza modelo.

Esta máscara limita la deposición metálica en la superficie funcional y mejorando así la calidad de las cáscaras obtenidas.

5.2.9. Cámara de vigilancia

La implementación de un dispositivo monitorear el progreso del proceso de deposición se consideró como una innovación significativa en el desarrollo experimental, dado que no se encontró documentación previa en la literatura científica revisada que aborde esta aproximación. La capacidad de observar en tiempo real el estado de las deposiciones, capturar imágenes específicas y revisar archivos con la grabación completa del proceso podría abrir una línea prometedora para la mejora del equipo experimental.

Para la aplicación en los experimentos, se seleccionó la cámara “Mi Home Security Camera 360° 1080P” del fabricante chino Xiaomi (Figura 5.13), cuyas especificaciones resultan compatibles con las exigencias del proceso. En particular, la resolución de 1080P, junto con un ángulo de visión de 110°, proporciona imágenes claras y detalladas del área de ensayo, permitiendo una evaluación precisa del desarrollo del experimento.



Figura 5.13. Cámara Xiaomi para control del proceso de electroconformado.

Una característica destacada de esta cámara es su conectividad remota y la posibilidad de control mediante una aplicación móvil, lo que facilita al investigador la supervisión en tiempo real del proceso experimental sin necesidad de estar en el laboratorio. Este enfoque introduce una innovación respecto a los sistemas de ensayo convencionales utilizados en procesos de electroconformado, los cuales no suelen contar con opciones de monitoreo continuo ni control remoto, mejorando así la eficiencia y control del procedimiento experimental.

5.2.10. Fase experimental de operación con equipo de partida

El equipo descrito anteriormente fue empleado durante las fases iniciales de la presente investigación, utilizando todos los componentes mencionados en su configuración original. A continuación, se presentan los primeros resultados de los ensayos experimentales realizados con este sistema, los cuales permitieron evaluar su desempeño operativo y detectar las limitaciones que motivaron su posterior rediseño.

Antes de comenzar, se observó que la configuración original presentaba limitaciones importantes, entre ellas la imposibilidad de ajustar con precisión la distancia ánodo–cátodo, la cual estaba determinada por las dimensiones del tanque y la disposición fija de los componentes, que reducía el margen de maniobra.

Por otra parte, el programa de deposición utilizado en esta fase preliminar se resume en la Tabla 5.1. Este programa, heredado de la investigación anterior, presentaba una duración total de aproximadamente 24 horas para la obtención de una carcasa completa.

Como primera aproximación, se exploró el efecto de modificar la distancia de colocación del cátodo a 50 mm (la mitad de la distancia establecida previamente), empleando piezas modelo con texturas en semiesferas de escala reducida (aproximadamente la mitad del tamaño utilizado en trabajos anteriores). Estas primeras pruebas se desarrollaron de forma adecuada, logrando la completa formación de las cavidades sin defectos aparentes, con espesores promedio en torno a las 120 µm en la zona texturizada.

Tabla 5.1. Programa de deposición inicial.

Etapas	Corriente	Voltaje	Tiempo
1	100 mA	Variable	15 min
2	Variable	0.5 V	1260 min
3	Variable	1 V	120 min
4	900 mA	variable	120 min

Dado que dicho espesor resultaba relativamente bajo, se planteó un estudio comparativo más detallado. Aprovechando las restricciones geométricas del tanque, se seleccionaron tres distancias experimentales entre electrodos: 60, 80 y 100 mm, separadas en intervalos regulares de 20 mm. La investigación previa había establecido una separación de 100 mm; no obstante, se consideró oportuno evaluar las distancias más cortas (60 y 80 mm) con el objetivo de verificar si, en el caso de texturas de menor escala, era posible obtener resultados comparables o incluso mejorados, especialmente en términos de deposición efectiva de cobre.

Con el fin de simplificar el procedimiento y centrarse en el efecto directo de la distancia ánodo-cátodo, se modificó el protocolo experimental. Se aplicó inicialmente una única etapa en el equipo experimental con una corriente de 100 mA durante 30 minutos para generar un recubrimiento preliminar de cobre para mejorar la conductividad y facilitar la deposición posterior. Para la segunda fase, las muestras fueron transferidas a un sistema de galvanoplastia compacto (modelo PGG 10/3B), utilizado como unidad de electroconformado industrial en el Laboratorio de Metrología y Calibración de la ULPGC. En este equipo se continuó la deposición mediante la aplicación de una corriente constante de 1 A durante un periodo prolongado de 2 horas (véase Figura 5.14).

Este enfoque por etapas tenía como objetivo optimizar los tiempos de procesamiento: la fase inicial de bajo amperaje aseguraba la integridad y adherencia de la capa inicial, mientras que la segunda fase, de mayor intensidad, el aumento del espesor de la carcasa.



Figura 5.14. Equipo de electroplating empleado como equipo de electroconformado.

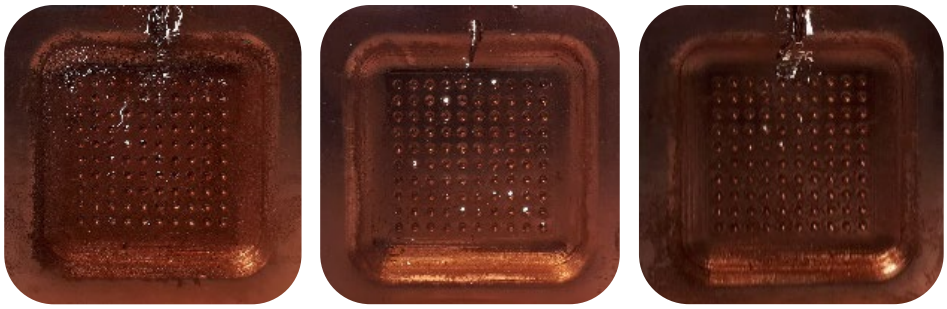
Para el análisis experimental, se adoptó un diseño de experimentos basado en el método Taguchi, aplicando una matriz L3 correspondiente a un único factor (distancia ánodo–cátodo) con tres niveles (60, 80 y 100 mm). A fin de aumentar la robustez estadística del estudio, se realizaron cinco repeticiones por nivel, obteniendo un total de 15 ensayos. La textura empleada en todos los casos fue una geometría entrante con semiesferas. Los resultados obtenidos en términos de incremento de peso se resumen en la Tabla 5.2.

Los datos reflejan una mayor deposición de cobre en las distancias más cortas (60 y 80 mm). No obstante, las mediciones mostraron una alta variabilidad en los valores obtenidos, lo que puso de manifiesto posibles inconsistencias en la conectividad eléctrica del sistema.

Tabla 5.2. Estudio sobre distancia ánodo-cátodo con equipo partida con electrodos texturizados bajo relieve.

Pesos electrodos texturizados (g)			
Ensayos realizados	Distancia (mm)		
	100	**80**	**60**
1	0.074	0.203	0.118
2	0.074	0.194	0.108
3	0.089	0.084	0.134
4	0.092	0.136	0.162
5	0.129	0.147	0.103
Peso medio	**0.091**	**0.153**	**0125**

Imágenes representativas de las piezas modelo tras generarse la deposición de cobre inicial se presentan en la Figura 5.15. Cabe destacar que, en esta fase, el sistema de unión al cátodo aún no había sido optimizado, recurriéndose al uso de un hilo de cobre insertado en un canal del ~~mango~~ elemento de sujeción para mejorar la conductividad. Sin embargo, este método introdujo discontinuidades que pudieron afectar negativamente la uniformidad del depósito metálico, mostrando unos defectos visiblemente localizados en el centro de la parte superior por donde se ubica ese elemento de sujeción.



a) b) c)

Figura 5.15. Electrodos electroconformados: a) distancia 100; b) distancia 80; c) distancia 60

Con el objeto de valorar si las texturas estaban influyendo de alguna forma en estos problemas, se diseñó un estudio complementario utilizando piezas modelo con superficies planas, manteniendo constante el área funcional del electrodo. El modelo empleado en este caso se muestra en la Figura 5.16.

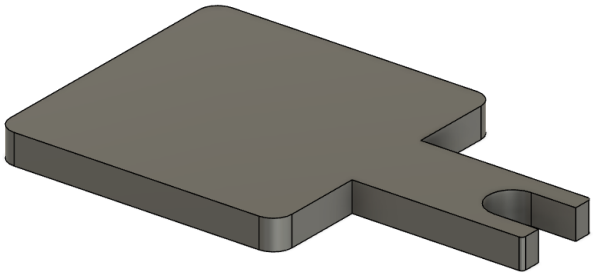


Figura 5.16. Pieza modelo plana (Modelo EMT_P_0).

Se repitieron los experimentos utilizando dichos electrodos planos, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 5.3. Los datos obtenidos no permitieron extraer conclusiones claras debido a la variabilidad de los mimos.

Tabla 5.3. Estudio distancia ánodo-cátodo equipo partida con electrodos planos.

Peso electrodos planos (g)			
Ensayos realizados	Distancia (mm)		
	100	**80**	**60**
1	0.098	0.163	0.141
2	0.096	0.162	0.091
3	0.092	0.164	0.035
4	0.095	0.117	0.069
5	0.092	0.126	0.054
Peso medio	**0.095**	**0.146**	**0.078**

Tras esta primera deposición, se procedió a realizar una segunda fase de deposición con estos mismos electrodos planos, utilizando el equipo de galvanoplastia industrial anteriormente mencionado. En esta unidad, la distancia entre ánodo y cátodo no podía modificarse, estando fijada a 80 mm. Los ensayos se llevaron a cabo bajo una corriente constante de 1 A durante 2 horas, con el objetivo de aumentar significativamente el espesor de la cáscara. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Estudio distancia ánodo-cátodo aumento de espesor en equipo industrial.

Peso cáscara tras descarga de 1A durante 2 horas (g)			
Ensayos realizados	Distancia (mm)		
	100	**80**	**60**
1	1.6989	1.6665	1.5979
2	1.5939	1.4508	1.5716
3	1.7473	1.5049	1.5658
4	1.5090	1.5921	1.7860
Peso medio	**1.6372**	**1.5535**	**1.6303**

Los resultados evidencian una masa de deposición metálica bastante homogénea entre piezas, independientemente del peso inicial de los electrodos previamente metalizados en la fase previa.

Sin embargo, el objetivo principal de esta investigación se centra en la fabricación de electrodos microtexturizados de alta precisión, donde las fases iniciales del proceso de electroconformado son críticas para replicar lo mejor posible la microtextura diseñada. La alta variabilidad de los datos obtenidos en estas pruebas iniciales apuntaba a la existencia de múltiples variables que interactúan simultáneamente, lo cual dificulta la identificación aislada de sus efectos individuales sobre la deposición. En consecuencia, se consideró imprescindible realizar una revisión integral del diseño del equipo de laboratorio, con el fin de incorporar mejoras que permitan un control más preciso de las condiciones operativas.

El apartado siguiente detalla el rediseño de varios sistemas que fueron implementados en el equipo de microelectroconformado, así como los nuevos programas de deposición desarrollados para avanzar en la producción de cáscaras de cobre con microtexturas de mayor calidad.

5.3. Rediseño equipo electroconformado

Los resultados obtenidos en la fase experimental inicial pusieron de manifiesto la necesidad de revisar en profundidad el diseño del equipo de electroconformado utilizado. Aunque el sistema original permitía llevar a cabo procesos de deposición con un planteamiento económico y funcional, su configuración presentaba claras limitaciones para el control preciso de variables críticas.

Estas restricciones dificultaban la realización de estudios sistemáticos orientados a mejorar el comportamiento del proceso, especialmente en contextos de microtexturización. Por tanto, se procedió al rediseño de sistemas, incorporando nuevas funcionalidades que posibilitaban una evaluación más fiable y repetible del proceso de electroconformado. A continuación, se resumen estas especificaciones de diseño establecidas, las cuales reflejan los problemas detectados y definen los criterios a cumplir por el equipo:

- **Control preciso de la distancia ánodo-cátodo:** Se requiere ajustar y mantener con exactitud la separación entre el ánodo y el cátodo durante la deposición. Pequeñas variaciones en esta distancia podrían afectar significativamente la distribución y uniformidad del espesor depositado. El equipo original presentaba limitaciones para regular este parámetro debido a la longitud del tanque y la disposición de los componentes en su interior, lo que impedía evaluar adecuadamente su impacto. Por ello, se estableció como especificación fundamental dotar al sistema de un mecanismo que permitiera variar y controlar de forma precisa la distancia entre electrodos durante el proceso.

- **Recirculación y renovación constante del baño electrolítico:** Es esencial mantener homogénea la concentración de iones metálicos en la zona de la deposición metálica. La renovación del baño, además de su agitación, previene la formación de gradientes de concentración y evita el agotamiento local de reactivos. En el diseño original no se hacía

renovación del baño, sino se recirculaba de forma continua el mismo volumen de electrolito que contenía el tanque de microelectroconformado. Se creía que este aspecto es lo que podía conducir a los depósitos irregulares y de baja calidad que en ocasiones habíamos obtenido. Por tanto, el rediseño debía incorporar recirculación y renovación del baño para intentar obtener unas condiciones más uniformes durante toda la duración del proceso.

- **Mejor sujeción y conectividad eléctrica del cátodo:** La estabilidad mecánica y eléctrica del cátodo se identificó como un factor crítico para la fiabilidad y repetibilidad del proceso. Se observó que una fijación inadecuada del cátodo, junto con conexiones eléctricas poco robustas, generaba variaciones indeseadas y problemas en los ensayos. En consecuencia, se definió la necesidad de diseñar un sistema de sujeción más firme para el cátodo que asegurase su posición durante la deposición, al mismo tiempo que mejorara la conexión y conductividad eléctrica. Esto permitiría mantener un contacto eléctrico estable y minimizar caídas de voltaje o fluctuaciones de corriente debidas a malas conexiones en las fases iniciales del proceso.

- **Depósito selectivo en zonas funcionales (protecciones y máscaras):** Para lograr piezas funcionales de alta precisión, el equipo debe limitar la deposición metálica únicamente a las áreas deseadas de la pieza modelo. En los ensayos iniciales se detectaron crecimientos de cobre superiores en la zona de los bordes, lo cual podía comprometer la calidad de la microtextura obtenida. Para evitarlo, se planteó como criterio de diseño la incorporación de pantallas o protecciones adaptadas a la geometría de la pieza, para que, de esta forma, la deposición del baño se concentra en las superficies objetivo, garantizando que el cobre se deposite en mayor medida donde es necesario.

Los apartados siguientes exponen de manera detallada las etapas evolutivas que han conducido a la configuración final del equipo, resaltando los elementos de mejora incorporados. Es importante señalar previamente que muchas piezas fueron fabricadas mediante la propia tecnología MSLA. Se utilizaron varias resinas en versiones iniciales de esos componentes que dieron problemas de compatibilidad con el baño electrolítico. Se concluyó que la resina Esun PLA Pro, ha demostrado un buen comportamiento en contacto con el baño de cobre, sin evidenciar defectos tales como grietas o deformaciones tras una exposición prolongada al mismo, que si se experimentaron con otras. Los parámetros de impresión empleados se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.5. Especificaciones técnicas para impresión con resina Esun PLA Pro.

Items	Parámetros	Valores
Información básica	Altura de capa (mm)	0.05
	Velocidad de retracción (mm/min)	150
Capas inferiores	Capas inferiores	4
	Tiempo(s) de exposición (seg)	40
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Capas normales	Tiempo(s) de exposición (seg)	4
	Distancia de elevación (mm)	6
	Velocidad de elevación (mm/min)	60
Espera durante impresión	Tiempo de descanso después de retractar(es)	3

5.3.1. Tanque de electroconformado

Uno de los aspectos fundamentales en el rediseño es la implementación de un sistema de doble depósito, orientado a garantizar la renovación del baño electrolítico en el depósito destinado al electroconformado. En este enfoque, se ha establecido una proporción de 1:3, de manera que el depósito superior tiene una capacidad de 1 litro, mientras que en la base del depósito inferior se

almacenan 3 litros, facilitando así la renovación continua del baño. Además, las dimensiones del depósito de almacenamiento, 400 × 300 × 230 mm, permite albergar en su interior a muchos de los sistemas, principalmente a todos los que están en contacto con el baño electrolítico. De esta forma, si se produjese un escape de baño en las conducciones, este quedaría confinado en el interior del depósito grande evitando su pérdida y contaminación.

Con el objetivo de mantener la filosofía de un equipo de laboratorio de bajo coste, modular y de fácil replicabilidad, se optó por seleccionar elementos comerciales disponibles en el mercado, específicamente de IKEA. La Figura 5.17 ilustra los recipientes empleados, identificándose el tanque inferior con el modelo TROFAST (Figura 5.17a) y el tanque superior con el modelo GODMORGON (Figura 5.17b).



a) b)

Figura 5.17. Recipientes para equipo de micro electroconformado: a) Modelo TROFAST; b) Modelo GODMORGON.

Por su parte, el tanque superior se obtuvo del paquete GODMORGON, el cual incluye cinco recipientes de reducido tamaño. En este estudio se ha seleccionado el contenedor de dimensiones intermedias (220 × 78 × 95 mm), ya que permite almacenar 1 litro y albergar adecuadamente los elementos esenciales para el proceso de deposición. Adicionalmente, se evaluó la opción de utilizar el recipiente de mayor tamaño (240 × 200 × 95 mm), lo que posibilitaría trabajar con tres piezas de forma simultánea, requiriendo en tal caso volúmenes de 2,5 litros para el depósito superior y 7,5 litros para el inferior.

Dado que el llenado del depósito podría mantenerse de forma continua durante todo el proceso, se diseñó una salida situada a la altura correspondiente a 1 litro, de modo que se garantice un volumen constante del baño y redirija el excedente de baño al tanque inferior. Para ello, se realizó un corte en el tanque, generando una ranura que permite la integración del elemento de conducción (ver Figura 5.18). La unión entre este elemento y el tanque se efectuó mediante adhesivo epóxico de compatibilidad contrastada con el baño para sellar el contorno.

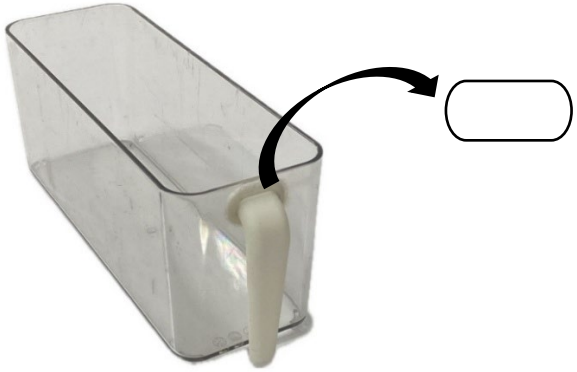


Figura 5.18. Tanque modificado con elemento de salida para realizar el proceso de electroconformado.

Este componente consiste en una boquilla acodada diseñada con una sección transversal que se ensancha en la parte superior y se estrecha progresivamente hasta su boca de salida, facilitando así un flujo controlado del baño, tal y como se ilustra en la Figura 5.19. Esta pieza se fabricó mediante el proceso ya mencionado.



a) b) c)

Figura 5.19. Elemento de salida del baño en el tanque superior: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

5.3.2. Separación entre tanques

Con el fin de separar y proteger el baño electrolítico inactivo en el tanque de almacenamiento, se desarrolló una tapa divisoria ajustada al contorno interior del tanque a la altura que permite contener algo más de 10 litros bajo ella. Para la fabricación de este elemento se empleó una plancha metacrilato de 5 mm de espesor, material seleccionado por su facilidad de procesamiento mediante corte láser, lo que permite obtener formas precisas de manera rápida y eficiente, y por su comprobada estabilidad en contacto con el baño electrolítico. Sobre esta plancha se apoyan y posicionan el resto de sistemas como el tanque de microelectroconformado y la bomba de recirculación. En ella se han abierto unos huecos para posicionar el filtro y el paso del conducto de alimentación a la bomba que forman parte del sistema de recirculación y renovación (ver Figura 5.20).



Figura 5.20. Tapa divisoria de ambos tanques.

5.3.3. Tapa para colocación de elementos de sujeción

Se incorpora al equipo una serie de elementos modulares que pueden posicionarse de forma individual, permitiendo así el estudio aislado de las diversas variables implicadas en el proceso de electroconformado. Con el objetivo de garantizar la correcta fijación y ubicación de dichos componentes durante el funcionamiento del sistema, se diseñó una tapa especializada.

La tapa, ilustrada en la Figura 5.21, fue fabricada mediante corte láser en una plancha de metacrilato transparente de 5 mm de espesor. En su estructura se integró un rail central que posibilita la colocación del cátodo en posiciones variables, espaciadas a intervalos de 20 mm. Dicho rail permite ajustar la posición del cátodo desde una ubicación cercana, a 60 mm del ánodo, hasta una ubicación alejada, a 180 mm, lo que facilita el análisis del efecto de la distancia ánodo-cátodo, estudio que se describirá posteriormente.

Asimismo, a ambos laterales del rail se dispusieron orificios que permiten también cambiar la posición del elemento que introduce el baño en el tanque de proceso. Estos orificios, separados entre sí por 15 mm, facilitan el ajuste de la posición del sistema de recirculación conforme varíe la ubicación del cátodo.

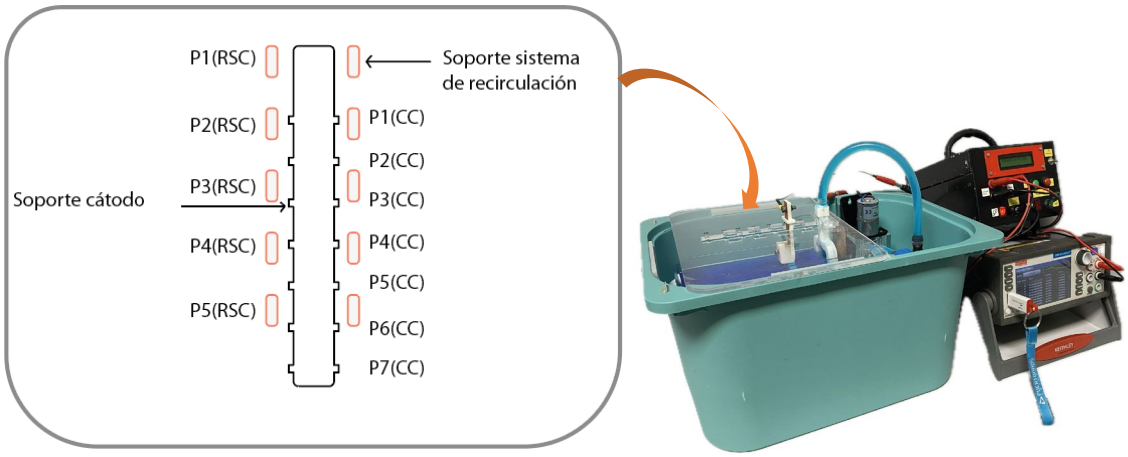
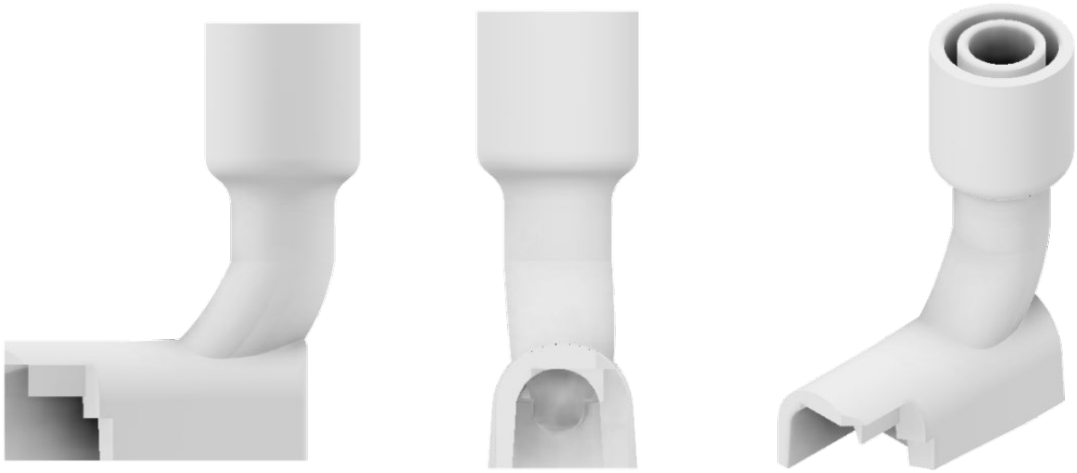


Figura 5.21. Tapa con orificios para colocación de elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de electroconformado.

5.3.4. Recirculación y filtrado del baño

Para que el depósito inferior funcione como baño de renovación, resulta imprescindible la incorporación de una bomba que asegure el trasvase del baño hacia el depósito superior. Inicialmente, se utilizó la misma bomba implementada en investigaciones previas (véase Figura 5.7). La elección de este equipo se fundamentó en que disponía de la potencia suficiente para trasladar el baño entre depósitos. Durante los ensayos, la bomba se operó a un nivel de potencia del 40%, lo que permitió disponer de un amplio margen para el ajuste de las condiciones experimentales.

Esta decisión implicó que se tuvieran que diseñar y fabricar varios elementos para contener y aislar la bomba, que parcialmente tenía que estar inmersa en el tanque de almacenamiento (Figuras 5.22 y 5.23). Se hicieron varias versiones que permitieron solucionar diferentes problemas que surgieron tras su implementación en diferentes pruebas de electroconformado. Esta bomba que había mostrado buenos resultados hasta ese momento empezó a dar problemas de fiabilidad que se repitieron en varias unidades diferentes de las que se disponían. Por este motivo, y tras varios meses de trabajo y múltiples pruebas, se vio necesario buscar otro tipo de bomba que aportara más robustez de funcionamiento al equipo.



a) b) c)

Figura 5.22. Diseño salida bomba 4: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.



a) b) c)

Figura 5.23. Uso de tubería de PCV espumado para protector de bomba: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

Tras analizar varias soluciones alternativas se tomó la decisión de sustituir la bomba original por una bomba de tipo peristáltica (Figura 5.24). Estos dispositivos hidráulicos están diseñados para el transporte de fluidos mediante la compresión secuencial de un tubo flexible dispuesto en forma de "C" en el interior de la carcasa. Mediante la acción de rodillos o zapatas, se ejerce presión sobre el tubo, desplazando el fluido sin necesidad de válvulas u otros elementos de cierre, lo cual evita fugas y garantiza que el fluido no entre en contacto con las partes móviles de la bomba.

Las bombas peristálticas presentan ventajas significativas: requieren un mantenimiento mínimo, resultan económicas en comparación con otros sistemas de bombeo y son especialmente adecuadas para el transporte del baño de cobre en este estudio. Su configuración de manguera, que distingue claramente una sección de entrada y otra de salida, permite un acople directo con la manguera conectada al filtro, eliminando la necesidad de rediseñar componentes adicionales para la conexión.



Figura 5.24. Bomba peristáltica empleada para bombear el baño electrolítico. Obtenido de [9].

Con esta solución, además, se consigue que el baño electrolítico solo esté en contacto con las conducciones que lo transportan evitando su posible contaminación. También se logra un ensamblaje del sistema de renovación y circulación mucho más sencillo, que facilita enormemente su limpieza y mantenimiento, así como la preparación inicial del equipo para su operación. Tras los primeros ensayos tras su adquisición, se pudo comprobar que también se disponía de margen suficiente para analizar la intensidad de la recirculación del baño durante el proceso.

5.3.4.1. Filtro

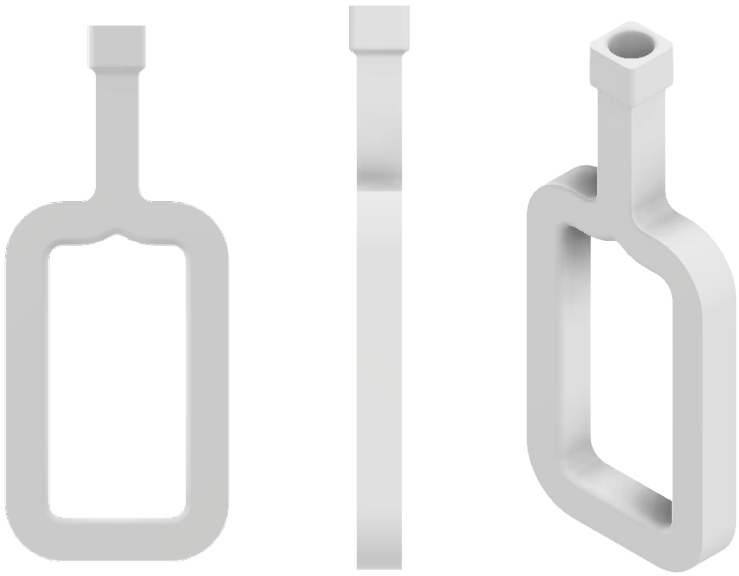
También se consideró necesario integrar un elemento para la filtración del baño antes de su introducción en el tanque de procesado. Durante el uso de los baños electrolíticos y debido al agotamiento de sus aditivos y a la cristalización de sus sales, se generan subproductos de las reacciones electroquímicas que interesa evitar que estén presentes durante el electroconformado. Tras valorar varias opciones se optó por emplear un filtro bobinado de polipropileno, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y químicas, que permiten retener eficazmente impurezas, residuos de cobre y otros elementos externos que pudieran aparecer o incorporarse al baño durante el proceso de deposición. Todo ello permite lograr unas condiciones operativas más estables que se ha reflejado en los resultados obtenidos. En la Figura 5.25 se presenta una imagen representativa del filtro bobinado de polipropileno utilizado en el sistema.



Figura 5.25. Filtro bobinado de polipropileno.

5.3.4.2. Elemento de agitación

En el sistema de renovación y recirculación, es esencial que el baño electrolítico filtrado se introduzca de manera controlada en el tanque de procesado en la zona que más interesa para conseguir la necesaria agitación del mismo. Con este objetivo, se diseñó un componente que, mediante pequeños orificios, permite una salida gradual y homogénea del fluido junto a la pieza modelo y justo en frente a la superficie texturizada (véase Figura 5.26).



a) b) c)

Figura 5.26. Elemento de recirculación del baño 5: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

En esta investigación se optó por rediseñar la disposición de las salidas del baño, ubicándolas en la parte interior del elemento de agitación, tres en los laterales y una en la parte inferior. Esta configuración favorece la convergencia del flujo hacia el centro del tanque, promoviendo el movimiento de los iones sin generar un impacto directo excesivo sobre la superficie de la pieza modelo, lo cual podría comprometer la uniformidad del depósito de cobre.

Asimismo, tal como se muestra en la Figura 5.28, el nuevo diseño permite el acoplamiento directo de la manguera en la parte superior del tanque, lo que mejora la accesibilidad visual al interior del sistema y deja espacio libre para la integración de un sistema de monitoreo mediante cámara.

En síntesis, la evolución en el diseño del sistema de renovación y recirculación ha contribuido a mejorar el comportamiento del flujo del electrolito y buscando una distribución más uniforme del fluido, factores que inciden positivamente en la calidad, estabilidad y repetibilidad del proceso de electroconformado.

5.3.5. Sistema de sujeción del cátodo

Durante las fases experimentales iniciales ya se ha comentado que se identificaron problemas críticos en la conexión entre el cátodo y su sistema de sujeción. La debilidad en el punto de conexión, agravada por el continuo efecto del baño electrolítico, provocaba el desprendimiento arbitrario de la capa metálica de la pieza modelo al inicio del proceso, resultando en la pérdida de continuidad eléctrica y, consecuentemente, en la interrupción del proceso de deposición de cobre (véase Figura 5.27).

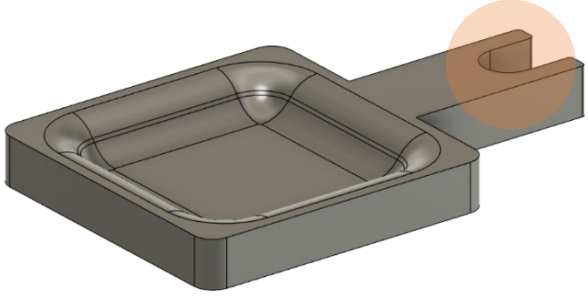


Figura 5.27. Diseño de la pieza modelo de partida.

Una de las primeras soluciones implementadas fue la incorporación de un hilo de cobre sobre el mango de sujeción del modelo, que no aportó mejoras sustanciales a este problema (véase Figura 5.28).

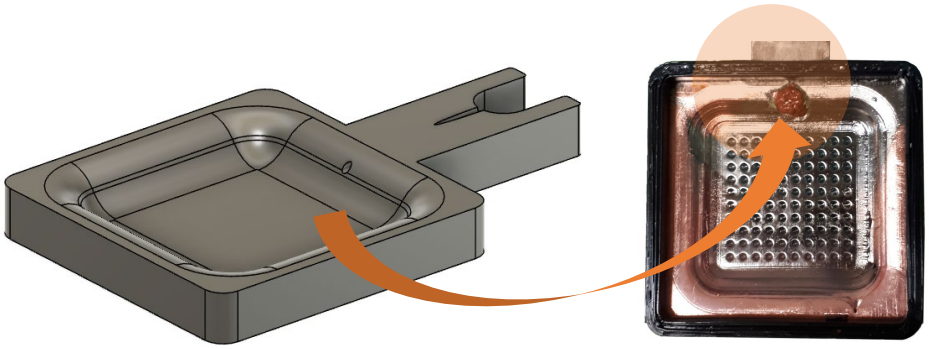


Figura 5.28. Defecto de falta de continuidad en la pieza modelo.

No obstante, esta solución presentó una complicación adicional. En determinados ensayos se observó que la alta conductividad del hilo de cobre favorecía la acumulación excesiva de material depositado en esa zona, lo que restaba depósito de metal del área funcional de la pieza modelo. Esta situación motivó la realización de un rediseño integral del modelo, que incluyó la modificación del elemento de sujeción y la ampliación del área de contacto para mejorar la transmisión de la corriente eléctrica. Como se ilustra en la Figura 5.29, el nuevo diseño incorpora un elemento continuo sin la ranura central, lo que aumenta la superficie de contacto con el elemento que suministra la conductividad eléctrica.

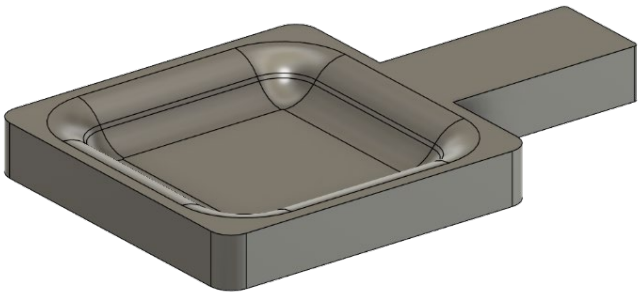


Figura 5.29. Diseño final de la pieza modelo.

Para adaptar el nuevo modelo, se realizaron modificaciones en el sistema de sujeción del cátodo. Con el fin de incrementar la estabilidad del soporte, y tras varias evoluciones que fueron ensayadas, se realizó un último rediseño que incorporó un área rectangular continua de aislamiento a lo largo de todas las superficies del elemento de sujeción de la pieza modelo (véase Figura 5.30). Adicionalmente, se dejó un espacio entre la pieza modelo y la pared del soporte para alojar una lámina de cobre que contacta frontalmente con la superficie metalizada del elemento de sujeción, y se ejecutó un orificio en la zona superior de esa lámina destinado a la conexión del cable de alimentación.

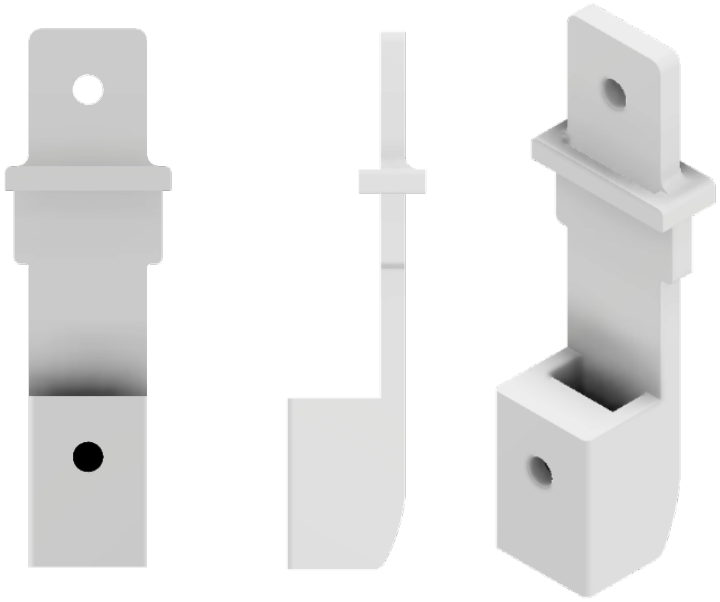


Figura 5.30. Elemento para la sujeción del cátodo 4: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

El conjunto final, que integra el cable conector, se muestra en la Figura 5.31. La lámina de cobre presenta un texturizado en forma de semiesferas, lo que favorece un contacto más efectivo entre el modelo y el componente, optimizando así la conductividad y garantizando una deposición uniforme.

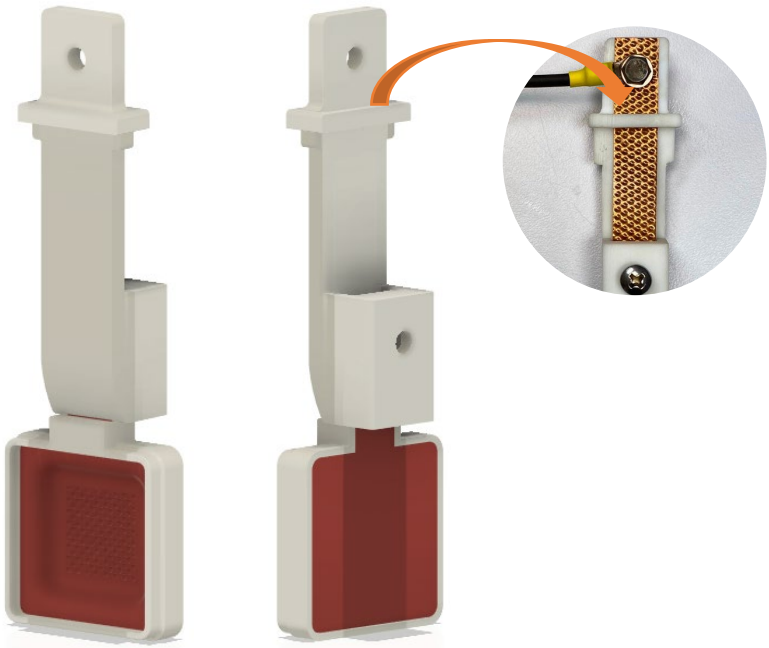


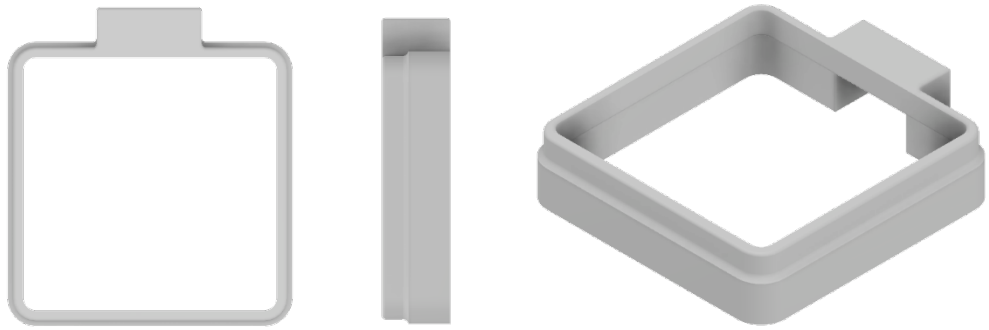
Figura 5.31. Elemento final para la sujeción del cátodo, con detalle de la plancha de cobre para realizar el contacto eléctrico.

5.3.5.1. Protección del cátodo

En concordancia con lo observado en investigaciones previas, el proceso de metalización de la pieza modelo no se limita a recubrir únicamente la zona superior y funcional, sino que también se

intensifica en los bordes. Este fenómeno induce que, durante la etapa de electroconformado, parte del campo eléctrico es atraído hacia los laterales provocando una reducción en el espesor medio del área funcional texturizada en la cáscara final.

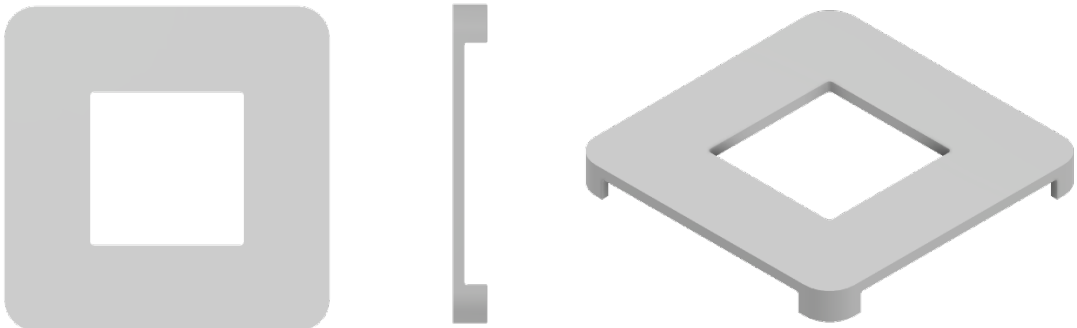
Para mitigar este efecto, se han implementado modificaciones en la pieza desarrollada en estudios anteriores. En concreto, se ha incorporado un protector diseñado para impedir el recubrimiento indeseado en las áreas laterales y en la zona del mango (véase Figura 5.32).



a) b) c)

Figura 5.32. Protección del cátodo. Protector para evitar recubrimiento en laterales y zona del mango: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

Paralelamente, se ha integrado una pantalla cuyo objetivo es concentrar las líneas de corriente en el baño electrolítico hacia la región funcional de mayor relevancia. Esta solución permite dirigir el flujo iónico y, en consecuencia, aumentando el espesor medio depositado en esa zona (véase Figura 5.33).

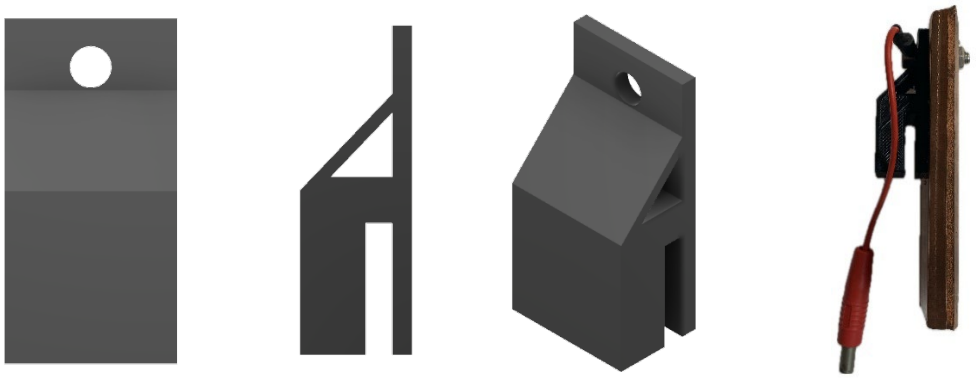


a) b) c)

Figura 5.33. Protección del cátodo. Pantalla para direccionar las líneas de flujo del electrolito: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva.

5.3.6. Sujeción del ánodo

Si bien la configuración geométrica del ánodo se mantuvo inalterada por haberse considerado previamente como la solución más adecuada, las limitaciones impuestas por el espesor del nuevo tanque han requerido un rediseño parcial de su sistema de sujeción. En este sentido, se ha procedido a la disminución del hueco para su acoplamiento, garantizando así una integración adecuada sujeción estable del ánodo con el tanque de electroconformado. La Figura 5.34 ilustra el nuevo diseño.



a) b) c) d)

Figura 5.34. Sujeción del cátodo con rediseño para mejora de la sujeción: a) alzado; b) perfil; c) perspectiva; d) elemento de sujeción anclado al ánodo.

5.3.7. Sistema de retroiluminación

El nuevo diseño del equipo de electroconformado incorpora un sistema de retroiluminación integrado en la placa divisoria del sistema de doble depósito. Consiste en la inserción de una tira LED, la cual no solo ilumina la parte posterior de la pieza, sino que también ofrece una iluminación homogénea desde la parte inferior del tanque.

Esta mejora resulta especialmente relevante ante las limitaciones de configuraciones previas, en las que la iluminación directa sobre la parte posterior del cátodo incidía sobre la lente de la cámara, dificultando la captura de imágenes de alta calidad.

5.3.8. Equipo definitivo

En la Figura 5.35 se presenta un diagrama que ilustra de forma esquemática el procedimiento para el montaje del nuevo equipo, mientras que la Figura 5.36 expone de manera resumida la integración de los diversos componentes desarrollados vistos previamente.

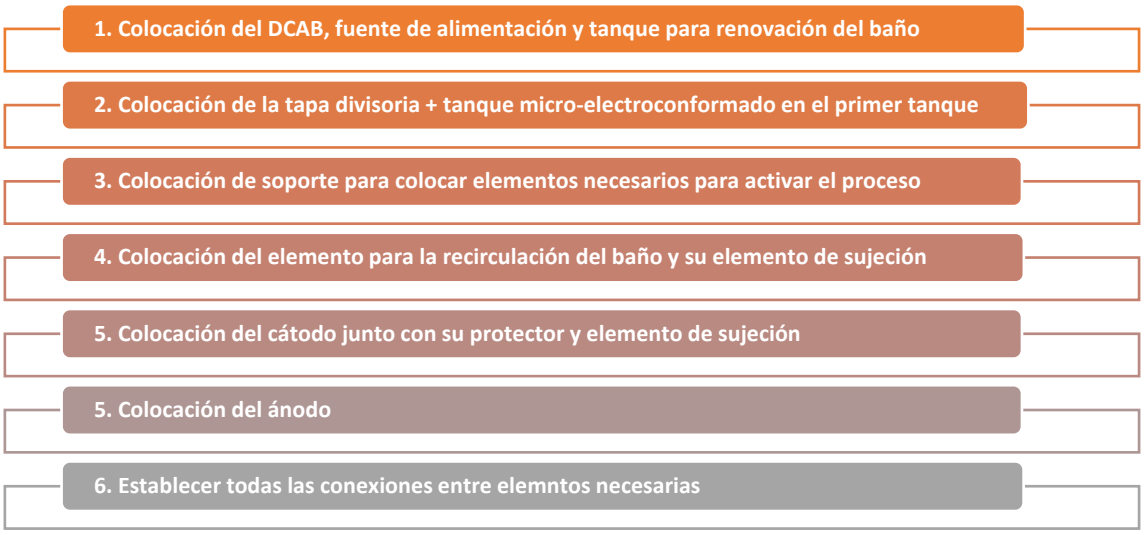


Figura 5.35. Esquema de los pasos a seguir para incorporar lo elementos nuevos al equipo rediseñado.

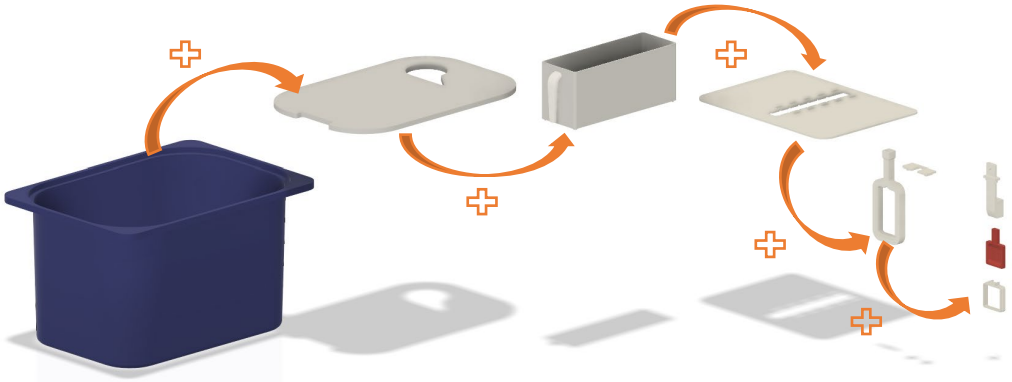


Figura 5.36. Montaje de nuevos elementos del equipo rediseñado.

Así mismo, la siguiente Figura 5.37 muestra el equipo final de electroconformado desarrollado.

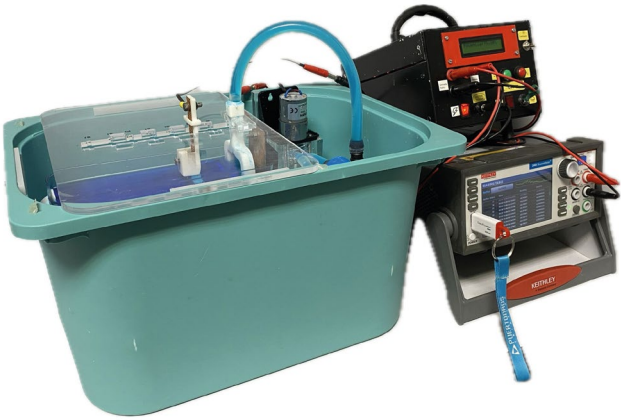


Figura 5.37. Equipo de electroconformado desarrollado.

5.4. Programa de deposición

Además del rediseño físico del equipo de electroconformado, se ha procedido a mejorar el proceso de deposición mediante modificaciones en el programa de control. Dichas mejoras tienen como objetivos fundamentales alcanzar una deposición homogénea, obtener un espesor adecuado del recubrimiento y reducir el tiempo global del proceso. En este objetivo ha sido fundamental la información registrada por la fuente de alimentación.

El proceso de electroconformado culmina con la descarga de los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas con el instrumento KEITHLEY 2460 SourceMeter®. Tanto mediante un procedimiento manual como programado, los valores registrados se almacenan en los buffers internos del equipo, generándose un archivo que agrupa todas las mediciones para su posterior análisis.

Para la utilización del sistema de descarga, es preciso definir previamente los buffers de almacenamiento requeridos. La configuración de cada buffer implica la asignación de un nombre, la determinación de su capacidad y la especificación de su tipología. Cabe destacar que el número de buffers está limitado únicamente por la memoria disponible en el instrumento. En este sentido, se puede alcanzar una capacidad máxima acumulada de 6.875.000 lecturas en modo estándar y de 27.500.000 lecturas en modo comprimido. La principal diferencia entre ambos modos radica en que el modo estándar almacena las mediciones con la resolución máxima del dispositivo, mientras que el modo comprimido utiliza una resolución reducida [7].

Es importante señalar que, tanto la ejecución de la instrucción *reset()* como el apagado del equipo provocan la pérdida de los datos almacenados en los buffers. Asimismo, en aquellos buffers configurados para almacenamiento continuo, una vez superada su capacidad máxima, las mediciones subsecuentes sobrescriben los datos previamente almacenados.

5.4.1. Programa de deposición de partida

En el marco de los experimentos desarrollados en la tesis predecesora, se estableció un programa de deposición inicial que ordena la creación de cuatro buffers denominados buffer1, buffer2, buffer3 y buffer4. A cada uno de estos se le asignan sistemáticamente las magnitudes de intensidad y voltaje de consigna para su regulación, junto con los tiempos de deposición correspondientes, tal como se ilustra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Programa de deposición de partida.

Programa deposición original		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	30 min
Buffer 2	5V	30 min
Buffer 3	10V	30 min
Buffer 4	900 mA	2 horas y 30 min

5.4.2. Programa de deposición implementado

Durante el desarrollo de la presente tesis se introdujeron modificaciones orientadas a lograr una deposición más homogénea, obtener el espesor adecuado y reducir de forma significativa el tiempo requerido para la generación de las electroformas. Cabe recordar que, en el procedimiento anterior, la obtención de una única electroforma demandaba casi 24 horas, implicando un periodo de dos días para cada ensayo, entre la preparación del equipo, colocación de la pieza modelo y la obtención de la electroforma.

Uno de los primeros cambios que se quiso realizar era la implementación de buffers en los que únicamente se controlaban mediante los valores de intensidad máxima permitida en cada uno. Además, para mejorar la homogeneidad de la deposición en las etapas iniciales, especialmente en piezas con texturas en relieve, donde resulta más complicado acceder y depositar el cobre de forma uniforme, se decidió que estas debían tener un tiempo prolongado de deposición similar a las etapas finales. Tras numerosas versiones, se empleó finalmente un programa con cinco etapas, cada una de ellas con un tiempo de duración de una hora y aplicando un aumento de la intensidad de corriente de manera controlada y progresiva, evitando así cambios bruscos que puedan provocar defectos en el relleno de las cáscaras. El programa final se ilustra la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Programa de deposición 4.

Programa deposición 4		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	1 hora
Buffer 2	250 mA	1 hora
Buffer 3	500 mA	1 hora
Buffer 4	750 mA	1 hora
Buffer 5	1000 mA	1 hora

Para poder llegar a este resultado, se llevaron a cabo diversos cambios en función de los resultados obtenidos en cada etapa experimental, permitiendo optimizar progresivamente la estabilidad y eficiencia del proceso de deposición. Este enfoque iterativo ha sido fundamental para alcanzar una

mayor calidad en las electroformas generadas y para cumplir con los objetivos establecidos en la presente tesis.

Además, cabe destacar que este programa es adaptable según el espesor de cáscara que se desee obtener. En términos de cantidad de depósito, las dos primeras etapas, que aseguran una cobertura uniforme, representan solo el 9 % del cobre total depositado. En cambio, en la última etapa, este porcentaje se eleva al 40 %. Por tanto, si se requiere una cáscara de mayor peso, basta con aumentar el tiempo de deposición correspondiente a la última etapa.

5.5. Efecto de diferentes parámetros sobre el crecimiento de las electroformas

El proceso de electroconformado presenta desafíos significativos en términos de conseguir depósitos metálicos con espesor uniforme, especialmente cuando las cáscaras resultantes se utilizan como herramientas en procesos de fabricación, como la electroerosión por penetración. La eficiencia del proceso de deposición depende críticamente de parámetros operativos como la distancia entre ánodo y cátodo, la dinámica de recirculación del baño y la intensidad de la corriente aplicada. La investigación de los efectos de estos parámetros operativos, se presenta como un tema de gran relevancia [10].

Los artículos publicados relacionados específicamente con esta investigación son escasos y, generalmente, se enfocan en procesos de recubrimiento por galvanoplastia con espesores mucho menores que en el electroconformado, lo cual implica que no hay tiempo suficiente para la formación de nódulos de tamaño considerable en los bordes, reduciendo así el impacto de este factor [10].

Las referencias consultadas pueden dividirse en dos grupos: aquellos que se apoyan en simulaciones numéricas y aquellos que emplean métodos experimentales. Dentro del primer grupo, generalmente se recurre a soluciones basadas en el método de los elementos finitos (FEM). Este es el caso del trabajo realizado por Oh et al. [11], en el que se realizan simulaciones numéricas a partir del modelo basado en la ecuación de Laplace en la electrodeposición de cobre, y se estudia el efecto de factores como la agitación del electrolito, la presencia de un cátodo auxiliar, el tamaño del ánodo y la distancia entre ánodo y cátodo sobre la uniformidad del espesor. Masuku et al. [12], también en la electrodeposición de cobre, realizan ensayos de validación de las distribuciones de espesor obtenidas mediante simulaciones numéricas y evalúan el efecto de la separación ánodo-cátodo entre 60 y 100 mm. Los espesores obtenidos están en el rango de 10-40 μm. En ambos casos, los modelos no consideran la influencia del crecimiento nodular en los bordes.

Entre los estudios basados en desarrollos experimentales, Tan y Lim [13] establecen que una adecuada selección de parámetros como la agitación del baño, la separación cátodo-ánodo, así como una elevada temperatura y concentración del electrolito, contribuyen a alcanzar una distribución de corriente uniforme. Por otra parte, Yang y Kang [14] aplican el método de cátodo secundario con un diseño específico para mejorar la uniformidad del espesor de un molde de níquel electroconformado para un microenfriador.

El objetivo de este estudio de la influencia de los diferentes factores presentes en el proceso de electroconformado que podemos modificar en el equipo de laboratorio que se ha desarrollado, como son la separación entre ánodo y cátodo, y el nivel de renovación del baño conseguido variando el caudal de la bomba de recirculación. Se busca encontrar las condiciones más adecuadas para este equipo y esta aplicación.

Para ello es necesario tener en cuenta el diseño de experimentos (DOE). El DOE es una herramienta fundamental en la investigación y desarrollo de procesos industriales. Su objetivo principal es identificar y optimizar los factores clave que afectan el rendimiento de un sistema, al tiempo que minimiza la variabilidad y mejora la calidad de los productos finales. Este enfoque permite establecer relaciones entre múltiples variables, lo que es crucial en entornos de fabricación y otras áreas de ingeniería donde la precisión y robustez de los procesos son esenciales [15].

Uno de los métodos más destacados en el DOE es el Método Taguchi, que proporciona un enfoque sistemático para mejorar los procesos mediante el uso de tablas ortogonales que permiten la reducción del número de experimentos necesarios. La eficiencia del Método Taguchi se debe a su capacidad para aislar y medir la influencia de múltiples factores sin necesidad de un diseño factorial completo, lo que reduce significativamente el tiempo y costo en experimentación [16].

Es por ello que a continuación se aplicará este método con el fin de emplear el menor número de ensayos posibles, para de esta forma reducir el tiempo, los materiales empleados y la energía requerida en los diferentes ensayos, tratando de esta forma, de seguir un enfoque lo más sostenible posible a lo largo de la investigación.

5.5.1. Distancia ánodo-cátodo

La distancia entre ánodo y cátodo en el proceso de electroforming constituye un parámetro determinante en la calidad y en las propiedades finales de los depósitos metálicos. Este factor no solo afecta al grosor y a la uniformidad del recubrimiento, sino que también tiene repercusiones en aspectos críticos como el consumo energético, la duración del proceso y la eficiencia global del mismo [18–20]. Estudios previos destacan que, en condiciones específicas, una menor distancia puede resultar en recubrimientos más gruesos y pesados, aunque también tiende a incrementar el consumo energético y reducir la homogeneidad de la superficie. Así, encontrar una distancia óptima permite equilibrar la eficiencia energética con la calidad del recubrimiento, optimizando el proceso en función de las características del material y la configuración del sistema [21].

Varios estudios han analizado la relación entre la distancia ánodo-cátodo y la distribución del espesor en depósitos de níquel y cobre. Por ejemplo, investigaciones de Yang y Kang [14] (usando soluciones de sulfamato) y Tan y Lim [13], arrojan resultados mixtos sobre los beneficios de aumentar la distancia; mientras que Yang y Kang no encontraron mejoras significativas en la uniformidad al aumentar la separación, Tan y Lim observaron un incremento en la homogeneidad del espesor al expandir la distancia entre los electrodos. En el mismo ámbito, Heydari et al. encontraron que una distancia mayor tiende a reducir el grosor del recubrimiento y a mejorar la uniformidad hasta cierto límite, después del cual el beneficio en uniformidad disminuye debido al incremento en el tiempo y costo energético requerido

Investigaciones recientes también han avanzado en la optimización de la distancia en aplicaciones específicas de electroforming. Hernández et al. demostraron que una separación de 20 mm entre ánodo y cátodo en depósitos de níquel proporciona una distribución de espesor uniforme, mientras que distancias menores producen irregularidades [22]. Memannavaz et al. observaron que en estructuras cónicas rotativas de cobre, una distancia intermedia de 10 mm resulta ideal para obtener un recubrimiento uniforme, sugiriendo que el tipo y la geometría de la pieza afectan significativamente la distancia óptima requerida [23]. Estudios adicionales, como el de Biswal et al. destacan que en procesos avanzados de electroforming, distancias demasiado pequeñas pueden llevar a defectos en la microestructura, como rugosidades o bordes inconsistentes, que se reducen al seleccionar una separación intermedia [24].

En aplicaciones a gran escala, Andreou y Roy demostraron que una distancia de 40 mm es eficaz para lograr un equilibrio entre eficiencia y calidad, evitando irregularidades en el recubrimiento de grandes superficies [25].

Por otra parte, mediante simulaciones numéricas, Oh et al. [11], observaron que una adecuada distancia ánodo-cátodo mejora la homogeneidad del depósito, especialmente cuando la relación de tamaño ánodo/cátodo disminuye. Este hallazgo sugiere que la distancia óptima debe ajustarse considerando la geometría específica del sistema para maximizar la uniformidad del recubrimiento.

Por su parte, Heydari et al. cuantificaron el impacto del espaciado ánodo-cátodo en la eficiencia energética y en la calidad del depósito. Encontraron que, si bien aumentar la distancia entre electrodos reduce el grosor de la capa, mejora la uniformidad hasta cierto límite (por ejemplo, una

uniformidad de 70% a 10 cm de distancia en comparación con 60% a 2 cm) como se ilustra en la Figura 5.38. Sin embargo, a partir de distancias superiores (aproximadamente 20 cm), la eficiencia energética disminuye, incrementando el tiempo y el costo del recubrimiento. Esto subraya la necesidad de encontrar un valor óptimo de espaciado para balancear calidad, eficiencia y economía en cada proceso específico [18].

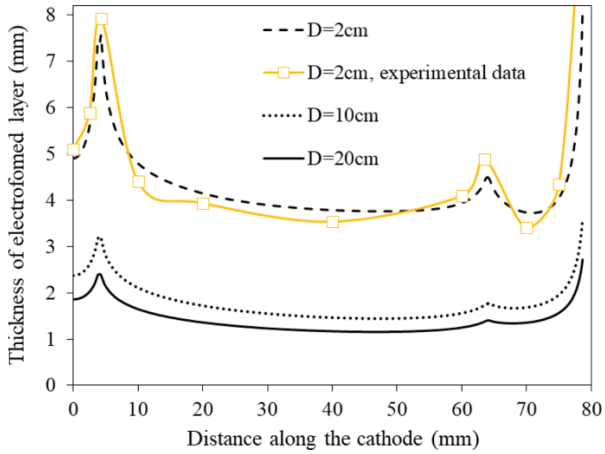
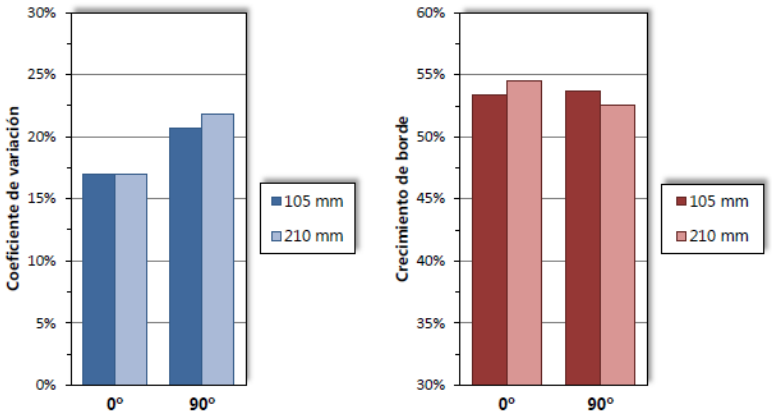


Figura 5.38. Espesor de la capa electroformada en función de la distancia a lo largo del cátodo para diferentes distancias ánodo-cátodo. Obtenido de [18].

Permadi et al. [19], también contribuyeron con sus investigaciones al encontrar que una distancia de 5 cm resulta óptima en galvanoplastia para obtener recubrimientos con alta resistencia adhesiva y uniformidad. Adicionalmente, Ortega examinó la interacción entre distancia y orientación de los electrodos, sugiriendo que una orientación adecuada, combinada con una menor distancia ánodo-cátodo, mejora ligeramente la uniformidad en el área central del depósito, tal y como se ilustra en la Figura 5.39 [10].



a) b)

Figura 5.39. Efecto de la distancia ánodo-cátodo y orientación. a) coeficiente de variación; b) crecimiento de borde. Obtenido de [10].

Estos estudios consolidan la importancia de optimizar la separación ánodo-cátodo en el electroforming, dado que influye directamente en la uniformidad y en el rendimiento del proceso de recubrimiento. Las recomendaciones en cuanto a la distancia ideal varían en función del material y del diseño del sistema, oscilando, por ejemplo, desde 50 mm en procesos de galvanoplastia de alta adhesión, hasta distancias mayores en aplicaciones de gran escala. Esto resalta la necesidad de una personalización del proceso basada en los requerimientos específicos de cada aplicación. En este

apartado se realiza un análisis orientado a determinar la distancia óptima para el equipo de electroconformado desarrollado, en la aplicación concreta de microtexturización de superficies.

5.5.1.1. Estudio distancia ánodo-cátodo con equipo rediseñado

En los primeros ensayos realizados con el equipo rediseñado se observó que las variaciones continuas entre voltaje e intensidad, propias del programa de deposición anterior, dificultaban el análisis cuantitativo de los datos registrados en los sistemas de adquisición (buffers), debido a que operaban en rangos de medición distintos. Esta disparidad complicaba la comparación entre las distintas etapas del proceso y limitaba la interpretabilidad de los resultados. Por este motivo, en esta nueva fase experimental se optó por trabajar exclusivamente con valores de intensidad de corriente constantes.

Para el diseño del nuevo programa de deposición se tomaron como referencia los estudios preliminares sobre la influencia de la distancia ánodo–cátodo realizados con el equipo original. Se determinó que iniciar el proceso con una etapa de 30 minutos a 100 mA permitía alcanzar una capa de cobre suficiente en toda la superficie del cátodo. Esta cobertura inicial favorecía que las etapas posteriores, aplicadas con incrementos progresivos de intensidad, completaran la deposición en las zonas más críticas de la pieza modelo, especialmente en presencia de texturas con bajo relieves.

Con base en esta estrategia, se estableció un programa de deposición con una secuencia de intensidades crecientes, siguiendo un patrón de incremento escalonado de 250 mA hasta alcanzar un máximo de 750 mA. La última fase, diseñada con una duración prolongada, permitió consolidar la capa de cobre sobre una base previamente homogénea. El nuevo programa, detallado en la Tabla 5.8, redujo significativamente el tiempo total de procesamiento, pasando de 24 horas en el programa original a solo 4 horas en esta nueva configuración.

Tabla 5.8. Programa de deposición modificado para realizar ensayos con el nuevo equipo.

Programa deposición 2 (PD2)		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	30 min
Buffer 2	250 mA	30 min
Buffer 3	500 mA	30 min
Buffer 4	750 mA	2 horas y 30 min

Para estudiar la influencia de la distancia entre electrodos en la etapa de crecimiento activo, se llevaron a cabo ensayos empleando piezas modelo con textura de semiesferas bajo relieve, debido a la complejidad añadida que implica el llenado completo de sus cavidades. En todos los casos se aplicaron las dos primeras etapas del programa (Buffers 1 y 2) a una misma distancia de 60 mm y posteriormente se ejecutó la tercera etapa (Buffer 3, 500 mA) situando el cátodo en tres posiciones diferentes dentro del tanque: posición 6, posición 12 y posición 18.

Estas posiciones fueron definidas en función del nuevo soporte de sujeción modular incorporado al sistema, que permitía ajustar con precisión tanto la ubicación del cátodo como la del colector de recirculación. El soporte dividía el eje longitudinal del tanque en siete posiciones separadas por intervalos regulares de 20 mm. Para este estudio se seleccionaron tres posiciones representativas: una próxima (posición 6, 60 mm), una intermedia (posición 12, 120 mm) y una alejada (posición 18, 180 mm). La Tabla 5.9 resume la correspondencia entre las etapas aplicadas y las posiciones evaluadas. Las dos primeras fases, comunes a todas las muestras, se indican en verde; las posiciones experimentales correspondientes al Buffer 3 se destacan en naranja.

Tabla 5.9. Posiciones ensayadas durante los primeros estudios de distancia con el equipo nuevo.

Etapas	Posiciones (mm)						
	60	80	100	120	140	160	180
Buffer 1	X						
Buffer 2	X						
Buffer 3	X			X			X
Buffer 4							

Durante toda la fase experimental se llevó a cabo un seguimiento sistemático de la cantidad de cobre depositado, empleando para ello la técnica de pesaje diferencial. Con el fin de mejorar la precisión de las mediciones, se registró individualmente el peso del soporte del cátodo, de la pieza modelo y del conjunto completo antes del inicio de cada ensayo. Una vez finalizado el proceso, se determinó el incremento de masa atribuible exclusivamente al cobre depositado, mediante la diferencia entre el peso final y la suma de los componentes iniciales. Este método permitió obtener datos fiables y comparables sobre la eficiencia del proceso en función de la posición del cátodo dentro del sistema.

La metodología seguida para la ejecución de este estudio fue la siguiente:

1. Determinación del peso del soporte de la pieza modelo.
2. Determinación del peso del conjunto formado por el soporte y la pieza modelo (cátodo).
3. Ejecución de las dos primeras etapas del proceso de electroconformado a una distancia de 60 mm.
4. Extracción del cátodo y registro del peso tras la primera fase del proceso.
5. Introducción del cátodo en el baño y ejecución del programa de 500 mA durante 30 minutos en la primera posición experimental.
6. Extracción del cátodo y pesaje tras la deposición en la primera posición.
7. Reintroducción del cátodo en el baño y ejecución del programa de 500 mA durante 30 minutos en la segunda posición experimental.
8. Extracción del cátodo y pesaje tras la deposición en la segunda posición.
9. Reintroducción del cátodo en el baño y ejecución del programa de 500 mA durante 30 minutos en la tercera posición experimental.
10. Extracción del cátodo y pesaje tras la deposición en la tercera posición.
11. Análisis comparativo de los pesos obtenidos en las diferentes posiciones experimentales para evaluar la influencia de la distancia ánodo-cátodo en la deposición de cobre.

En la Tabla 5.10 se recoge el incremento de peso registrado en las distintas etapas del experimento. Si bien se llevaron a cabo numerosos ensayos, únicamente se consideraron los cinco que se desarrollaron correctamente, excluyéndose aquellos en los que se produjeron fallos técnicos que comprometieron la integridad del proceso.

Tabla 5.10. Ensayo distancia con equipo nuevo en 3 distancias.

Ensayo	Peso inicial	I_1º y 2º Fase	I_D60	I_D120	I_D180	Peso cáscara
1	37.704	0.454	0.283	0.241	0.126	1.103
2	42.301	0.479	0.308	0.271	0.292	1.350
3	43.321	0.235	0.393	0.229	0.370	1.227
4	9.884	0.145	0.382	0.235	0.242	1.013
5	8.2532	0.135	0.573	0.206	0.196	1.004

Los resultados reflejan una mejora notable en la homogeneidad de las muestras obtenidas en las diferentes posiciones evaluadas, respecto a los primeros estudios llevados a cabo con el equipo de partida. En particular, se observa una tendencia consistente a una mayor deposición de cobre en la posición más cercana al ánodo (60 mm), mientras que los resultados en la posición intermedia (120 mm) y en la más alejada (180 mm) presentan una variabilidad que impide extraer conclusiones

definitivas sobre cuál de ambas favorece una mayor deposición. Esta tendencia se representa gráficamente en la Figura 5.40.

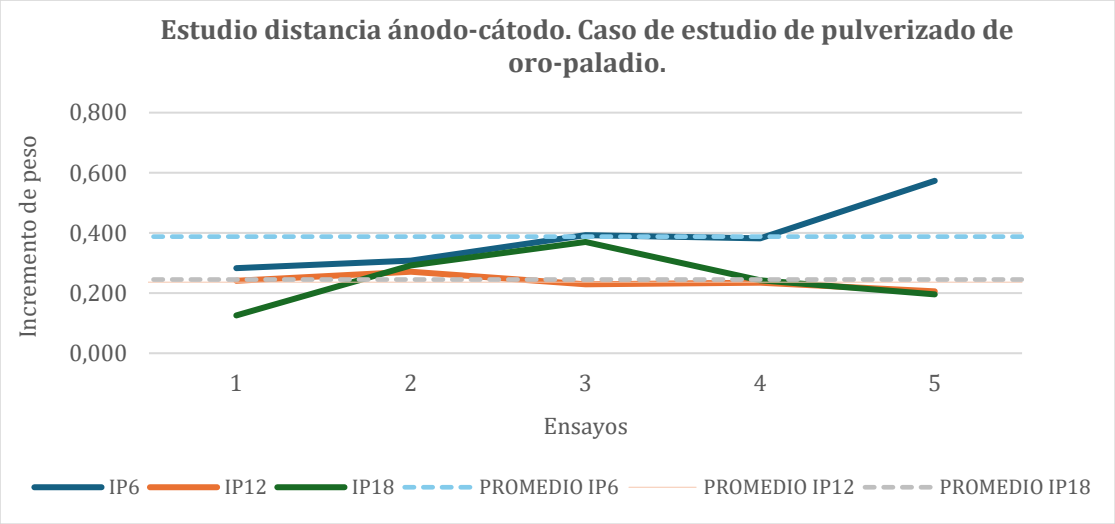


Figura 5.40. Gráfica de los valores obtenidos en el estudio distancia ánodo-cátodo con nuevo equipo.

La gráfica correspondiente confirma que la mayor cantidad de cobre depositado se concentra en la posición más próxima al ánodo. Sin embargo, es importante señalar que durante el desarrollo de los ensayos se presentaron varios inconvenientes técnicos, entre los que destaca la pérdida de conductividad eléctrica en algunas piezas modelo, lo cual impidió completar ciertos experimentos y afectó a la uniformidad de los resultados.

Esta falta de consistencia motivó una revisión exhaustiva de los factores que podrían estar condicionando la eficiencia del proceso. Aunque el rediseño del equipo permitió mejorar significativamente la conectividad del sistema, el análisis detallado de las piezas modelo reveló que la capa de metalizado inicial, obtenida por sputtering, podría estar actuando como un factor limitante. Durante la inspección visual de las muestras (Figura 5.41), se detectaron manchas, zonas sin recubrimiento y discontinuidades en la capa metálica, lo cual indicaba una falta de uniformidad crítica para la posterior fase de electroconformado.

Estas observaciones fueron corroboradas mediante mediciones de resistencia eléctrica utilizando un polímetro, que evidenciaron variaciones significativas en la conductividad superficial de las piezas modelo. Ante esta situación, se procedió a explorar alternativas de metalización más fiables en el ámbito local, a fin de garantizar una base conductora uniforme que permitiera la repetibilidad y calidad del proceso.



a) b)

Figura 5.41. Metalizado no homogéneo de las piezas modelo: a) pieza modelo con geometría bajo relieve; b) pieza modelo con geometría sobre relieve.

Como solución, se colaboró con el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de la Laguna, donde se llevó a cabo la metalización de las piezas modelo utilizando dos materiales: carbono y oro. Se realizaron cuatro metalizaciones preliminares con una capa de 120 segundos de deposición.

El objetivo principal de esta fase experimental fue evaluar si una única capa de metalizado era suficiente para garantizar una conductividad adecuada en la superficie funcional de las piezas modelo, así como analizar posibles diferencias en el comportamiento de distintas geometrías texturizadas durante el proceso de electroconformado.

Adicionalmente, se realizaron ensayos complementarios en el Jardín Botánico Viera y Clavijo, empleando un equipo de sputtering con características similares al utilizado en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. La única diferencia entre ambos radicaba en el material objetivo (target): en este caso se utilizó oro puro. En dicho ensayo, se metalizaron dos muestras con textura de semiesferas en bajo relieve, a las que se aplicó una doble capa de oro (240 segundos) con el fin de comparar sus propiedades conductoras y de deposición respecto a las muestras metalizadas previamente.

Con estas nuevas piezas, se ejecutó un programa de deposición modificado, ajustado a las mejoras esperadas en la conectividad, y orientado a cubrir todas las etapas del proceso sin incidencias. El nuevo protocolo, denominado Programa de Deposición 3 (PD3), se detalla en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Programa de deposición 3.

Programa deposición 3 (PD3)		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	30 min
Buffer 2	250 mA	30 min
Buffer 3	500 mA	1 hora
Buffer 4	750 mA	1 hora
Buffer 5	1000 mA	1 hora

Contrario a las expectativas, ninguna de las muestras metalizadas con carbono logró mantener la conectividad eléctrica más allá de la segunda etapa del programa, lo que impidió la continuidad del proceso. En cambio, las muestras recubiertas con oro mostraron un comportamiento muy satisfactorio, evidenciando una conductividad eléctrica significativamente superior, incluso en comparación con aquellas metalizadas mediante aleación de oro-paladio en las instalaciones de la ULPGC. Los resultados obtenidos en las cuatro muestras metalizadas con oro se resumen en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Peso de los electrodos según sus capas de metalizado y material.

Material	Distancia (mm)	Diseño de textura	Tiempo de deposición	Peso final (g)
Oro	80	Bajo relieve (semiesferas)	120 s	0.3152
Oro	80	Sobre relieve (piel de tiburón)	240 s	2.4983
Oro	80	Bajo relieve (semiesferas)	120 s	1.0951
Oro	80	Bajo relieve (semiesferas)	240 s	2.0935

Los datos indican que una sola capa de metalizado no garantiza una cobertura uniforme de la superficie funcional, evidenciándose zonas mal cubiertas y una alta variabilidad en los resultados. Por el contrario, la aplicación de una doble capa de oro permitió obtener depósitos más homogéneos y valores de masa final más consistentes entre los diferentes ensayos, lo cual se traduce en un proceso más estable y reproducible.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas adicionales utilizando el Programa de Deposición 3 (PD3) en la posición más próxima al ánodo. Durante la ejecución del último buffer (1000 mA), se observó una caída abrupta de la intensidad transcurridos los primeros 30 minutos, acompañada de un

aumento progresivo del voltaje hasta alcanzar el límite permitido por el equipo. Este fenómeno se atribuyó a una pérdida de conductividad o a una resistencia elevada en el baño electrolítico.

Al retirar las muestras, se constató que la zona de unión entre la pieza modelo y su soporte presentaba signos evidentes de rozamiento, lo que habría deteriorado la fina capa metalizada, afectando la transmisión eficiente de corriente desde el portaelectrodos hacia la pieza.

Para solventar este problema, y con el objetivo de asegurar una posición constante del electrodo dentro del sistema sin necesidad de emplear cinta aislante (la cual favorecía la ascensión no deseada del baño sobre el lateral de la pieza), se procedió al rediseño del cubre-electrodos, como se muestra en la Figura 5.42. Esta nueva configuración garantiza una colocación precisa y repetible del electrodo a la altura deseada, eliminando interferencias mecánicas y favoreciendo la estabilidad eléctrica y geométrica del proceso.



a) b)

Figura 5.42. Cubre electrodo: a) protección inicial; b) protección final.

Tras implementar la mejora en el sistema de fijación del electrodo, se procedió a realizar un nuevo ensayo en el que se ajustó la configuración del programa de deposición. En esta ocasión, se amplió la duración de la etapa inicial a una hora, manteniendo una intensidad reducida (100 mA), con el objetivo de favorecer la formación de una capa base más uniforme y adherente antes de incrementar progresivamente la corriente en las siguientes etapas. Esta modificación se detalla en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Programa de deposición 4.

Programa deposición 4 (PD4)		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	1 hora
Buffer 2	250 mA	30 min
Buffer 3	500 mA	1 hora
Buffer 4	750 mA	1 hora
Buffer 5	1000 mA	1 hora

Tras las diversas modificaciones indicadas, se llevó a cabo nuevamente el estudio de la influencia de la distancia ánodo–cátodo, utilizando muestras metalizadas con doble capa de oro. Esta elección se basó en los resultados consistentes y reproducibles obtenidos en fases anteriores, que habían evidenciado una notable mejora en la conductividad superficial. Los resultados del experimento se recogen en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Resultados obtenidos en el estudio de distancia de los electrodos metalizados con oro.

Ensayo	Peso inicial	I_1º y 2º Fase	I_D60	I_D120	I_D180	Peso cáscara
1	9.2838	0.2163	0.499	0.262	0.261	1.238
2	9.2658	0.2116	0.471	0.218	0.179	1.080
3	9.2810	0.2605	0.389	0.324	0.269	1.242
4	9.2687	0.1677	0.512	0.292	0.283	1.255
5	9.2230	0.2677	0.390	0.288	0.278	1.223

Tal como se representa en la Figura 5.43, los resultados muestran una alta estabilidad entre muestras, destacándose que la posición más próxima al ánodo (60 mm) presenta una deposición notablemente superior, con un valor medio de 0,452 g de cobre. Este comportamiento confirma la influencia directa de la distancia en la eficiencia de la deposición, observándose una disminución progresiva del material depositado a medida que aumenta la separación entre ánodo y cátodo.

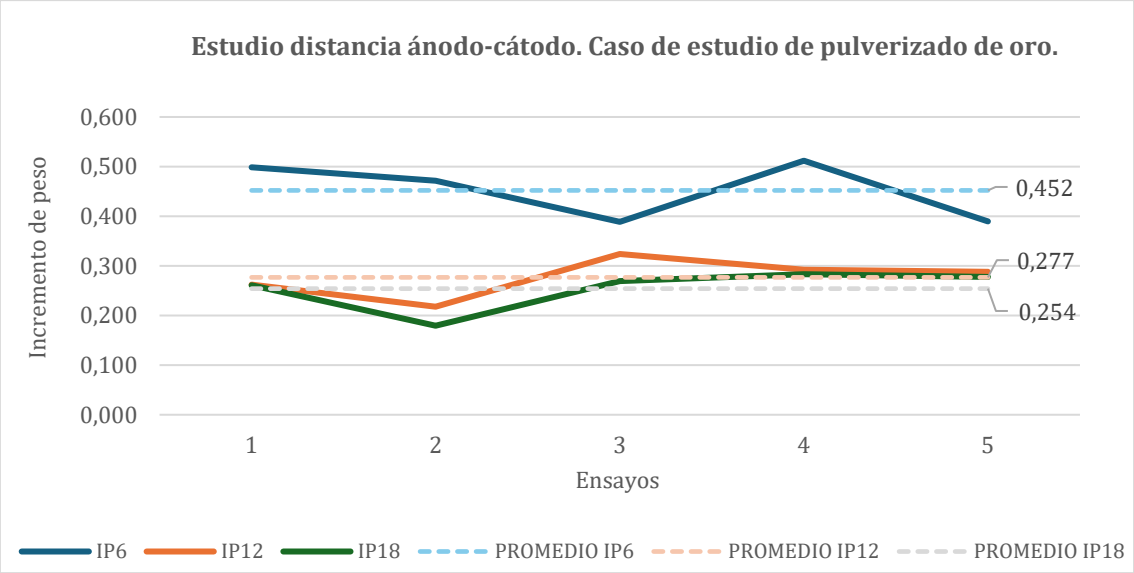


Figura 5.43. Gráfica de los valores obtenidos en el estudio distancia ánodo-cátodo con nuevo equipo.

Adicionalmente, se replicó este experimento bajo dos condiciones diferenciadas del baño electrolítico: por un lado, se utilizó el mismo baño empleado en ensayos anteriores (con aproximadamente 40 ciclos de uso); por otro, se empleó un baño completamente nuevo. El objetivo de esta comparación era determinar si el estado del electrolito influía en el comportamiento eléctrico del sistema, particularmente en las diferencias de voltaje observadas durante la ejecución del programa de deposición.

Aunque los valores de deposición en función de la distancia se mantuvieron similares entre ambos casos, los registros eléctricos evidenciaron una diferencia significativa en los valores de tensión: en el baño reutilizado, los voltajes registrados fueron sustancialmente más altos. Como se observa en la Figura 5.44, el voltaje requerido con el baño nuevo fue aproximadamente tres veces menor que con el baño usado, lo que sugiere un aumento en la resistencia interna del sistema vinculado al deterioro del electrolito.

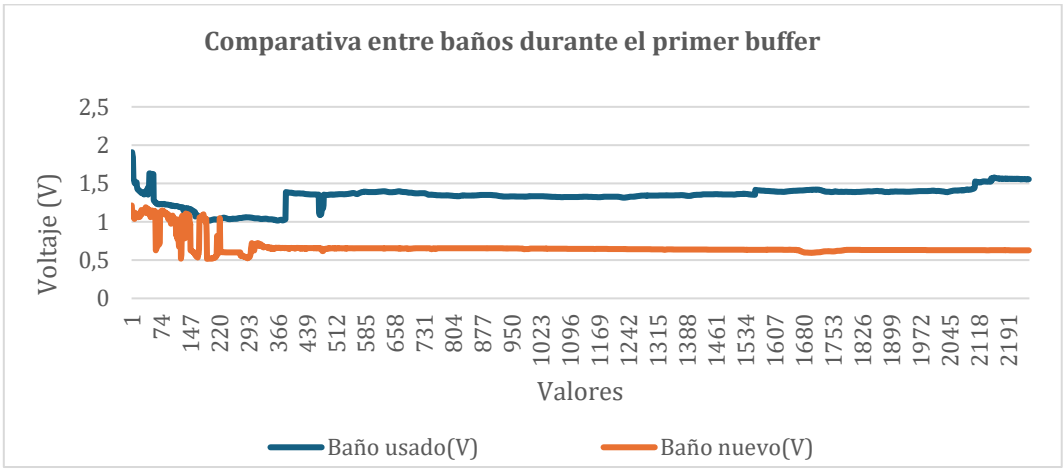


Figura 5.44. Comparativa de los valores de la tensión presente en los baños usados y nuevos.

Este hallazgo representa un aspecto crítico a considerar en la planificación de futuros experimentos. Aunque el sistema de filtrado y la recirculación continua contribuyen a mantener la estabilidad del medio, la degradación química del electrolito es un fenómeno inevitable que, si no se controla, puede comprometer la eficiencia del proceso de electroconformado.

5.5.2. Efecto de la renovación del baño y su intensidad

Tras el análisis de la influencia de la distancia ánodo-cátodo en la eficiencia del proceso de electroconformado, el siguiente parámetro a estudiar es la recirculación del baño electrolítico, dado su papel fundamental en la estabilidad del sistema y la calidad de las cáscaras de cobre obtenidas. La renovación continua o intermitente del electrolito favorece la transferencia de masa y previene la formación de gradientes de concentración, promoviendo una deposición más homogénea. No obstante, un flujo excesivo puede inducir turbulencias que comprometen la integridad del depósito.

Estudios previos han demostrado que un control adecuado del flujo del electrolito optimiza la eficiencia del proceso, reduciendo defectos como la formación de burbujas e inclusiones no deseadas en la deposición [26]. Zhao et al. [27], evaluaron el impacto de la agitación ultrasónica en la uniformidad del depósito, concluyendo que una circulación óptima mejora la eficiencia sin comprometer la calidad del recubrimiento. Por otro lado, el modelo teórico desarrollado por Sun y Wang [28] evidencia que el campo de flujo incide en la distribución iónica y en la evolución de la superficie de deposición, particularmente en microestructuras con relaciones de aspecto elevadas. Asimismo, McGeough y Rasmussen [29] establecieron las condiciones necesarias para obtener espesores uniformes, incluso en superficies irregulares, subrayando la importancia de una recirculación constante del electrolito para mantener la uniformidad química y minimizar defectos durante la deposición. Adicionalmente, Chalupa et al. [30], mediante simulaciones de dinámica de fluidos, determinaron que la obtención de un flujo laminar, logrado a través de un control preciso de las boquillas de recirculación y la optimización de los ángulos de salida, mejora significativamente la distribución del electrolito y reduce defectos en el depósito.

Durante los ensayos iniciales, en los que se evaluó la influencia de la distancia ánodo-cátodo, se registraron interrupciones temporales en el funcionamiento de la bomba de recirculación, ocasionadas tanto por fallos en el sistema eléctrico de conexión como por problemas mecánicos en la propia bomba. Estas interrupciones provocaron la suspensión del flujo en el baño electrolítico, lo que tuvo un impacto directo en los parámetros eléctricos del sistema. En particular, se observó un ligero incremento en el voltaje tras el cese de la circulación, lo que sugiere un aumento en la resistencia del electrolito ante la falta de renovación del baño. Una vez restablecida la recirculación, el voltaje tardaba en recuperar su valor previo e, incluso en algunos casos, no alcanzaba el nivel óptimo asociado al inicio del proceso de buffer. Estas observaciones evidenciaron la relevancia de la recirculación en la estabilidad del sistema, lo que motivó un estudio detallado sobre la influencia de este parámetro y la intensidad de la misma, controlada por la potencia de la bomba, en la dinámica del proceso de electroconformado, con el objetivo de comprender su impacto en la calidad de las electroformas obtenidas.

El objetivo del presente estudio es optimizar el proceso de electroforming y mejorar la calidad de las cáscaras de cobre mediante la evaluación del impacto de la recirculación del baño en la generación de electroformas. Específicamente, se analizará cómo el régimen de recirculación y su ausencia, junto con la potencia de la bomba, afectan la morfología y homogeneidad de los depósitos metálicos.

5.5.2.1. Definición de factores experimentales

Para evaluar la influencia de la recirculación y la potencia de la bomba en el proceso de electroconformado, se han definido dos factores experimentales:

- **Factor 1: Tipo de recirculación del baño**
    - Nivel 1: Sin recirculación (asociado siempre a 0% de potencia)
    - Nivel 2: Recirculación intermitente
    - Nivel 3: Recirculación constante
- **Factor 2: Potencia de la bomba (porcentaje de funcionamiento)**
    - Nivel 1: 60%
    - Nivel 2: 75%
    - Nivel 3: 90%

Para evaluar la influencia de la recirculación y la potencia de la bomba en el proceso de electroconformado, se han definido dos factores experimentales.

5.5.2.2. Diseño experimental

La imposibilidad de combinar el estado "sin recirculación" con niveles distintos de potencia de la bomba reduce el número de combinaciones experimentales. En consecuencia, se ha adoptado un diseño factorial restringido, en el cual la condición de "sin recirculación" se mantiene fija y las otras configuraciones siguen un diseño 2×3.

La Tabla 5.15 muestra la matriz ortogonal L8 ajustada para este estudio, donde cada combinación experimental se repite tres veces para mejorar la validez estadística de los resultados:

Tabla 5.15. Matriz L8 ajustada para analizar el efecto de la recirculación del baño y su potencia.

Experimento	Tipo de Recirculación	Potencia de la Bomba (%)	Repetición
1	Sin recirculación	0	x3
2	Recirculación intermitente	60	x3
3	Recirculación intermitente	75	x3
4	Recirculación intermitente	90	x3
5	Recirculación constante	60	x3
6	Recirculación constante	75	x3
7	Recirculación constante	90	x3

5.5.2.3. Cálculo del caudal y número de renovaciones del baño

Para caracterizar el impacto de la recirculación en el proceso de electroconformado, se ha determinado el caudal de la bomba en función de su potencia y se ha calculado el número de renovaciones del baño durante el ensayo.

El sistema de electroconformado utilizado en esta investigación emplea un tanque de 1 litro de capacidad. Se evaluaron dos modos de funcionamiento de la bomba:

- **Recirculación continua**
- **Recirculación intermitente** (ciclo de 5 minutos ON y 10 minutos OFF)

Teniendo en cuenta las configuraciones, previamente se cuantificó el tiempo de llenado del tanque para cada potencia de bomba. Los tiempos experimentales obtenidos para cada configuración de potencia fueron:

- **60%:** 285 s
- **75%:** 265 s
- **90%**: 240 s

A partir de estos valores, se calculó el número total de renovaciones (*N*) del baño, considerando el tiempo total del ensayo (16,200 s) y el tiempo efectivo de funcionamiento de la bomba. Por ejemplo, para una recirculación del 60% basta un ciclo de 5 minutos para lograr la renovación completa de todo el volumen del tanque de proceso. Como cada hora consta de cuatro ciclos de 5 min "ON", esto equivale a unas 4,2 renovaciones por hora, o aproximadamente 19 renovaciones en las 4,5 h de ensayo en modalidad intermitente. Al aumentar la potencia de la bomba al 90 %, el caudal crece un 25 % (1 L en 240 s), de modo que en cada ciclo de 5 min se renuevan unos 1,25 L. Esto se traduce en unas 5 renovaciones por hora y cerca de 22–23 renovaciones efectivas en el mismo período de 4,5 h. A modo de resumen podemos ver en la Tabla 5.16, cuantas renovaciones totales del baño se llevan a cabo para cada caso de estudio durante tiempo total de cada ensayo.

Tabla 5.16. Número de renovaciones según el tipo de ensayo.

Modo Funcionamiento	Bomba al 60%	Bomba al 75%	Bomba al 90%
Recirculación continua	56.92	61.07	67.55
Recirculación intermitente	18.97	20.36	22.52

A continuación, se analizarán los efectos de estas condiciones sobre el voltaje en cada etapa del proceso, la uniformidad del recubrimiento y la calidad final de las cáscaras obtenidas.

5.5.2.4. Estudio con electrodos reutilizados

Con el diseño experimental previamente establecido, se llevó a cabo un primer ensayo para confirmar la viabilidad de dicho diseño. En este caso, se emplearon los electrodos ya utilizados en el estudio inicial sobre el efecto de la distancia ánodo-cátodo. Este enfoque implica que la deposición de cobre en cada cátodo será distinta, pero permite evaluar si el comportamiento del ensayo se ajusta a las hipótesis planteadas en la fase inicial del estudio.

Este apartado se centra en analizar el comportamiento de los sistemas de recirculación continua e intermitente en el proceso de electroconformado. Para ello, se evaluaron diversos parámetros, tales como el voltaje en los diferentes buffers, el peso de las electroformas, el volumen depositado y el espesor medio teórico de las cáscaras obtenidas. Los cálculos de estos dos últimos valores se realizaron considerando los siguientes parámetros:

- Densidad del cobre: $8.937 \cdot 10^{-3}$ gr/mm^3
- Área de la parte funcional de la pieza modelo: 1695 mm^2

5.5.2.4.1. Análisis del voltaje de los buffers

El voltaje en los buffers refleja la resistencia global del sistema y las condiciones del transporte iónico dentro del baño electrolítico. Este parámetro es esencial para evaluar la eficiencia del proceso de electroconformado, ya que una disminución progresiva del voltaje entre los buffers consecutivos indica una menor resistencia y un transporte iónico más eficiente, lo que a su vez se asocia con una mayor deposición de cobre en la superficie funcional de la pieza.

En este estudio, se empleó el programa de deposición 4 (PD4) y los valores de los voltajes medios obtenidos en cada etapa se resumen en la Tabla 5.17. Cabe destacar que, dado que las muestras previamente ya tenían una capa de cobre, los valores de voltaje pueden verse influenciados por esta condición. Sin embargo, el enfoque principal de este análisis radica en evaluar la evolución de los

voltajes en función de las distintas condiciones experimentales, considerando la relación entre los diferentes buffers.

Tabla 5.17. Estudio del efecto de renovación del baño con electrodos reutilizados del ensayo de distancia.

Baño		Voltaje de los Buffers				
Recirculación	**Bomba**	**100mA**	**250mA**	**500mA**	**750mA**	**1A**
Continua	60%	0.889	1.407	1.853	2.219	2.614
Continua	75%	0.456	0.889	1.500	2.095	2.655
Continua	90%	0.856	1.240	1.978	2.429	2.999
Intermitente	60%	0.424	0.858	1.344	1.883	2.318
Intermitente	75%	0.496	0.938	1.761	2.272	2.712
Intermitente	90%	0.425	0.814	1.383	1.890	2.423
Nula	0%	0.614	1.179	1.775	2.325	2.551

Estos resultados se basan en los valores promedio de los buffers. Para poder comprender mejor el comportamiento para cada caso, a continuación, en la Figura 5.45, se ilustran los gráficos que comparan los diferentes comportamientos para cada buffer a lo largo del ciclo.

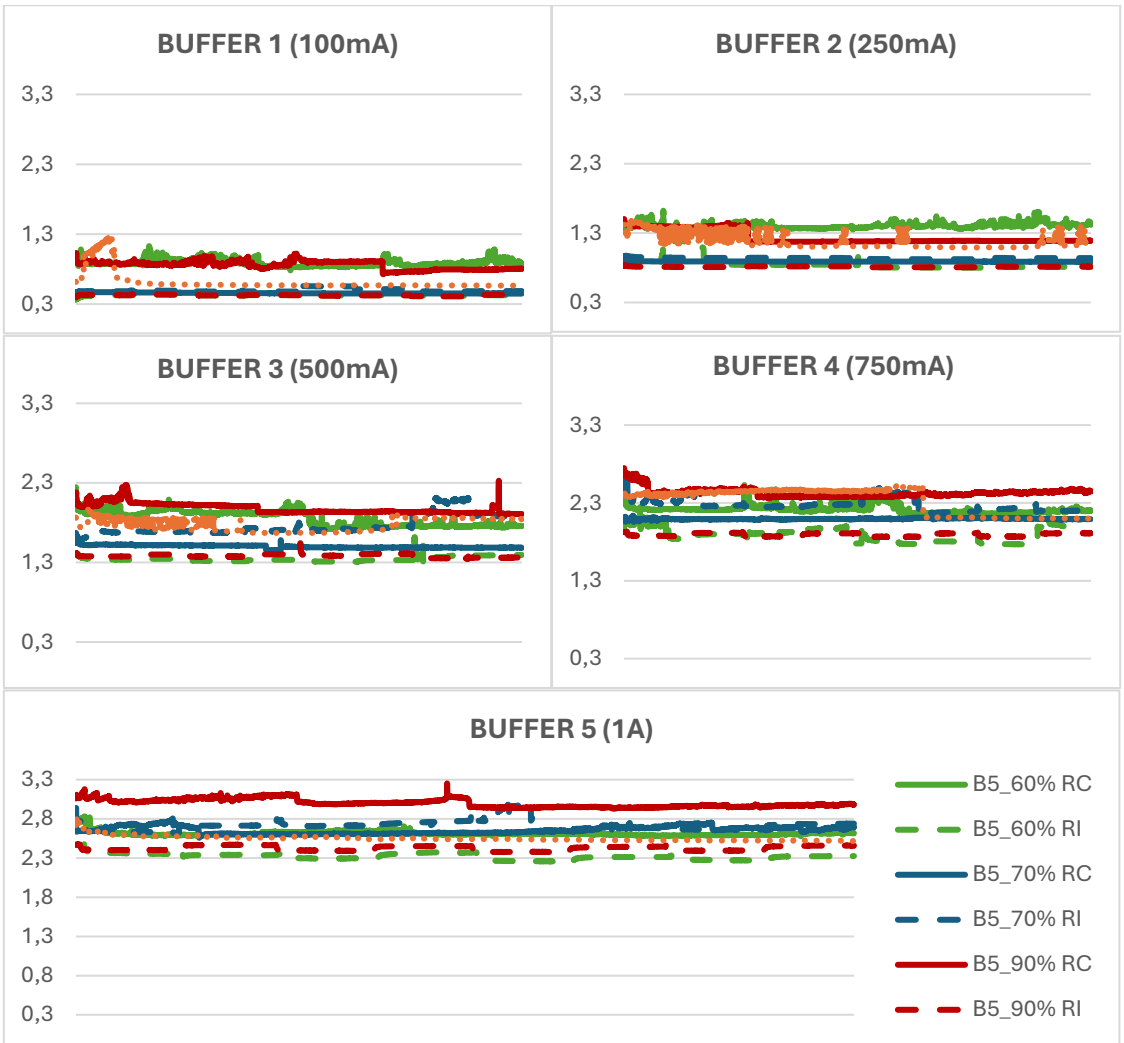


Figura 5.45. Gráficos del comportamiento de los buffers a lo largo de los diferentes ensayos, donde RC es recirculación continua, RI es recirculación intermitente y SR es sin recirculación.

En general, de los resultados obtenidos en este ensayo preliminar se puede concluir que sí que hay influencia significativa en la deposición metálica del tipo e intensidad de la renovación y circulación, observando en las gráficas un apreciable grado de estabilidad en los ensayos. De los valores concretos no se puede extraer conclusiones claras y por tal motivo se vio necesario realizar una fase de ensayos con piezas modelo sin deposición de cobre para interpretar de forma fiable los resultados.

En el ensayo sin recirculación, no se observó un comportamiento muy diferente a los otros casos, puede explicarse por el corto tiempo de duración del ensayo. Probablemente con tiempos de uso más largo del baño, este podría sufrir estratificación, lo que aumentaría la resistencia y evidenciaría la necesidad de recirculación para evitar este fenómeno y mantener una eficiencia adecuada.

Así mismo, para una comprensión más detallada de la eficiencia de los resultados obtenidos, se compararon las relaciones de incremento de amperaje de consigna con el incremento de los voltajes promedio de los buffers obtenidos experimentalmente, con las mostradas en las Tablas 5.18. y 5.19

Tabla 5.18. Relación de incremento de intensidad teórica entre buffers consecutivos.

Buffer Inicial	Buffer Final	Relación Ideal
100 mA	250 mA	2.5
250 mA	500 mA	2.0
500 mA	750 mA	1.5
750 mA	1 A	1.3

Tabla 5.19. Relación obtenida entre buffers consecutivos en los diferentes ensayos.

Baño		Relación entre los Buffers			
Recirculación	Bomba	1-2 (2.5)	2-3 (2.0)	3-4 (1.5)	4-5 (1.333)
Continua	60%	1.583	1.317	1.198	1.178
Continua	75%	1.948	1.687	1.397	1.267
Continua	90%	1.449	1.595	1.228	1.235
Intermitente	60%	2.020	1.568	1.401	1.231
Intermitente	75%	1.893	1.876	1.291	1.193
Intermitente	90%	1.916	1.699	1.367	1.282
Nula	0%	1.921	1.505	1.310	1.097

Un comportamiento más eficiente se refleja cuando las relaciones de incremento de voltaje obtenidas entre buffers son menores que los valores ideales de los incrementos de intensidad, lo que sugiere una disminución progresiva de la resistencia durante el proceso de deposición.

Los resultados experimentales indican que las relaciones entre buffers son consistentemente inferiores a los valores teóricos previstos, lo que se puede atribuir a la evolución de la pieza modelo durante el proceso de deposición de cobre. A medida que la cáscara de cobre se forma progresivamente, la resistencia de la superficie depositada disminuye. Este fenómeno facilita la deposición de iones de cobre, ya que se requiere una menor diferencia de potencial para continuar el proceso, lo que se traduce en una caída de voltaje menos pronunciada entre buffers sucesivos.

Esta disminución en la resistencia eléctrica a lo largo del proceso probablemente se corresponde con un transporte iónico más eficiente en el baño electrolítico.

Dichos hallazgos confirman que la mejora del sistema de electroconformado requiere no solo un control riguroso del régimen de renovación y recirculación ajustando la potencia de la bomba, sino también considerar la evolución dinámica de la pieza durante la deposición, elemento crucial para mejorar la homogeneidad y calidad de las cáscaras de cobre obtenidas.

Parece que los ensayos con recirculación intermitente demuestran que el proceso puede ser más sostenible al no ser necesario mantener la recirculación continua durante todo el proceso, lo que implica un menor consumo de energía para mantener una deposición eficiente.

5.5.2.4.2. Análisis del peso de las electroformas

Los valores de peso y volumen obtenidos en las electroformas son indicadores directos de la cantidad total de cobre depositado, reflejando de forma sensible la influencia de la recirculación del baño aplicada en el proceso. La Tabla 5.20 presenta los datos experimentales relativos al peso (g), volumen (mm^3) y espesor promedio teórico (mm) de las electroformas obtenidas bajo las diferentes condiciones operativas.

Tabla 5.20. Estudio del efecto de renovación del baño con electrodos reutilizados del ensayo de distancia.

Baño		Incremento de Pesos		
Recirculación	**Bomba**	**Peso (g)**	**Volumen (mm^3)**	**Espesor (mm)**
Continua	60%	1.766	197.559	0.117
Continua	75%	2.002	224.013	0.132
Continua	90%	1.920	214.814	0.127
Intermitente	60%	2.030	227.157	0.134
Intermitente	75%	2.009	224.829	0.133
Intermitente	90%	1.974	220.935	0.130
Nula	0%	1.850	206.981	0.122

Como en el caso anterior solo se puede observar que no hay diferencias significativas en la cantidad de material depositado entre las condiciones de recirculación continua e intermitente. En el caso de la ausencia de recirculación, se obtiene un valor relativamente bajo que podría indicar que en el periodo de tiempo del ensayo se podría estar produciendo unas peores condiciones para la deposición metálica.

5.5.2.5. Análisis con piezas modelo nuevas

Tras la primera prueba inicial, se llevaron a cabo tres ensayos con piezas modelo nuevas y aunque no se detallarán los datos de cada ensayo, todos ellos fueron ejecutados siguiendo un protocolo experimental idéntico. Para este nuevo protocolo, en los ensayos que requieren recirculación intermitente se incorporó una mejora en la automatización mediante un interruptor inteligente (T34-Smart Plug+). Este dispositivo, conectado vía Wi-Fi a una aplicación móvil, posibilita programar el encendido y apagado de la bomba, eliminando la necesidad de intervención manual.

Dado que el comportamiento observado fue altamente consistente en los tres casos, a continuación, se sintetizan los hallazgos más relevantes obtenidos en el estudio del efecto de la recirculación del baño electrolítico.

En este análisis se evaluó el impacto combinado de las variables principales de régimen de recirculación y potencia aplicada a la bomba, tomando como indicadores principales la masa de cobre depositada y la homogeneidad del espesor en la zona funcional de las cáscaras. La combinación de estos parámetros permitió valorar de forma integral tanto la eficiencia del proceso como la calidad del depósito resultante. Los valores medios de masa depositada se recogen en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Análisis comparativo de pesos obtenidos en los diferentes ensayos.

Baño		Pesos		
Recirculación	**Bomba**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**
Continua	60%	3,220	3,233	3,190
Continua	75%	3,214	3,225	3,210
Continua	90%	3,154	3,216	3,132
Intermitente	60%	3,226	3,270	3,205
Intermitente	75%	3,212	3,219	3,175
Intermitente	90%	3,226	3,199	3,194
Nula	0%	3,228	3,158	3,198

En general, las masas obtenidas se mantuvieron consistentes entre réplicas, lo que evidencia un control robusto del proceso de deposición independientemente de las condiciones del ensayo. Sin embargo, más allá del peso total, uno de los factores más críticos en electroconformado es la uniformidad del espesor. La Figura 5.49 presenta la desviación promedio del espesor en las distintas condiciones estudiadas.

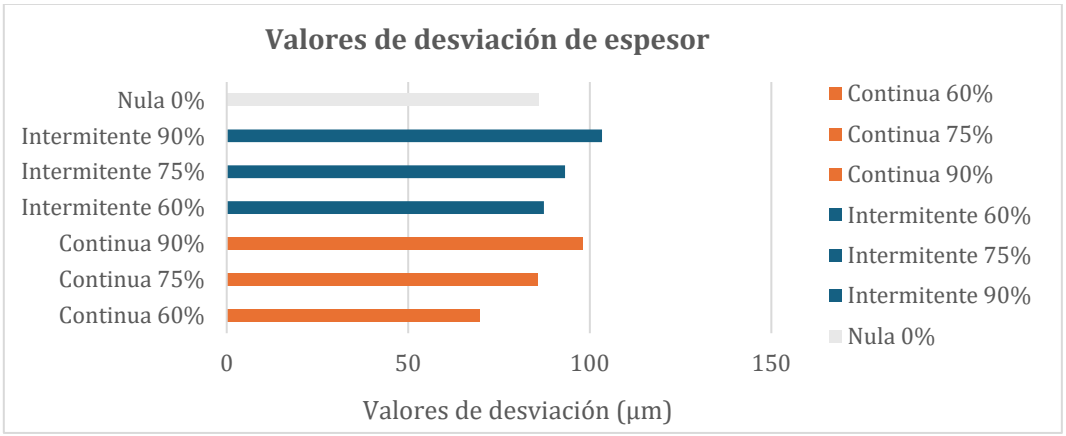


Figura 5.46. Desviación promedio del espesor de las cáscaras obtenidas en la totalidad de los ensayos.

Se observa que la recirculación continua a potencias moderadas (aproximadamente 60 %) presenta las menores desviaciones, lo que indica una mayor homogeneidad en la deposición. Este efecto se atribuye a un flujo constante del electrolito que mantiene estable la concentración de iones de cobre en la superficie activa, reduciendo zonas con gradientes de concentración. La recirculación intermitente a baja potencia también muestra un buen desempeño, con desviaciones comparables a las obtenidas en régimen continuo.

Estos resultados concuerdan con los datos previamente discutidos, donde se evidenció que las potencias elevadas generan flujos turbulentos que, en lugar de favorecer el transporte iónico, pueden provocar depósitos irregulares y no deseados. Por tanto, trabajar con recirculación continua a baja potencia no solo optimiza la masa depositada, sino que también mejora sustancialmente la calidad y uniformidad del recubrimiento. No obstante, a continuación, se destacan los datos de uno de los ensayos realizados con las piezas modelo nuevas.

5.5.2.5.1. Análisis del voltaje de los buffers

En este segundo ensayo se determinaron los valores promedio de voltaje para cada etapa, tal como se presenta en la Tabla 5.22, donde se incluyen datos para las diversas configuraciones de recirculación y niveles de potencia de la bomba.

Estos resultados parecen indicar que con recirculación continua hay diferencias importantes en la tensión promedio de la primera fase, que tienden a igualarse en las sucesivas fases de la deposición. Esto podría interpretarse que en esta primera fase interesaría tener una recirculación mínima para evitar las perturbaciones que pueda introducir un flujo de circulación más intenso. Con recirculación intermitente se observa que se necesita un mayor voltaje que en la continua, especialmente con potencia de bomba media y alta, mientras que con una potencia del 60% los voltajes tras las dos primeras fases son muy similares a la de la recirculación continua. Los valores de tensión para todas las fases cuando la recirculación es nula presentan unos valores muy similares a la situación de recirculación intermitente con un 60% de potencia de la bomba.

Tabla 5.22. Valores promedio de los buffers para los diferentes ensayos.

Baño		Voltaje promedio de los Buffers (V)				
Recirculación	**Bomba**	**100mA**	**250mA**	**500mA**	**750mA**	**1A**
Continua	60%	0.483	0.929	1.740	2.305	2.843
Continua	75%	0.731	0.945	1.717	2.218	2.891
Continua	90%	0.905	1.208	1.714	2.203	2.967
Intermitente	60%	1.100	1.403	1.698	2.259	2.780
Intermitente	75%	1.117	2.240	2.604	2.621	3.140
Intermitente	90%	1.617	2.725	2.591	3.019	3.294
Nula	0%	1.146	1.531	1.760	2.364	2.996

A continuación, la Figura 5.47 muestra, de forma gráfica, el comportamiento de cada uno de los buffers durante la totalidad del tiempo de ensayo.

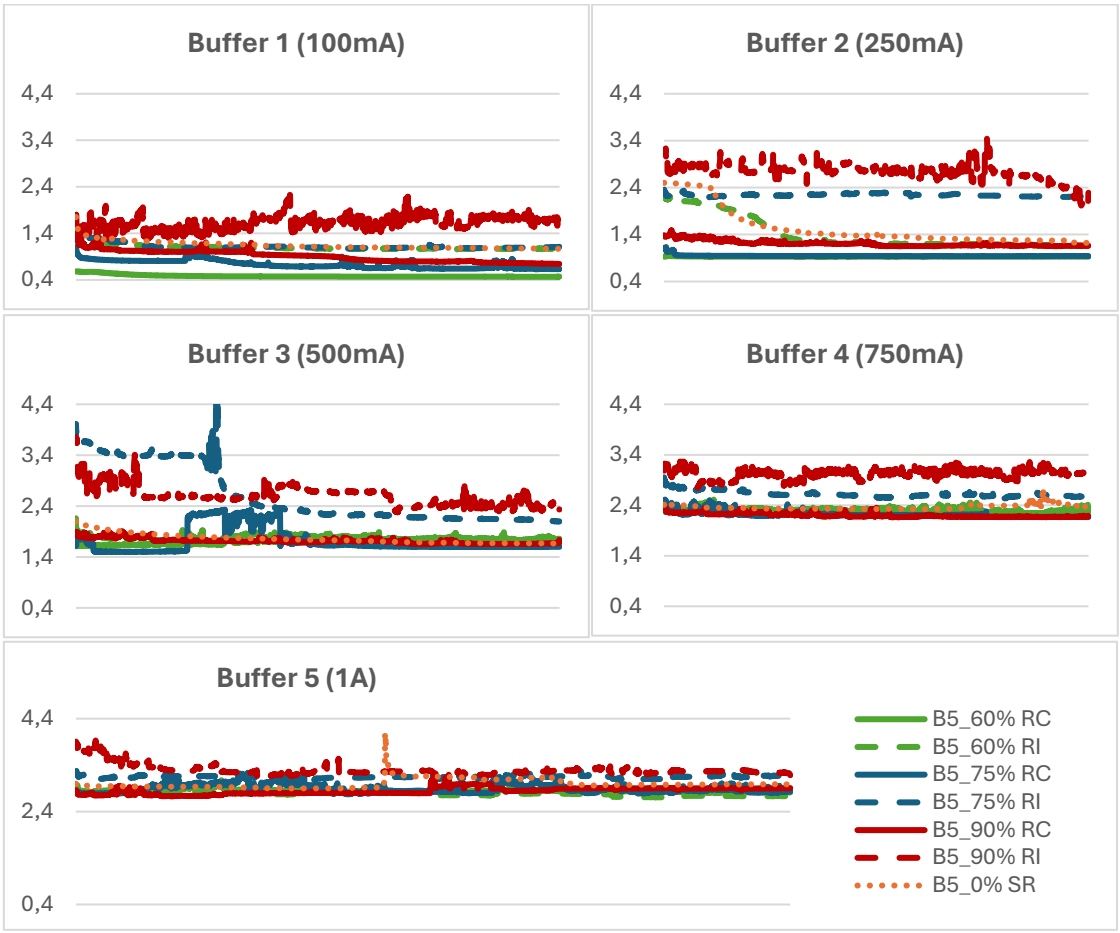


Figura 5.47. Gráficos del comportamiento de los buffers durante los diferentes ensayos.

Se observa que, en las dos primeras etapas (cruciales para lograr un adecuado recubrimiento de la zona funcional del electrodo) los ensayos con recirculación continua a potencias del 60% y 75% presentan los resultados más favorables. En contraste, durante este período el peor desempeño se registra en el ensayo de recirculación intermitente a máxima potencia.

Este comportamiento sugiere la posibilidad de implementar una estrategia híbrida: emplear, en las fases iniciales críticas para el desarrollo de la cáscara, parámetros que optimicen el rendimiento y requieran un menor consumo energético, como la recirculación continua al 60%; y, en las etapas posteriores, optar por la recirculación intermitente a la menor potencia mejorando la eficiencia del proceso sin comprometer la calidad del depósito.

Así mismo, se calcularon las relaciones entre los incrementos de voltajes de buffers consecutivos, presentadas en la Tabla 5.23, que permiten evaluar la eficiencia de la deposición en función de la caída de voltaje en cada transición.

Tabla 5.23. Relación entre los buffers en los diferentes ensayos.

Baño		Relación entre los Buffers			
Recirculación	**Bomba**	**1-2 (2.5)**	**2-3 (2.0)**	**3-4 (1.5)**	**4-5 (1.3)**
Continua	60%	1.922	1.874	1.324	1.234
Continua	75%	1.293	1.816	1.292	1.303
Continua	90%	1.335	1.419	1.285	1.347
Intermitente	60%	1.275	1.210	1.331	1.231
Intermitente	75%	2.006	1.163	1.007	1.198
Intermitente	90%	1.685	0.951	1.165	1.091
Nula	0%	1.336	1.149	1.343	1.268

Se han obtenido valores muy similares a los del ensayo preliminar, por lo que puede concluir que los procesos se han realizado con relativa homogeneidad dando fiabilidad a las valoraciones generales que se han realizado. Los valores concretos parecen reafirmar que los valores de intensidad de la recirculación con una potencia del 60%, tanto en recirculación continua para las dos primeras fases del proceso, como en modo intermitente para las otras 3 fases, son las condiciones más adecuadas.

5.5.2.5.2. Analisis del peso de las electroformas

Tras la realización de los experimentos, se obtuvo en cada prueba una cáscara de cobre cuyo peso se mantuvo casi constante en torno a los 3.2 g. Estos resultados tan estables son claramente fruto de aplicar parámetros operativos adecuados, obtenidos previamente mediante la determinación de la distancia ánodo-cátodo para maximizar la deposición. Considerando la densidad del cobre y el área de la pieza modelo, se puede calcular el volumen de metal depositado de alrededor de 350 mm^3, lo que se traduce en un espesor medio de unas 200 µm (Tabla 5.24).

Tabla 5.24. Valores de peso, volumen y espesor de las cáscaras de cobre en los diferentes ensayos.

Baño		Pesos		
Recirculación	**Bomba**	**Peso (g)**	**Volumen (mm^3)**	**Espesor (mm)**
Continua	50%	3.220	338.218	0.200
Continua	70%	3.214	359.703	0.212
Continua	90%	3.154	352.877	0.208
Intermitente	50%	3.226	361.001	0.213
Intermitente	70%	3.212	359.389	0.212
Intermitente	90%	3.226	361.012	0.213
Nula	0%	3.228	361.236	0.213

5.5.2.5.3. Análisis de la distribución de espesores de las electroformas

Una vez obtenido el espesor teórico promedio para las diversas cáscaras, se procedió a realizar mediciones del espesor real de las cáscaras para identificar su distribución. Para ello, se dividió la cáscara en 8 columnas y 8 filas, donde la zona central texturizada tenía una matriz de 4x4, determinando así espesores de borde, de zonas planas, zonas redondeadas y zonas con microtexturas. La matriz de puntos de puede observar en la Figura 5.48.

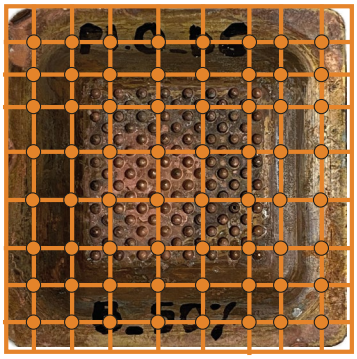


Figura 5.48. Distribución de puntos para la toma de medidas de las cáscaras electroconformadas.

El análisis visual de la distribución de espesores, evidenciado a través de mapas de color (Tabla 5.25, Tabla 5.26, Tabla 5.7 y Tabla 28), revela diferencias significativas en función de la modalidad de recirculación y de la potencia aplicada en la bomba. En los ensayos con recirculación continua se observa que el uso de la mínima potencia de la bomba conduce a una distribución del espesor particularmente homogénea a lo largo de la cáscara. En este caso, la zona central alcanza valores cercanos a 110 µm, mientras que el incremento de la potencia, al 75%, se induce una mayor acumulación de material en los laterales, y por último al 90%, se provoca una estratificación evidente en el borde inferior. Este fenómeno repercute negativamente en el relleno de las semiesferas, elemento crítico para asegurar la funcionalidad del electrodo. Así mismo, se destaca que, en los ensayos con recirculación intermitente, sobre todo en el de potencia máxima, se identificó que la cáscara presenta un relleno deficiente en la zona funcional texturizada, atribuible a perturbaciones que pueda haber introducidos los chorros cruzados durante el inicio y duración de la recirculación. En contraste, la recirculación intermitente a potencias más bajas ofrece resultados más favorables en términos de homogeneidad, especialmente en el área central, aunque al aumentar la intensidad de la recirculación la modalidad intermitente genera zonas con espesores menores o incluso semiesferas sin rellenar, en comparación con la modalidad continua para la misma potencia de bomba.

Tabla 5.25. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 60%.

	Recirculación continua_60%							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	280	259	224	199	212	218	238	301
F2	283	195	170	161	160	169	182	246
F3	246	199	105	102	102	106	159	243
F4	239	189	112	110	97	110	161	231
F5	261	174	98	104	108	102	173	272
F6	271	166	153	105	119	106	201	271
F7	282	213	166	162	169	186	213	271
F8	308	288	282	283	269	278	288	292

	Recirculación intermitente_60%							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	297	267	268	253	247	270	287	284
F2	280	195	164	199	191	173	192	247
F3	258	181	128	148	123	163	180	271
F4	255	183	220	119	115	116	186	244
F5	242	180	173	130	137	167	178	249
F6	265	190	103	167	179	81	200	321
F7	293	221	176	184	188	202	211	321
F8	373	350	331	338	318	374	376	378

Tabla 5.26. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 75%.

Recirculación continua_75%								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	331	351	295	260	247	302	324	289
F2	287	196	173	181	180	185	195	266
F3	296	192	171	104	101	118	179	254
F4	295	189	103	111	100	101	176	273
F5	296	194	105	102	103	95	169	293
F6	298	191	124	101	102	104	183	348
F7	312	208	189	203	169	184	206	348
F8	394	353	302	266	248	243	362	406

Recirculación intermitente_75%								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	298	277	253	253	271	271	295	312
F2	260	209	178	158	165	284	206	271
F3	250	176	109	105	101	107	190	269
F4	231	176	101	105	110	108	184	268
F5	254	181	174	114	109	161	182	289
F6	280	181	101	171	186	103	175	335
F7	306	205	182	181	188	172	197	335
F8	371	368	349	330	342	365	387	409

Tabla 5.27. Distribución de espesores para la recirculación continua e intermitente con potencia al 90%.

Recirculación continua_90%								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	327	324	302	279	267	300	293	314
F2	299	238	214	175	183	192	203	258
F3	290	197	109	106	102	108	211	256
F4	296	184	98	115	114	103	188	300
F5	297	183	100	115	104	113	173	279
F6	313	184	109	108	108	108	182	343
F7	334	227	192	191	179	186	217	343
F8	401	388	381	382	375	386	386	422

Recirculación intermitente_90%								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	281	267	263	257	265	282	299	318
F2	249	198	178	176	191	187	214	309
F3	248	195	112	122	124	114	175	267
F4	239	202	67	111	0	17	171	280
F5	246	202	19	97	104	106	183	256
F6	263	206	0	0	109	20	204	320
F7	315	242	191	181	190	192	264	320
F8	401	446	419	424	391	436	451	443

Tabla 5.28. Distribución de espesores para ensayo sin recirculación.

Sin recirculación								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	281	278	281	245	265	266	267	289
F2	264	199	185	182	193	191	212	256
F3	252	182	150	120	179	111	197	267
F4	261	191	128	75	114	155	189	280
F5	256	204	120	170	80	158	223	269
F6	280	224	37	37	72	76	213	281
F7	327	224	212	164	189	221	242	326
F8	399	370	341	388	314	329	345	391

La distribución de espesores en la cáscara sin recirculación muestra una clara estratificación con valores bastante más altos en la parte inferior en las zonas periféricas más expuestas. Ocurre justo lo contrario en la zona central, donde se obtienen valores de espesor mayor en la parte superior frente a la inferior. Esto evidencia el robo de metal del borde inferior de la cáscara de las zonas más próximas que se encuentran menos expuestas.

Aunque en las cáscaras generadas con recirculación también se observa el mismo efecto, este es mucho menos acentuado, no observando diferencias muy significativas entre la recirculación continua y la intermitente, aunque sí parecen observarse cuando varió la intensidad de recirculación. Con porcentajes superiores de potencia de la bomba parece que se aumenta la estratificación, especialmente en las zonas del contorno exterior.

El análisis de cuantificación numérica de la desviación media de los espesores, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.29, confirma que las mejores cáscaras (consideradas en términos de homogeneidad del depósito) se obtuvieron utilizando la mínima potencia de la bomba en la recirculación continua. Estos hallazgos subrayan la importancia de equilibrar la agitación del baño electrolítico: una recirculación estable y moderada favorece la distribución uniforme de los iones y, en consecuencia, una deposición de cobre de mayor calidad.

Tabla 5.29. Tabla resumen de las desviaciones típicas del espesor de cáscara y el espesor promedio.

Parámetros	Recirculación						
	Continua			Intermitente			Nula
	60%	75%	90%	60%	75%	90%	0%
Desviación	66.632	87.249	96.782	74.523	84.929	112.974	85.754
Espesor promedio (µm)	191	210	223	216	216	210	214

En la Figura 5.49 se muestran las dos cáscaras que presentan el peor comportamiento. En estas imágenes, tomadas a contraluz, se observa una elevada cantidad de orificios sin rellenar, destacándose especialmente en la Figura 5.48a, correspondiente al ensayo intermitente a máxima potencia. Estos dos resultados parecen reforzar la idea que al activarse el flujo de recirculación con elevada intensidad se generan perturbaciones dentro del baño y se impide el adecuado desplazamiento de los iones hacia la pieza modelo, lo que compromete la integridad del depósito.



a) b)

Figura 5.49. Defectos observados en las cáscaras de cobre. a) Ensayo de recirculación intermitente potencia de bomba al 90%; b) Ensayo sin recirculación.

5.5.2.6. Reutilización de las piezas modelo

Además, estos tres estudios demostraron que, al generar cáscaras de cobre con suficiente integridad estructural, es posible extraer las piezas modelo sin comprometer su geometría funcional, lo cual permite su reutilización en múltiples ciclos de fabricación. Este aspecto tiene importantes implicaciones desde el punto de vista de la sostenibilidad del proceso, ya que reduce tanto el consumo de materia prima como el tiempo requerido para la fabricación de nuevos patrones.

La Figura 5.50 ilustra visualmente este hallazgo, mostrando piezas modelo reutilizadas en hasta tres ensayos consecutivos sin alteraciones apreciables en la geometría texturizada. Este comportamiento sugiere que, bajo condiciones óptimas de deposición, las piezas modelo pueden mantener su funcionalidad durante un número elevado de ciclos, prolongando su vida útil y reduciendo significativamente el impacto ambiental del proceso.

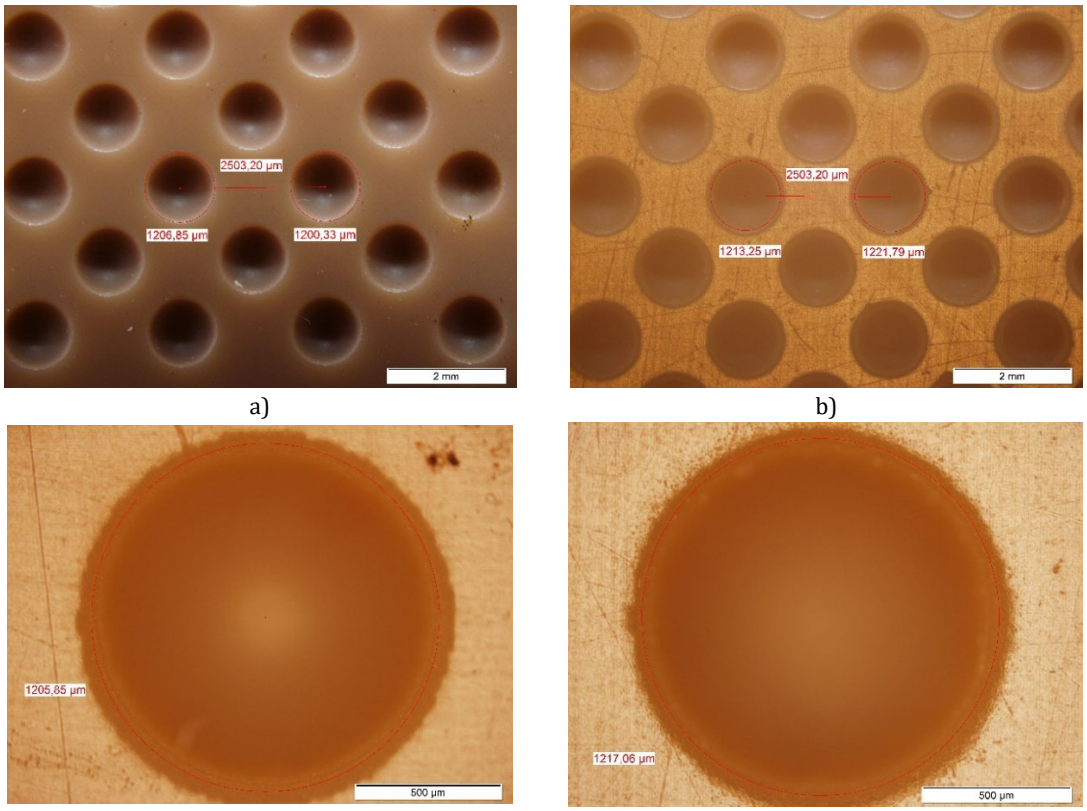


Figura 5.50. Piezas modelo reutilizadas para los diferentes ensayos.

5.5.3. Análisis del efecto del desgaste del baño en el depósito de cobre

En estudios previos se abordó el impacto de la distancia ánodo-cátodo sobre la deposición de cobre, evaluándose la resistencia del baño electrolítico mediante los voltajes obtenidos en los primeros buffers. Sin embargo, para evaluar de forma específica el efecto del desgaste del baño en la calidad del depósito, se llevó a cabo un estudio individualizado bajo condiciones optimizadas de separación entre ánodo y cátodo, potencia y tipo de recirculación.

En este estudio se realizaron tres ensayos con diferentes condiciones del baño electrolítico y utilizando la misma pieza modelo. Esta pieza, con una textura de semiesferas bajo relieve, fue sometida a un proceso de metalizado homogéneo mediante tres aplicaciones consecutivas de 120 segundos buscando un recubrimiento adecuado y reproducible. Esta pieza modelo se fabricó con la resina Wanhao Clear, para poder observar el proceso de deposición de cobre en la misma.

Los tres tipos de baño analizados fueron:

- Baño contaminado: Utilizado en diversas ocasiones y expuesto al ambiente sin la protección adecuada, lo que ha provocado la acumulación de contaminantes, tales como fragmentos de cobre y partículas de plástico.
- Baño muy usado: Empleado en aproximadamente 40 ensayos, pero conservado en condiciones relativamente controladas (almacenado en botellas entre jornadas) para minimizar la degradación.
- Baño nuevo: Completamente nuevo para la realización de las pruebas.

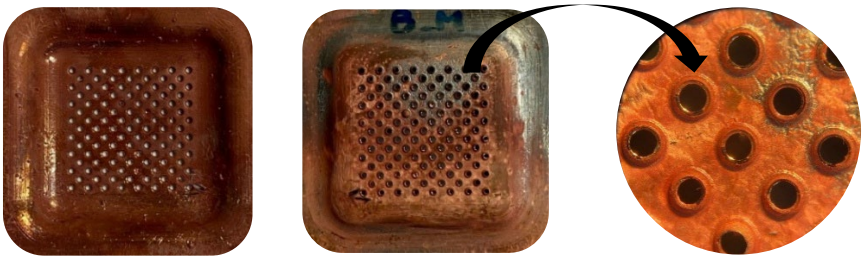
La Tabla 5.30 presenta los resultados comparativos en términos de peso, volumen y espesor de las cáscaras depositadas.

Tabla 5.30. Análisis comparativo de pesos obtenidos en los diferentes ensayos.

Calidad del Baño	Peso	Volumen	Espesor
Contaminado	3.185	356.346	0.210
Muy usado	3.237	362.265	0.214
Nuevo	3.277	366.741	0.216

Como se puede observar la diferencia en peso es muy pequeña, menor a 0,1 gramos, lo que representa aproximadamente una diferencia en torno al 3%, por lo que en primera instancia podría parecer que la calidad del baño no presenta diferencias en lo que a cantidad de material depositado se refiere.

No obstante, es la evaluación visual la que evidencia diferencias significativas entre los diversos baños (véase Figura 5.51; 5.52 y 5.53.). Con el baño contaminado, se observa que la mayoría de las cavidades de las semiesferas quedan sin rellenar, produciendo cáscaras inservibles para su aplicación en SEDM. En contraste, el baño muy usado permite el relleno de casi todas las esferas, aunque el recubrimiento inicial no se forma de manera uniforme, lo que impide una réplica exacta de la geometría de las semiesferas. Finalmente, el baño nuevo muestra un desempeño excelente, ya que la deposición se completa sin defectos y replica fielmente la morfología de la pieza modelo.



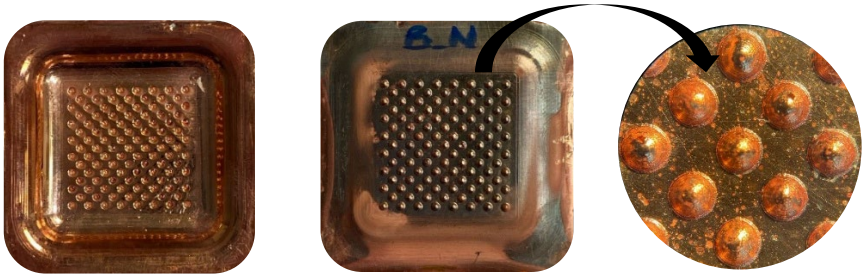
a) b) c)

Figura 5.51. Cáscara obtenida con baño contaminado: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle.



a) b) c)

Figura 5.52. Cáscara obtenida con baño usado: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle.



a) b) c)

Figura 5.53. Cáscara obtenida con baño nuevo: a) parte interna; b) parte trasera; c) detalle.

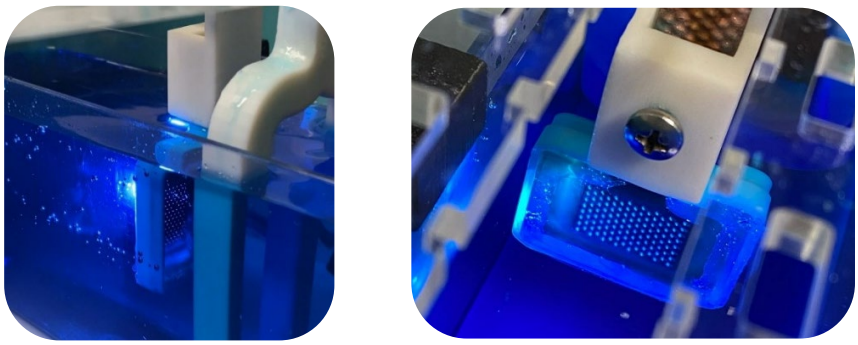
En conclusión, estos resultados demuestran la importancia crítica de mantener el baño electrolítico en condiciones óptimas, ya que su estado influye significativamente en la calidad y en la uniformidad

del recubrimiento. La adecuada gestión y renovación del baño, junto con el sistema de recirculación rediseñado en el equipo, ha permitido conseguir de forma consistente cáscaras de cobre de alta calidad e integridad, fundamentales para la fabricación de herramientas SEDM.

5.5.4. Análisis del efecto de la pantalla y el tipo de textura sobre la distribución del espesor

Durante el estudio de la influencia del baño electrolítico en el proceso de electroconformado, se observó de forma progresiva el modo en que se generaba el crecimiento del material sobre las cáscaras. Estos hallazgos motivaron un estudio complementario centrado en mejorar la distribución del espesor depositado, mediante la incorporación de una pantalla protectora diseñada específicamente para focalizar el transporte iónico hacia la zona central de la pieza modelo, es decir, la región texturizada de mayor interés funcional para aplicaciones de electroerosión por penetración.

Inicialmente, el programa de deposición empleado en los ensayos previos contemplaba un intervalo total de una hora y media entre las dos primeras fases, a baja intensidad, con el objetivo de garantizar una deposición homogénea inicial. Sin embargo, las observaciones visuales mostraron que, al finalizar la segunda etapa, alguna cáscara presentó alguna semiesfera incompleta (véase Figura 5.54).



a) b)

Figura 5.54. Falta de relleno en la zona texturizada durante la fase 2. a) visión delantera del cátodo; b) visión trasera del cátodo.

Como respuesta a esta limitación, se modificó el programa de deposición extendiendo la segunda fase a una hora, de modo que todas las etapas tuvieran una duración uniforme. Este ajuste, reflejado en el Programa de Deposición 5 (PD5) resumido en la Tabla 5.31, permitió que el llenado de las cavidades se completara de forma más eficiente, garantizando una base uniforme antes del incremento de intensidad en las etapas posteriores.

Tabla 5.31. Programa de deposición 5.

Programa deposición 5 (PD5)		
BUFFER	**INTENSIDAD**	**TIEMPO**
Buffer 1	100 mA	1 hora
Buffer 2	250 mA	1 hora
Buffer 3	500 mA	1 hora
Buffer 4	750 mA	1 hora
Buffer 5	1000 mA	1 hora

Una vez optimizado el programa, se llevaron a cabo nuevos ensayos para evaluar si era posible mejorar la deposición en la zona funcional sin comprometer la uniformidad del recubrimiento en las regiones laterales. Se mantuvieron las condiciones que previamente habían mostrado mejores resultados (recirculación continua al 60 % de potencia y distancia ánodo–cátodo de 60 mm), utilizando piezas con textura de semiesferas en bajo relieve. En estos ensayos se utilizó el protector convencional para evitar metalizaciones indeseadas, al que se añadió una pantalla protectora cuya

función era controlar el flujo del electrolito, redirigiéndolo hacia la zona funcional central, especialmente relevante en texturas entrantes donde la geometría dificulta su deposición.

Los resultados obtenidos (Tabla 5.32) muestran una mejora significativa en la distribución del espesor. En las condiciones sin pantalla, se observó un efecto de borde, con espesores medios en la zona texturizada en torno a 100 µm. Con la incorporación de la pantalla protectora, el depósito se redistribuyó eficientemente, alcanzando valores en la zona central de hasta 160 µm, mientras que se redujo la acumulación en los laterales. Además, la variabilidad en la distribución se vio drásticamente reducida, pasando de una desviación estándar de 103.47 µm sin pantalla, a tan solo 34.12 µm con pantalla.

Tabla 5.32. Estudio del efecto de la pantalla en microtexturas de semiesfera entrantes.

Sin pantalla

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	374	346	286	290	284	279	343	427
F2	348	218	166	184	195	193	207	304
F3	264	191	114	114	101	110	216	315
F4	240	186	122	116	114	106	188	246
F5	248	193	0	127	109	114	181	213
F6	259	193	0	109	122	0	176	396
F7	306	207	199	201	227	194	215	396
F8	420	394	362	394	407	415	345	468

Con pantalla

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	159	166	222	227	225	211	210	179
F2	177	225	226	235	235	212	195	194
F3	179	227	148	163	158	145	233	217
F4	225	243	185	182	173	158	249	225
F5	233	248	191	190	173	146	255	221
F6	218	237	154	171	157	150	245	187
F7	179	240	224	235	243	241	223	187
F8	167	187	221	265	275	239	180	166

Adicionalmente, se extendió este estudio a piezas con texturas en sobre relieve, incluyendo geometrías de semiesferas salientes y patrones tipo “piel de tiburón” obtenidos (Tabla 5.33).

Tabla 5.33. Estudio del efecto de la pantalla en microtexturas de semiesfera saliente y textura de piel de tiburón.

Semiesferas sobre relieve

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	199	208	231	245	256	235	224	216
F2	194	217	212	239	238	223	210	219
F3	217	246	255	292	299	248	217	230
F4	226	238	292	317	324	305	240	269
F5	268	244	297	324	326	311	233	256
F6	236	229	239	300	312	277	220	202
F7	194	229	221	225	224	201	229	202
F8	189	209	223	267	275	247	220	214

Con pantalla tiburón

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	294	290	291	290	290	268	217	205
F2	262	215	221	241	230	250	237	189
F3	276	219	221	250	263	238	250	202
F4	274	238	266	317	300	249	267	257
F5	277	239	250	310	306	249	235	245
F6	240	239	241	286	266	219	245	183
F7	208	235	225	217	219	238	230	183
F8	195	203	226	233	248	223	237	180

Los resultados indican que la implementación de la pantalla también es eficaz en estas configuraciones más complejas, reduciendo el efecto de borde y favoreciendo una distribución más regular del espesor. Se lograron valores en torno a 200 µm en las zonas perimetrales y hasta 300 µm en las áreas funcionales texturizadas, lo que se traduce en una mayor rigidez, crucial para el correcto funcionamiento de las herramientas SEDM.

Para ofrecer una visión global de los efectos del tipo de textura y del uso de la pantalla protectora, se presenta a continuación la Tabla 5.34, en la que se comparan los espesores promedio obtenidos en distintas zonas de las cáscaras, permitiendo valorar la redistribución del cobre según la configuración experimental.

Tabla 5.34. Espesores a lo largo de las cáscaras electroconformadas.

Espesor promedio (µm)	Semiesfera bajo relieve (sin pantalla)	Semiesfera Bajo relieve	Semiesfera sobre relieve	Piel de tiburón
Cáscara sin esquinas	218.10	206.40	246.80	235.10
Zona texturizada	92.38	165.30	294.90	258.60
Franja Superior	157.80	199.60	256.20	236.90
Franja Inferior	142.6	206.80	257.80	244.40

En los ensayos sin pantalla protectora, se constató que la franja inferior presentaba menores espesores en comparación con la superior, especialmente en las piezas con textura en bajo relieve. Esta desigualdad está asociada a un efecto de borde más pronunciado en la parte baja de la cáscara. La misma textura, al incorporar la pantalla, mostró un aumento significativo del espesor en la zona funcional (de 92,38 µm a 165,30 µm), al tiempo que se redujeron los valores en los bordes, consiguiendo una distribución más equilibrada.

Por otra parte, las texturas en sobre relieve presentaron espesores superiores a 250 µm en la región central, con una mejor distribución relativa entre las distintas zonas de la cáscara. En particular, la textura de semiesferas salientes mostró la mayor uniformidad, lo cual sugiere un comportamiento favorable de estas geometrías cuando se busca maximizar rigidez estructural y homogeneidad.

5.6. Conclusiones

El presente trabajo ha demostrado que el control preciso de variables operativas como la intensidad de corriente, el tiempo de deposición, la distancia entre electrodos y el régimen de recirculación del baño electrolítico es esencial para obtener depósitos de cobre repetibles, homogéneos y estructuralmente robustos mediante electroconformado.

La implementación de programas de deposición escalonados, con buffers de intensidad progresiva, ha permitido reducir drásticamente el tiempo total del proceso (de 24 a 5 horas) sin comprometer la calidad del recubrimiento. Esta estrategia favorece una nucleación uniforme en las etapas iniciales y un crecimiento controlado del espesor en fases posteriores, mejorando la eficiencia del proceso y su reproducibilidad.

En cuanto a la recirculación del baño, los estudios comparativos han evidenciado que la recirculación continua a potencias moderadas (60–75 %) proporciona condiciones óptimas para la deposición. Esta configuración favorece un flujo iónico más estable, reduce la resistencia del sistema (menores tensiones en buffer) y mantiene una concentración constante de iones cobre, gracias a tasas de renovación del baño de hasta 57 veces por ensayo. En contraste, la recirculación intermitente o nula genera fluctuaciones significativas, tanto en tensión como en espesor, afectando la uniformidad del recubrimiento, aunque la recirculación intermitente a baja potencia puede ser una opción de gran interés ya que consigue también resultados similares reduciendo mucho el consumo energético del sistema de recirculación.

En relación con la distancia ánodo–cátodo, se comprobó que distancias más cortas (60 y 80 mm) favorecen una mayor deposición, especialmente en geometrías complejas. Sin embargo, también se observó una mayor variabilidad en estos casos, lo que pone de relieve la necesidad de combinar esta condición con una recirculación efectiva y una buena conductividad superficial para estabilizar el proceso. A través del rediseño del equipo y la aplicación del nuevo programa de deposición, se consiguió una distribución más uniforme del espesor, concentrando la deposición en la región funcional de la pieza.

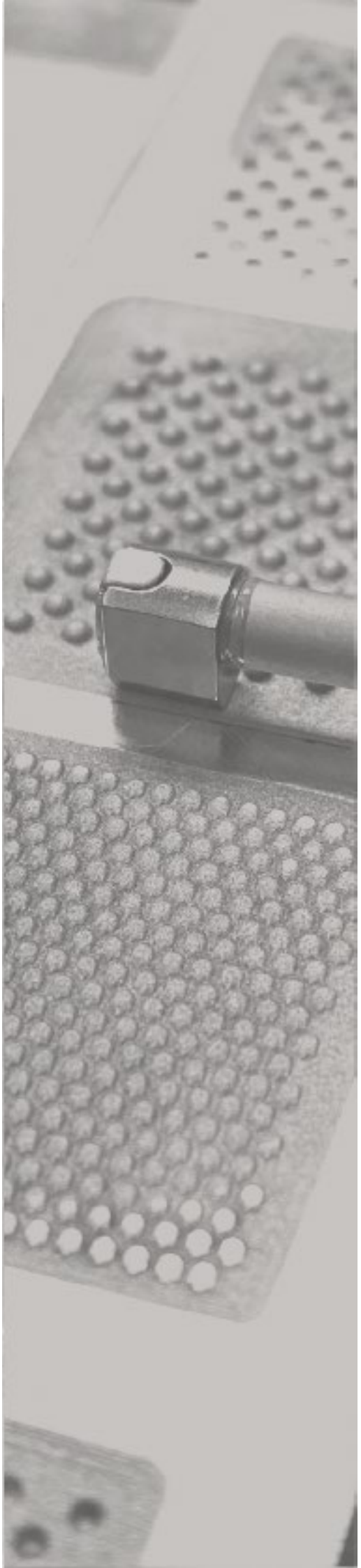
Uno de los avances más relevantes se obtuvo con la incorporación de una pantalla protectora, la cual redirige el flujo de iones hacia la zona central texturizada del electrodo. Ello permitió aumentar el espesor en la zona crítica hasta valores cercanos a los 150 µm, al tiempo que se redujo la desviación estándar del espesor desde 103,47 µm hasta tan solo 34,12 µm. El efecto de borde se minimizó significativamente, y la distribución del recubrimiento se volvió mucho más homogénea. En las texturas de sobre relieve, como las semiesferas salientes y los patrones tipo "piel de tiburón", los espesores en la región funcional alcanzaron valores de hasta 300 µm, demostrando una mayor rigidez y consistencia del depósito.

Los estudios sobre diferentes geometrías texturizadas revelaron que la forma y la orientación de las texturas tienen un impacto directo en la eficiencia del recubrimiento. Las texturas sobre relieve presentaron un comportamiento más predecible y homogéneo, mientras que algunas geometrías entrantes generaron zonas con defectos o espesores reducidos. Estos resultados subrayan la necesidad de considerar criterios geométricos y funcionales en el diseño de las piezas modelo para aplicaciones de alta precisión.

En términos de ingeniería del sistema, el rediseño integral del equipo de microelectroconformado ha sido uno de los aportes más significativos de esta tesis. Las mejoras implementadas —incluyendo la reconfiguración del tanque, la incorporación de un sistema de doble depósito, el desarrollo de mecanismos de sujeción más estables y la adopción de bombas peristálticas— han transformado un prototipo experimental en un equipo robusto, versátil y escalable. Estas mejoras han permitido obtener cáscaras de cobre con excelente integridad estructural, reducir los tiempos de proceso, estandarizar condiciones de ensayo y facilitar la replicabilidad de los resultados.

Asimismo, la combinación del nuevo diseño del equipo con la optimización del flujo y la deposición ha demostrado que es posible reutilizar las piezas modelo en múltiples ciclos sin comprometer la textura funcional. Esto supone un avance significativo en términos de sostenibilidad, al reducir el uso de material y aumentar la vida útil de los patrones de fabricación.

En conjunto, los resultados experimentales presentados a lo largo de esta tesis refuerzan la validez del proceso de electroconformado aplicado a la fabricación de electrodos microtexturizados. La metodología aplicada permite alcanzar altos niveles de precisión, homogeneidad y eficiencia, lo que refuerza la viabilidad de esta tecnología en aplicaciones industriales como la electroerosión por penetración. El sistema y procedimiento propuestos representan una base sólida y replicable para futuras investigaciones en el campo de la fabricación de microestructuras metálicas.



CAPÍTULO VI

Validación de superficies microtexturizadas

6. VALIDACIÓN DE SUPERFICIES MICROTEXTURIZADAS

La caracterización metrológica es un componente crucial en la evaluación y control de procesos de fabricación avanzada, particularmente en la fabricación de alta precisión, como la generación de electrodos para el proceso de SEDM. Este proceso implica un control exhaustivo de las dimensiones y características superficiales de las piezas y herramientas involucradas, ya que la precisión dimensional y la estabilidad de la forma afectan directamente la calidad del producto final. En este contexto, la caracterización metrológica permite verificar que tanto los electrodos como las piezas resultantes cumplen con las especificaciones y las propiedades geométricas requeridas, minimizando la acumulación de errores a lo largo del proceso y evaluando el impacto de variables como la limpieza o la geometría de las piezas.

Los estudios analizados en este capítulo se centran en aspectos específicos que influyen en la precisión final de las piezas. El análisis de la acumulación de error examina cómo las pequeñas variaciones y desviaciones en cada fase del proceso pueden amplificarse, afectando el rendimiento general y la exactitud dimensional. Adicionalmente, el estudio del efecto de la limpieza en la fabricación de las piezas modelo considera cómo la eliminación de residuos, que se pueden acumular durante la fabricación de dichas piezas, impacta en las características geométricas y funcionales de las piezas. Finalmente, el análisis del rendimiento del electrodo en el proceso de SEDM permite verificar la hipótesis del empleo de estos electrodos como herramientas de acabado para el proceso SEDM. Así mismo, es esencial estudiar no solo el electrodo sino como se ha replicado la textura en la pieza erosionada, y si se han logrado las propiedades funcionales que se buscaban.

Este capítulo, por tanto, se enfoca en ofrecer una comprensión detallada de cómo la caracterización metrológica aplicada a cada etapa del proceso estudiado es esencial para la optimización de la precisión, la fiabilidad y la calidad del producto final. A través de estos estudios, se busca establecer pautas y metodologías de control que contribuyan a minimizar los errores y maximizar la eficiencia en la producción de componentes complejos y de alta exigencia dimensional.

6.1. Metodología

Para llevar a cabo una caracterización metrológica y validación visual de las superficies texturizadas que se han diseñado y fabricado, es fundamental realizar una inspección sistemática a lo largo de todo el proceso de fabricación de los electrodos. Esta inspección permite detectar posibles anomalías en etapas tempranas, evitando la acumulación de defectos que podrían comprometer la calidad final de los electrodos. Además, garantiza que la geometría y el acabado superficial cumplan con los requisitos especificados, aspectos esenciales para una transferencia precisa de la textura al componente final.

El procedimiento de caracterización se desarrolla en las siguientes etapas:

1. **Análisis de las piezas modelo**: Se verifica que las texturas generadas mediante fabricación aditiva presentan dimensiones y morfología acordes con el diseño CAD original. Esta evaluación es clave para garantizar la fidelidad de la réplica durante el proceso de electroconformado.
2. **Evaluación de las cáscaras de cobre y las piezas modelo tras el electroconformado**: Se inspeccionan las cáscaras metálicas obtenidas, así como las piezas modelo reutilizadas, para asegurar que las características texturizadas no han sufrido degradación o daños durante el proceso.
3. **Análisis del desgaste de la herramienta en SEDM**: Una vez que la cáscara de cobre es empleada como electrodo en el proceso de electroerosión, se estudia su desgaste para evaluar su durabilidad y estabilidad geométrica.
4. **Caracterización de las piezas erosionadas**: Finalmente, se examinan las piezas erosionadas mediante SEDM para evaluar la replicabilidad del proceso y la fidelidad en la transferencia de la textura desde el electrodo hacia la superficie mecanizada.

En cada una de estas fases se emplean técnicas avanzadas de metrología dimensional y de superficies, permitiendo evaluar parámetros clave como la precisión geométrica, el acabado superficial y el desgaste de los electrodos. Estos análisis proporcionan una visión integral del desempeño de cada etapa del proceso de fabricación de los electrodos texturizados. Antes de abordar los diversos estudios realizados, se presentarán los equipos y herramientas utilizados en la caracterización metrológica.

6.2. Estudios experimentales

En este apartado se presentan los distintos estudios experimentales llevados a cabo durante esta investigación. Cada estudio aborda una etapa crítica del proceso, desde la evaluación de la precisión dimensional y la acumulación de errores hasta la caracterización del comportamiento funcional de las texturas transferidas.

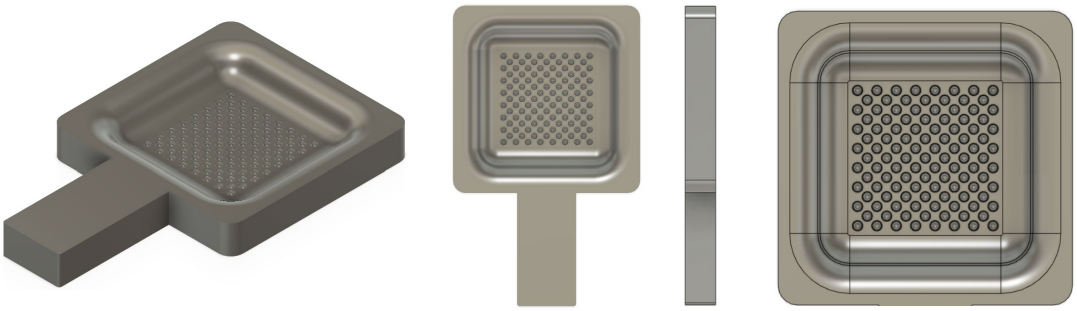
6.2.1. Estudio de acumulación de error durante el proceso de generación de electrodos SEDM microtexturizados

La fabricación de electrodos microtexturizados para SEDM implica una secuencia de procesos sucesivos, cada uno con posibles fuentes de desviación dimensional que pueden acumularse a lo largo de la cadena de fabricación. La comprensión de esta acumulación de errores es esencial para identificar las etapas críticas que afectan la precisión final del electrodo, y así poder proponer mejoras o ajustes en los procesos implicados.

El objetivo de este primer estudio es cuantificar la evolución del error dimensional desde el diseño CAD inicial hasta la pieza final erosionada, identificando en qué fase se produce la mayor desviación con respecto al modelo nominal. Se ha planteado como hipótesis que el proceso que introduce el mayor error acumulado es la fabricación aditiva, concretamente la tecnología MSLA utilizada en la generación de las piezas modelo.

6.2.1.1. Metodología y equipamiento

Para ello, se seleccionaron las dos microtexturas funcionales representativas, descritas en el Capítulo IV. La primera corresponde a una textura de semiesferas en saliente con un diámetro de 1,2 mm (Figura 6.1), una de las mayores dimensiones utilizadas en esta investigación.



a) b) c) d)

Figura 6.1. Textura de semiesferas bajo relieve: a) perspectiva de la pieza modelo; b) frontal de la pieza modelo; c) lateral de la pieza modelo; d) ampliación zona funcional.

La segunda textura, también descrita en detalle con anterioridad, tiene un diseño bioinspirado en las escamas de los tiburones (Figura 6.2). Este patrón tiene como función reproducir las propiedades hidrofóbicas presentes en la piel de este animal. El elemento generador de la textura, es decir la escama, se diseñó con algunas simplificaciones, pero tratando de reflejar el diseño real de la misma.

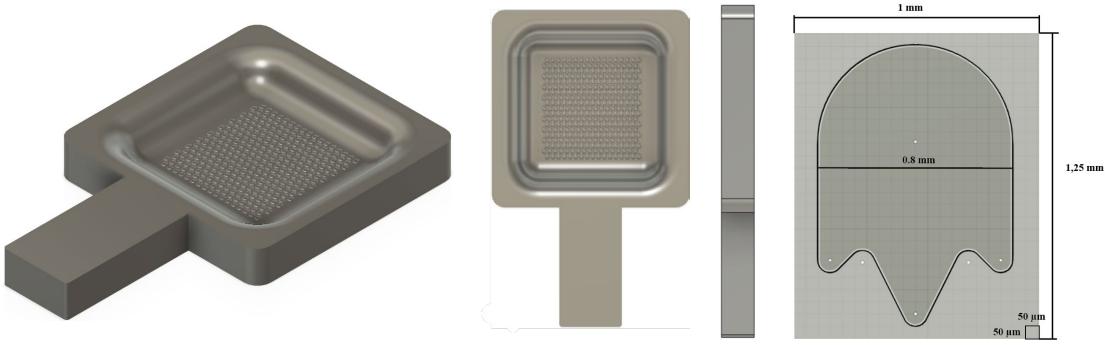


Figura 6.2. Textura de piel de tiburón: a) perspectiva de la pieza modelo; b) frontal de la pieza modelo; c) lateral de la pieza modelo; d) representación de la escama en cuadrilla de 50 x 50 micras.

Para cuantificar los errores acumulados, se definieron las dimensiones críticas a medir en cada textura (Figuras 6.3 y 6.4), y se establecieron mediciones en tres etapas clave: la pieza modelo impresa, la cáscara de cobre electroconformada, y la superficie erosionada final. En el caso de la medida **c** correspondiente al electrodo con microtextura de piel de tiburón, se seleccionó esta dirección por considerarse la más propensa a presentar variaciones respecto al valor nominal definido en el modelo CAD. Adicionalmente, la medición de la relación entre elementos se realizó tomando como referencia distintos extremos de la escama, con el fin de evitar errores asociados a la localización del centro geométrico, cuya identificación resulta más compleja que en el caso de las semiesferas, debido a la naturaleza irregular de su forma.

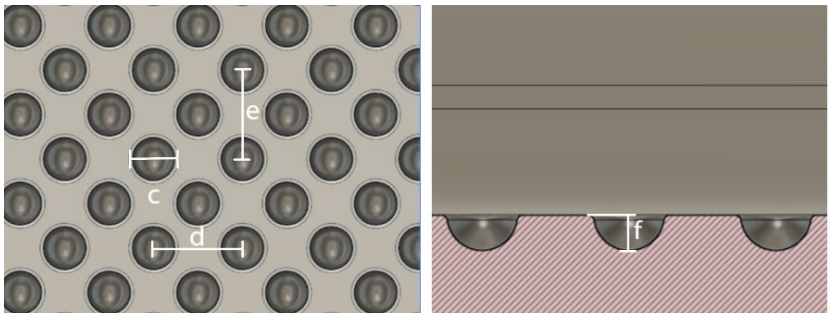


Figura 6.3. Electrodo con microtextura de semiesferas entrantes. Medidas a analizar.

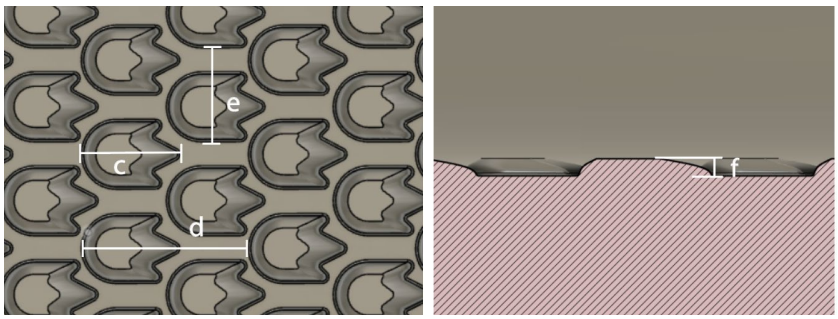
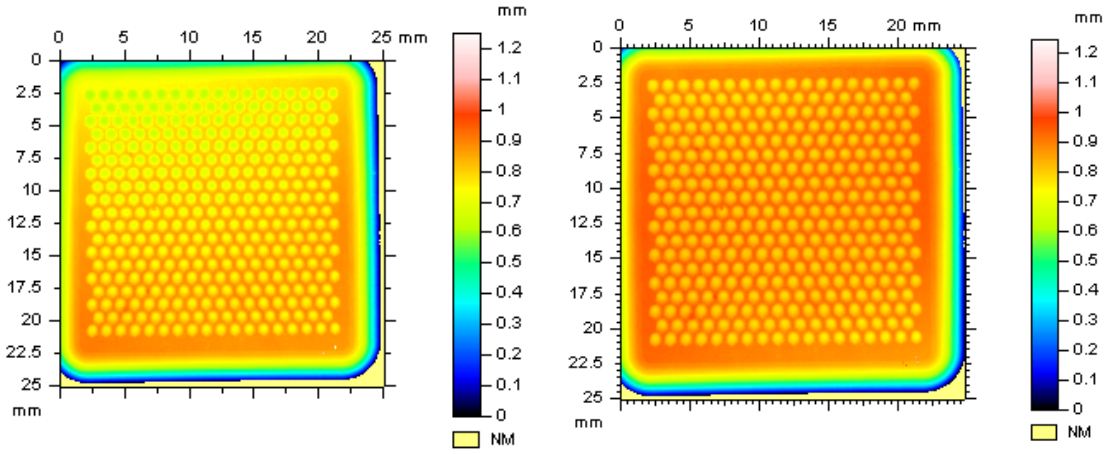


Figura 6.4. Electrodo con microtextura de piel de tiburón. Medidas a analizar.

Las mediciones se realizaron en la Universidad de Cádiz durante una estancia de investigación, utilizando equipamiento de alta precisión. Inicialmente, se utilizó un microscopio estereoscópico Leica S9 E para inspección visual de las piezas modelo y cáscaras electroconformadas. Posteriormente, se empleó el microscopio de enfoque variable Alicona InfiniteFocus G5+, con el que se obtuvieron nubes de puntos detalladas de cada textura. Para el análisis dimensional se utilizó el software especializado MountainsMap, permitiendo también estudios complementarios de forma y

rugosidad. En primer lugar, se aplica un proceso de nivelación de la superficie, con el fin de asegurar que las mediciones posteriores sean fiables al establecer una referencia adecuada, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 6.5.



a) b)

Figura 6 5. Rectificación de la superficie a estudiar: a) sin rectificar; b) rectificada.

Una vez acondicionada la superficie digital, se procede a realizar un estudio dimensional de los elementos generadores de la textura. En el caso concreto de la textura tipo "piel de tiburón", se analizaron parámetros clave como la longitud y anchura máxima de una escama (Figura 6.6), con el propósito de comparar estos valores con los establecidos en el diseño CAD y con los obtenidos en las diversas fases del proceso de generación de los electrodos microtexturizados.

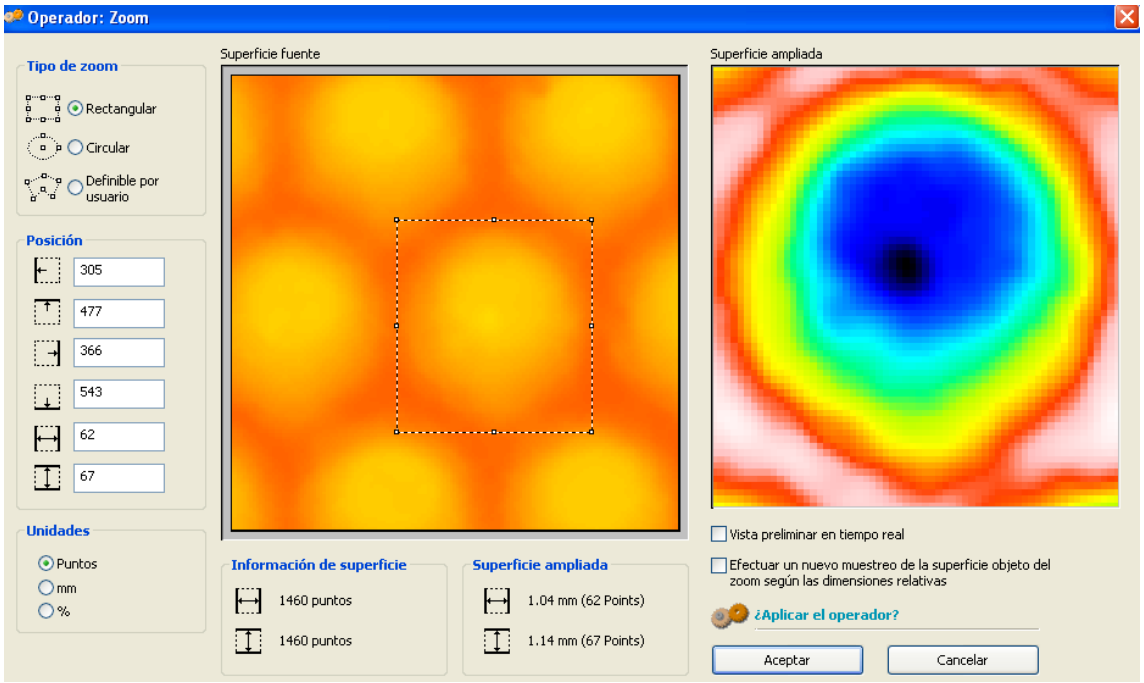
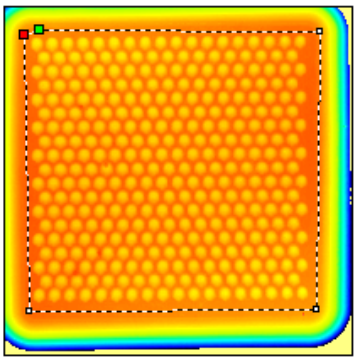


Figura 6 6. Toma de medidas de los elementos generadores de las texturas.

Dado que la profundidad de la textura es otro de los parámetros a analizar, se utilizó el módulo de análisis de picos y valles del software para cuantificarla. En el caso específico de la textura tipo "piel de tiburón", que corresponde a una geometría en relieve positivo sobre la pieza modelo, los valles observados por ejemplo en la cáscara representan el negativo funcional de dicha textura. Los

resultados muestran que las profundidades de valle obtenidas coinciden con gran precisión respecto al valor nominal de 0,150 mm, con un valor máximo de 0,157 mm, lo que supone una desviación de apenas 7 micras respecto al diseño original (Figura 6.7). Este nivel de fidelidad confirma el excelente comportamiento replicativo del proceso de electroconformado incluso en escalas micrométricas.

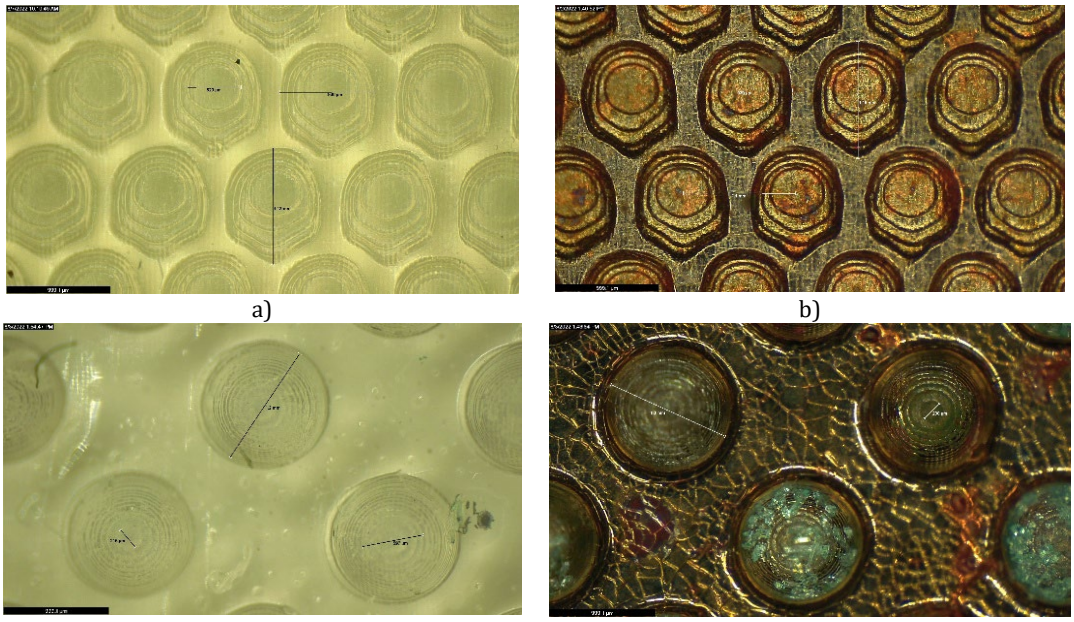


	Hueco	Pico
Superficie (mm2)	354	64
Volumen (mm³)	20.6	0.68
Max. profundidad/altura (mm)	0.157	0.0441
Media profundidad/altura (mm)	0.0582	0.0106

Figura 6.7. Estudio de picos y valles.

6.2.1.2. Resultados

Los primeros resultados se obtuvieron a partir de la inspección visual con el microscopio Leica S9 E (Figura 6.8), que permitió confirmar una alta fidelidad en la reproducción de las texturas en la cáscara electroconformada, con diferencias mínimas respecto a la pieza modelo. En algunos casos, las desviaciones estuvieron por debajo de 20 µm, incluso considerando factores como restos de resina o fibras atrapadas entre capas. Estos datos evidencian que el proceso de electroconformado no introduce errores significativos en la réplica de la geometría original [16]. Este equipo permitió el correcto análisis de ambas piezas, y aunque las piezas modelo eran de un material semitransparente que dificultaba el análisis, se pudo comprobar el nivel de replicabilidad del proceso de electroconformado, obteniendo solo unas pocas micras de diferencia entre ambas piezas.



a) b)

c) d)

Figura 6.8. Imágenes tomadas con el microscopio estereoscópico Leica S9 E: a) Textura piel de tiburón pieza modelo; b) Textura piel de tiburón cáscara; c) Textura semiesferas pieza modelo; d) Textura semiesferas cáscara; e) Textura flores pieza modelo; f) Textura flores cáscara.

Posteriormente, mediante el análisis de nubes de puntos generadas con el sistema Alicona (Figura 6.9), se caracterizaron cuantitativamente las dimensiones principales de ambas texturas.

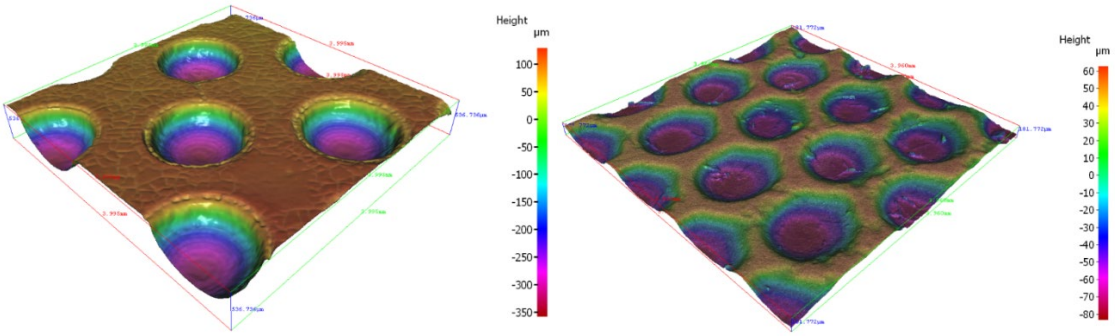


Figura 6.9. a) Diseño de la textura funcional compuesta por semiesferas; b) Diseño de la textura funcional bioinspirada en la piel de tiburón (estudio de la réplica de masilla).

Las Tablas 6.1 y 6.2 recogen los valores promedio de 10 mediciones por parámetro, así como sus desviaciones típicas. Los errores se presentan respecto al valor nominal definido en el modelo CAD. Estas mediciones se realizaron tomando medidas en puntos distribuidos a lo largo de la superficie texturizada. Aunque se trata de un procedimiento manual sujeto a la apreciación visual de la persona que realiza la medición, se observa que el valor más alto de la desviación típica es de 0.038 mm, inferior al tamaño del píxel del equipo MSLA.

Tabla 6.1. Caracterización metrológica del proceso de generación de texturas de semiesferas de bajo relieve.

Microtexturizado de semiesferas entrantes										
		FASE 1: Pieza modelo			FASE 2: Cáscara de cobre			FASE 3: Pieza erosionada		
D [mm]	CAD [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 2 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 3 [mm]
c	1.2	1.142	0.038	0.058	1.111	0.014	0.089	1.149	0.020	0.051
d	2.5	2.509	0.010	-0.009	2515	0.015	-0.015	2.518	0.009	-0.018
e	2.5	2.513	0.011	-0.013	2.515	0.012	-0.015	2.508	0.017	-0.008
f	0.6	0.401	0.014	0.199	0.458	0.021	0.142	0.443	0.004	0.157
D: Dimensión; Desv.: Desviación típica; $\bar{X}$.: promedio; Error 1 = CAD – $\bar{X}$ Pieza modelo; Error 2 = CAD – $\bar{X}$ Cáscara de cobre.; Error 3 = CAD – $\bar{X}$ Pieza erosionada.										

Tabla 6.2. Caracterización metrológica del proceso de generación de texturas de piel de tiburón.

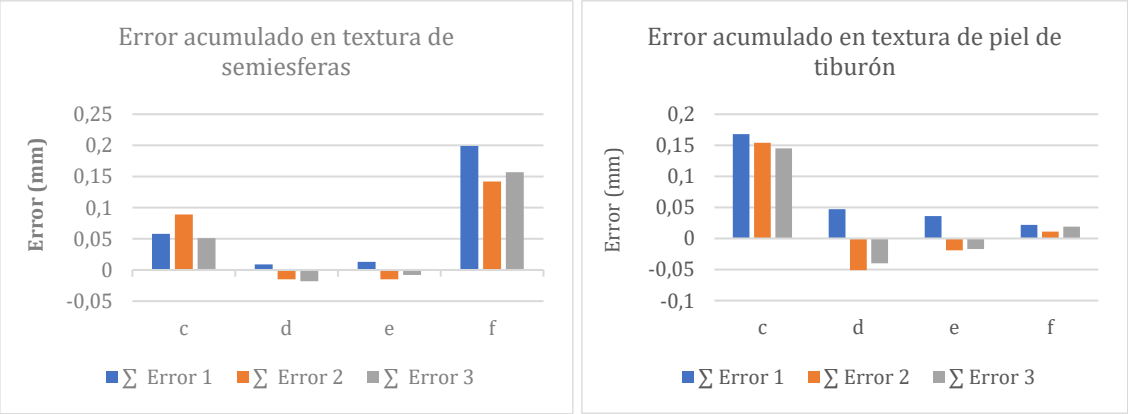
Microtexturizado de piel de tiburón										
		FASE 1: Pieza modelo			FASE 2: Cáscara de cobre			FASE 3: Pieza erosionada		
D [mm]	CAD [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 2 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 3 [mm]
c	1.21	1.042	0.031	0.168	1.056	0.029	0.154	1.065	0.032	0.145
d	2.00	2.047	0.021	-0.047	2.051	0.016	-0.051	2.040	0.014	-0.040
e	1.10	1.136	0.020	-0.036	1.119	0.037	-0.019	1.117	0.027	-0.017
f	0.15	0.128	0.005	0.022	0.139	0.005	0.011	0.131	0.004	0.019
D: Dimensión; Desv.: Desviación típica; $\bar{X}$.: promedio; Error 1 = CAD – $\bar{X}$ Pieza modelo; Error 2 = CAD – $\bar{X}$ Cáscara de cobre.; Error 3 = CAD – $\bar{X}$ Pieza erosionada.										

Del análisis se desprende que el mayor error acumulado se concentra en el parámetro «c», correspondiente a la forma principal de la textura (diámetro de semiesfera o longitud de escama), frente a los parámetros «d» y «e», que hacen referencia a la disposición relativa de los elementos en el plano XY. La textura de piel de tiburón muestra una mayor variabilidad en estos parámetros, lo cual se asocia a la mayor complejidad geométrica de su diseño frente a las semiesferas, que tienen una forma regular.

Respecto al parámetro «f», se observan mayores errores en la textura de semiesferas, ya que este se genera en bajo relieve, quedando afectado por atrapamiento de resina y sobreexposición en las primeras capas. En cambio, en la textura de escamas, este parámetro se genera en sobre relieve y en las capas superiores, permitiendo una evacuación más eficaz de la resina.

Estos resultados permiten concluir que la mayor fuente de error acumulado proviene de la etapa de fabricación aditiva mediante tecnología MSLA, tal y como se resume en la Figura 6.10. El equipo MSLA empleado en ese momento presenta limitaciones de resolución (50 µm/píxel), lo que provoca que geometrías pequeñas o complejas no se adapten perfectamente a la matriz de píxeles, generando distorsiones dimensionales durante el apilado de capas. Este efecto es especialmente notorio en diseños que no se ajustan de forma regular a la retícula digital del equipo.

A pesar de ello, el proceso de electroconformado demostró una excelente capacidad de replicabilidad, manteniendo con gran precisión las dimensiones originales de la pieza modelo. Esto sugiere que la mejora del proceso global podría enfocarse en optimizar la resolución y fidelidad geométrica de la impresión 3D, ya sea mediante el uso de resinas de mejores prestaciones o equipos con mayor densidad de píxeles.



a) b)

Figura 6.10. Errores acumulados**:** a) textura de semiesferas; b) textura de piel de tiburón.

Este análisis confirma que la combinación de fabricación aditiva de bajo coste y electroconformado permite obtener electrodos funcionales de alta precisión para SEDM. Si bien la mayor desviación dimensional se concentra en la etapa de impresión MSLA, se han podido cuantificar y caracterizar los errores asociados, lo que permitirá su consideración en futuros diseños para mejorar la fidelidad geométrica del patrón final. Se propone como vía de mejora el uso de tecnologías aditivas de mayor resolución para la fabricación de las piezas modelo, a fin de reducir el error acumulado sin comprometer la viabilidad económica del proceso.

6.2.2. Evaluación de la mejora en el proceso MSLA

Tras evidenciar en el primer estudio que la mayor acumulación de error dimensional se produce en la primera fase del proceso, la generación de las piezas modelo mediante MSLA, se planteó como objetivo la mejora de esta etapa crítica. En concreto, se planteó mejorar las prestaciones del equipo MSLA y prestar más atención al postprocesado de las piezas modelo, prestando especial atención a la fase de limpieza, por su posible impacto en la fidelidad de las microtexturas generadas.

Como primer paso, se incorporó una nueva impresora de estereolitografía, la Phrozen Mini 8K, que, en combinación con resinas del mismo fabricante, permitió aprovechar la capacidad de resolución máxima de este nuevo equipo (descrita en detalle en el Capítulo III). Una vez superada la etapa de impresión con esta nueva máquina, se identificó la limpieza como una potencial fuente de variabilidad en los resultados. Y es que durante la investigación surgió la siguiente pregunta:

"¿Podría la aplicación de diferentes técnicas de limpieza mejorar la fidelidad de las microtexturas generadas mediante estereolitografía?"

Aunque la hipótesis parecía tener una respuesta intuitiva, se realizó una revisión bibliográfica que confirmó la relevancia del proceso de limpieza en estereolitografía, especialmente para asegurar el correcto funcionamiento de microestructuras complejas y minimizar la rugosidad superficial. Aunque no se encontró bibliografía específica enfocada en piezas con texturas complejas, diversos estudios destacan que la etapa de limpieza desempeña un papel fundamental en los procesos de estereolitografía, ya que incide directamente en la calidad y funcionalidad de las piezas obtenidas. Se ha observado que una adecuada limpieza posterior a la impresión mejora significativamente el rendimiento funcional de las microestructuras fabricadas por esta tecnología [380]. Además, se ha comprobado que una correcta gestión de parámetros como la distribución de capas, el perfil de curado y los efectos residuales del mismo permite reducir la rugosidad superficial, lo cual refuerza la importancia de implementar procesos de limpieza eficientes para alcanzar los estándares deseados de acabado superficial [381]. Por tanto, este segundo estudio se centró en analizar el efecto de distintos protocolos de limpieza sobre la calidad dimensional de las piezas modelo texturizadas.

6.2.2.1. Metodología y equipamiento

Para evaluar la influencia del postprocesado, se diseñó un experimento comparativo entre distintos protocolos de limpieza. Se fabricaron piezas modelo texturizadas con dos resoluciones distintas: una primera serie con altura de capa de 50 µm, con el fin de comparar directamente con los resultados obtenidos en el estudio anterior, y una segunda serie con altura de capa de 25 µm, para evaluar el potencial de mejora derivado de la nueva impresora MSLA.

Posteriormente, se sometieron las piezas a distintos procedimientos de limpieza, cuyos pasos se describen en la Tabla 6.3. En cada caso se evaluó el efecto del método empleado sobre la precisión dimensional de las texturas generadas.

Tabla 6.3. Protocolos de limpieza empleados en el estudio.

Etapas	1	2	3	4	5
Protocolos	**Separación previa de la pieza modelo**	**Limpieza con alcohol isopropílico**	**Limpieza ultrasónica**	**Secado**	**Curado**
Limpieza manual original (LMO)	Sí	Pulverización manual	No	Aire a presión	2 min
Limpieza manual (LM)	Sí	Pulverización manual	No	Secado automático en estación	2 min
Limpieza asistida (LA)	No, se mantiene en la plataforma	2 min en estación de lavado	Si	Aire a presión	2 min

Se establecieron tres protocolos de limpieza.

- **Limpieza manual original:** Consiste en una primera pulverización de alcohol isopropílico sobre la superficie de las piezas recién salidas del equipo MSLA hasta que no se observan restos de resina sobre las superficies texturizadas. A continuación, se aplica aire comprimido para intentar quitar pequeños restos de resina adheridas a la superficie y también para

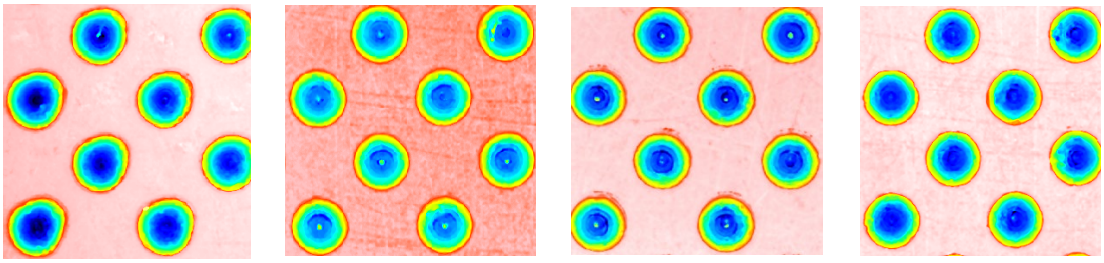
realizar un secado de las mismas. Finalmente se volvía a pulverizar alcohol para terminar de arrastrar los últimos restos de resina.

- **Limpieza manual:** es igual que el protocolo de limpieza anterior, pero en vez de usar airea a presión se emplea el secado automático de la estación de secado y curado.
- **Limpieza asistida:** Consiste en meter la plataforma de construcción, con las piezas todavía adheridas a la misma, dentro del depósito con alcohol isopropílico en la estación de limpieza. Activar la agitación por vórtice durante 2 minutos para que la acción de centrifugado consiga eliminar la mayor cantidad de resina posible. Luego, se separa la pieza modelo de la plataforma y se introduce en el equipo de limpieza ultrasónica, aplicando dos ciclos de cinco minutos cada uno, para intentar eliminar la resina restante. Finalmente, la pieza se seca con aire comprimido.

Una vez finalizados los procesos de limpieza y curado, las piezas fueron enviadas a la Universidad de Cádiz, donde se realizaron barridos ópticos utilizando el sistema Alicona InfiniteFocus G5+. Las nubes de puntos obtenidas fueron analizadas mediante el software especializado MountainsMap, permitiendo la caracterización metrológica precisa de cada textura. Se utilizaron los mismos parámetros de análisis definidos en el estudio anterior, lo que garantiza la comparabilidad directa entre ambos experimentos.
En la textura de semiesferas, se introdujo una variación adicional: se diseñó en bajo relieve para estudiar también el efecto de la morfología del relieve (positivo o negativo) en la calidad geométrica obtenida. En estos casos, la dimensión vertical se midió como hueco (valle) en lugar de pico (cima), utilizando la función de análisis de picos/valles del software.

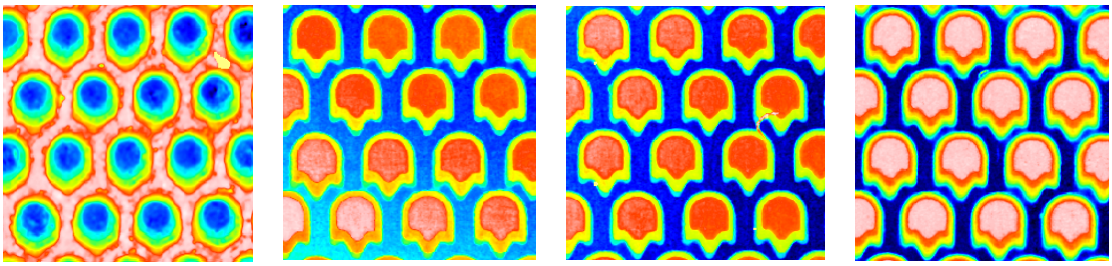
6.2.2.2. Resultados

El empleo de una altura de capa de 25 µm en combinación con un proceso de limpieza más riguroso ha permitido obtener piezas modelo con una notable mejora en la resolución de las texturas generadas. Esta mejora se observa tanto visualmente (Figuras 6.11 y 6.12) como en los resultados numéricos de las caracterizaciones metrológicas.



a) LMO_50 b) LM_50 c) LA_50 d) LA_25

Figura 6.11. Resolución de la textura de semiesferas en función del protocolo de limpieza, altura de capa y resolución de equipo.



a) LMO_50 b) LM_50 c) LA_50 d) LA_25

Figura 6.12. Resolución de la textura de piel de tiburón en función del protocolo de limpieza, altura de capa y resolución de equipo.

Los resultados muestran claramente que la limpieza asistida (LA) proporciona una fidelidad geométrica mucho más alta en comparación con la limpieza manual, tanto en piezas fabricadas con altura de capa de 50 µm como de 25 µm. En concreto, la combinación LA_25 representa el escenario más favorable.

Los datos extraídos del software MountainsMap (Tablas 6.4 y 6.5) muestran los resultados del proceso de medición de los parámetros que definen las texturas, "a", "b", "c" y "d". Se tomaron al igual que en el estudio previo 10 mediciones. Para los tres primeros valores se acota la medida dentro de un recuadro y para el valor "d" se emplea el estudio de picos/valles presentes en el software.

Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la precisión dimensional de las texturas analizadas tras la aplicación de distintos protocolos de limpieza. En el caso de la textura de semiesferas en bajo relieve, no se observaron diferencias destacables al comparar los procedimientos de limpieza manual (LMO y LM). Sin embargo, la implementación del protocolo de limpieza asistida (LA) resultó en una mejora notable de la fidelidad geométrica, lo que pone de manifiesto la importancia de un postprocesado más controlado y eficaz.

En contraste, para la textura biomimética en sobre relieve (piel de tiburón), se registró una disminución generalizada del error en todas las condiciones de la Fase 2 en comparación con las obtenidas en la Fase 1. Esta mejora puede atribuirse a la mayor facilidad de evacuación de resina durante el curado, propia de las geometrías en sobre relieve, en las que las zonas de acumulación de material no polimerizado son menos propensas a formarse.

Tabla 6.4. Caracterización metrológica del proceso de limpieza de la textura de la semiesfera de bajo relieve.

Microtexturizado de semiesferas salientes													
D	**CAD**	**LMO_50**			**LM_50**			**LA_50**			**LA_25**		
		$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]
a	**1.200**	1.142	0.038	0.058	1.136	0.016	0.064	1.163	0.015	0.037	1.170	0.016	0.030
b	**2.500**	2.509	0.010	0.009	2.518	0.022	0.018	2.501	0.003	0.001	2.503	0.005	0.003
c	**2.500**	2.513	0.011	0.013	2.512	0.020	0.012	2.506	0.005	0.006	2.506	0.005	0.006
d	**0.600**	0.401	0.014	0.199	0.468	0.016	0.132	0.601	0.003	0001	0.586	0.008	0.014
D: Dimensión; Desv.: Desviación típica; $\bar{X}$.: promedio; Error 1 = CAD – $\bar{X}$ LMO_50; Error 2 = CAD – $\bar{X}$ LM_50.; Error 3 = CAD – $\bar{X}$ LA_50 Error 4 = CAD – LA_25)													

Tabla 6.5. Caracterización metrológica del proceso de limpieza de la textura de piel de tiburón.

Microtexturizado de piel de tiburón													
D	**CAD**	**LMO_50**			**LM_50**			**LA_50**			**LA_25**		
		$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 1 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 2 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 3 [mm]	$\bar{X}$ [mm]	Desv. [mm]	Error 4 [mm]
a	**1.160**	1.042	0031	0.168	1.151	0.017	0.009	1.154	0.008	0.006	1.164	0.010	0.004
b	**2.060**	2.047	0.021	0.047	2.064	0.024	0004	2.064	0.010	0.004	2.058	0.010	0.002
c	**1.100**	1.136	0.020	0.036	1.100	0.006	0.000	1.100	0.000	0.000	1.100	0.000	0.000
d	**0.150**	0.128	0.005	0.022	0.141	0.007	0.009	0.153	0.002	0.003	0.149	0.004	0.001
D: Dimensión; Desv.: Desviación típica; $\bar{X}$.: promedio; Error 1 = CAD – $\bar{X}$ LMO_50; Error 2 = CAD – $\bar{X}$ LM_50.; Error 3 = CAD – $\bar{X}$ LA_50 Error 4 = CAD – LA_25													

A pesar de las mejoras generales, en la textura de semiesferas bajo relieve persiste un error relativamente elevado en la dimensión “f” (profundidad del elemento), incluso cuando se utiliza la altura de capa de 25 µm con limpieza asistida. Aunque el valor se reduce respecto a los protocolos manuales, se mantiene cercano a los 15 µm. Esta limitación podría estar relacionada con la morfología curva de la textura, que dificulta la identificación precisa de los puntos de medición. En

estos casos, los algoritmos de detección de bordes pueden no ser del todo eficaces al tratar superficies altamente curvadas, generando así un incremento en la incertidumbre dimensional.

Una situación análoga, aunque menos pronunciada, se presenta en la dimensión "a", correspondiente al diámetro de las semiesferas. Aquí, los errores en las condiciones LA_50 y LA_25 son aproximadamente la mitad de los registrados bajo limpieza manual, lo cual refuerza la hipótesis anterior. Las curvaturas prolongadas podrían complicar la determinación exacta del contorno, afectando la calidad de los datos extraídos.

En el caso de la textura de piel de tiburón, el uso del nuevo equipo de impresión junto con métodos de limpieza más rigurosos permitió reducir los errores a niveles mínimos. Las diferencias respecto al modelo CAD fueron, en muchos casos, inferiores a 4 µm, lo que indica una altísima precisión en la reproducción geométrica.

De manera global, se ha constatado una mejora muy significativa en la resolución y la precisión de las texturas generadas. En el caso de la textura de semiesferas, la dimensión "a" presentó una reducción del error medio del 48,3 %, pasando de 0,058 mm en la Fase 1 (MC_50_original) a 0,030 mm en la Fase 2 (AC_25). La mejora más pronunciada se observó en la dimensión "d" (profundidad), con una disminución del error del 92,9 %, reduciéndose de 0,199 mm a tan solo 0,014 mm.

Por su parte, la textura de piel de tiburón mostró resultados aún más favorables. En la dimensión "a", el error pasó de 0,168 mm en la Fase 1 a tan solo 0,004 mm en la Fase 2, lo que representa una mejora del 97,6 %. En la dimensión "d", se logró una reducción del 95,5 %, descendiendo de 0,022 mm a apenas 0,001 mm.

Los resultados obtenidos confirman que tanto la resolución de impresión como el protocolo de limpieza post-impresión tienen un efecto determinante sobre la calidad geométrica de las piezas modelo generadas por estereolitografía. En particular:

- La implementación de equipos de mayor resolución (25 µm de altura de capa) y el uso de limpieza asistida con lavado automático y ultrasonidos permiten alcanzar niveles de fidelidad dimensional significativamente superiores.
- Se logra una reducción generalizada del error medio en todos los parámetros analizados, especialmente en geometrías complejas y en dimensiones críticas para la replicabilidad.
- La combinación de impresora de alta resolución y limpieza asistida permite establecer un nuevo estándar de fabricación para piezas modelo microtexturizadas, reduciendo al mínimo la propagación de errores en fases posteriores como el electroformado o la electroerosión.

Este estudio demuestra la necesidad de establecer protocolos rigurosos de postprocesado cuando se pretende alcanzar alta precisión en la generación de microtexturas, y proporciona una base técnica sólida para optimizar la primera fase del proceso de fabricación de electrodos SEDM.

6.2.3. Inspección visual de las cáscaras obtenidas

La inspección visual de las cáscaras obtenidas constituye una etapa clave dentro del proceso de validación, ya que permite detectar de forma temprana posibles defectos o irregularidades derivados del proceso de electroconformado. Por esta razón, en el capítulo anterior se analizó detalladamente la influencia de los parámetros de deposición con el objetivo de obtener cáscaras con un espesor homogéneo y una integridad dimensional adecuada, condiciones esenciales para garantizar su posterior funcionalidad como herramienta en procesos SEDM.

En el presente apartado se describen los diferentes procedimientos de análisis aplicados a las cáscaras desde el momento en que son generadas, incluyendo tanto las observaciones realizadas con la cáscara aún adherida a la pieza modelo como aquellas posteriores a su extracción, una vez preparada para su utilización como electrodo funcional.

6.2.3.1. Inspección de la cáscara adherida a la pieza modelo

Una vez finalizado el programa de electroconformado, se procede a extraer el conjunto del cátodo modelo con el fin de evaluar preliminarmente la calidad del recubrimiento de cobre. Para ello, se realiza una inspección visual indirecta mediante retroiluminación, colocando una fuente de luz en la parte posterior de la pieza modelo. Este procedimiento es aplicable únicamente cuando la pieza modelo ha sido fabricada con resina transparente o translúcida, lo que permite observar la uniformidad del depósito metálico sin necesidad de desmontar la cáscara.

En caso de utilizar resinas opacas, esta inspección debe realizarse posteriormente, una vez separada la cáscara de la pieza modelo. La utilidad principal de esta primera evaluación es detectar zonas donde no se ha completado la deposición o fallos de adherencia, los cuales podrían provocar que parte de la textura funcional permanezca adherida a la pieza modelo durante la extracción, comprometiendo así la replicabilidad y calidad de la cáscara. Cuando esto ocurre, el análisis de la cáscara ya extraída podría mostrar defectos que no reflejan fielmente el desempeño del proceso de electroconformado, sino las consecuencias de una cáscara defectuosa o una separación deficiente de la pieza modelo.

Este tipo de inspección temprana resulta especialmente valiosa para anticipar problemas relacionados con el llenado incompleto de las microcavidades texturizadas o con la presencia de discontinuidades superficiales. En la Figura 6.13 se presentan ejemplos representativos de esta evaluación preliminar, que permiten valorar visualmente la uniformidad y cobertura del depósito metálico antes de proceder con la separación de la cáscara.

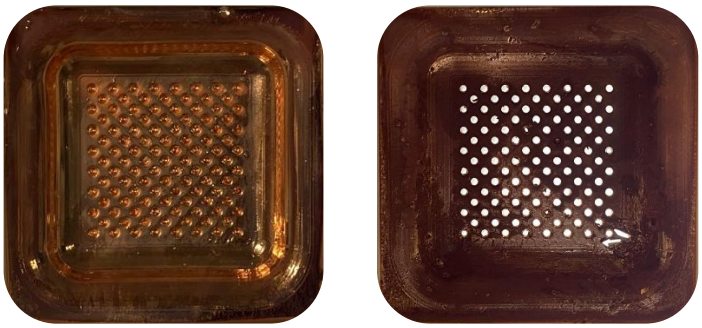


Figura 6.13. Visualización de la calidad de la deposición de sobre sobre la pieza modelo.

6.2.3.2. Inspección de la cáscara desmontada

Una vez evaluada la fidelidad de replicación del recubrimiento de cobre mediante una inspección visual preliminar, se procede a desmontar cuidadosamente la cáscara de la pieza modelo para realizar una caracterización más detallada de su morfología y calidad. Esta fase resulta crítica, ya que permite identificar con mayor precisión los defectos superficiales y evaluar si las geometrías texturizadas se han replicado de forma fiel respecto al diseño original, tanto desde el punto de vista geométrico como funcional.

En una primera etapa, se realiza una inspección visual utilizando el microscopio Mitutoyo TM-1005B, el cual permite observar con mayor detalle aquellas imperfecciones que podrían no ser perceptibles a simple vista. Este equipo resulta útil para corroborar visualmente la presencia de defectos tales como poros, zonas con deposición irregular o posibles fracturas superficiales. La Figura 6.14 recoge algunos ejemplos representativos de este tipo de observaciones en distintas cáscaras obtenidas.

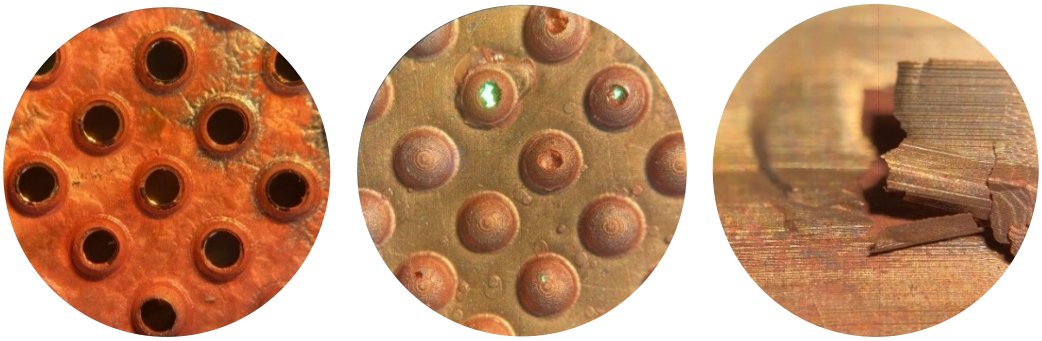


Figura 6.14. Inspección visual de diferentes defectos en las cáscaras de cobre.

No obstante, para avanzar hacia un análisis metrológico más completo, se recurre al uso de microscopios ópticos con capacidad de medición. En particular, se emplean el microscopio estéreo Leica S9 E y el microscopio de fluorescencia Olympus BX51 equipado con una cámara digital DP72. Estos instrumentos permiten realizar mediciones precisas sobre zonas seleccionadas de la superficie texturizada, verificando si las dimensiones replicadas en la cáscara corresponden a las establecidas en el modelo CAD original. Las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17 muestran diversas capturas obtenidas a partir de este análisis sobre cáscaras con texturas complejas, que ilustran la precisión alcanzada en la replicación geométrica.



Figura 6.15. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio.



Figura 6.16. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio 2.

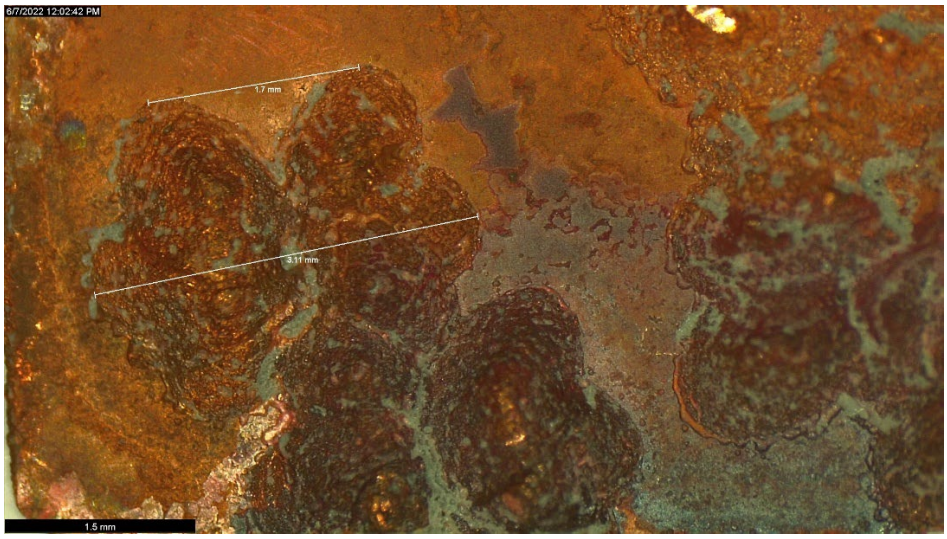


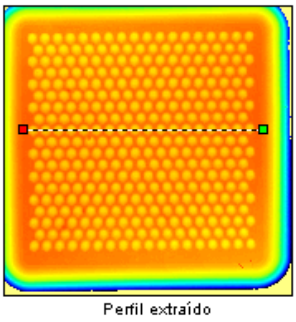
Figura 6.17. Inspección visual con toma de medidas de cáscara electroconformada con diseño aleatorio 3.

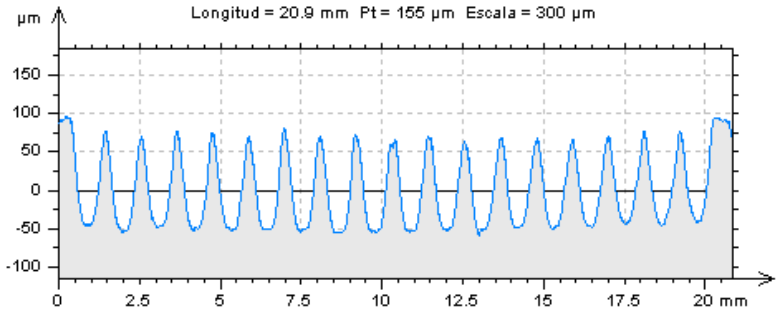
Cabe señalar que este tipo de mediciones con microscopía óptica puede estar condicionado por la correcta identificación de los puntos de interés y la subjetividad del usuario en la selección de zonas de medición, especialmente en geometrías con relieve complejo. Con el objetivo de reducir la incertidumbre asociada a estas limitaciones, se complementó el análisis con el uso del equipo InfiniteFocus G5+ de Alicona. Esta caracterización se realizó durante una estancia de investigación en la Universidad de Cádiz y facilitó la generación de modelos digitales tridimensionales de las superficies texturizadas, como se ilustra en la Figura 6.18.



Figura 6.18. Toma de puntos de cáscara montada sobre portaerramientas.

Para el estudio concreto de las cáscaras se siguió la misma metodología que la mencionada previamente para el estudio de error acumulado. Además, para el análisis de las cáscaras, se pueden añadir otros estudios complementarios. Una de las funcionalidades más relevantes de MountainsMap es la posibilidad de generar perfiles transversales automáticos sobre las geometrías texturizadas. Esto permite extraer curvas de sección que no solo permiten visualizar la forma de los elementos generadores, sino que también permiten calcular parámetros de rugosidad como el valor Ra, proporcionando así una visión complementaria de la calidad superficial alcanzada (Figura 6.19).





ISO 4287		
Parámetros de amplitud – F		
Rp	29.7	µm
Rv	15.5	µm
Rz	45.2	µm
Rc	47.9	µm
Rt	55.8	µm
Ra	13	µm
Rq	15.1	µm
Rsk	0.929	
Rku	2.55	

ISO 4287			
Parámetros de espacio - Perfil rugosidad			
RSm	1.11	mm	*Filtro gausiano, 0.8 mm*
Rdq	7.2	°	*Filtro gausiano, 0.8 mm*
Parámetros de pico – Perfil de rugosidad			
RPc	0.899	1/mm	*+/-0.5 µm, Filtro gausiano, 0.8 mm*
Parámetros de relación de material - Perfil primario			
Pmr	0.974	%	*c = 1 µm bajo el pico máximo*
Pmr	2.15	%	*c = 3 µm bajo el pico máximo*
Pdc	103	µm	*c = 20%, q =80%*
Pdc	147	µm	*c = 2%, q =98%*

Figura 6.19. Extracción del perfil de la textura estudiada.

Este análisis integral, basado en técnicas de microscopía 3D y tratamiento digital de superficies, permite no solo confirmar la replicación dimensional del proceso de electroconformado, sino también valorar su capacidad para transferir fielmente la rugosidad superficial de la pieza modelo. Dado que el material utilizado para fabricar las piezas modelo (resina fotosensible) presenta limitaciones para ser caracterizado con un rugosímetro convencional debido a su baja dureza, el uso de la cáscara como negativo funcional permite estudiar indirectamente la textura de la superficie original. En consecuencia, esta metodología no solo verifica la calidad de las cáscaras, sino que ofrece una herramienta poderosa para evaluar con precisión las superficies microestructuradas generadas en las piezas modelo.

6.2.4. Electroerosión de las texturas estudiadas

Para llevar a cabo el estudio de electroerosión, primero se revisaron algunos ejemplos de la literatura que pudieran dar algunas ideas sobre qué tipo de parámetros se podrían implementar. A parte de las investigaciones estudiadas en el Capítulo II, se analizaron otras realizadas dentro de la propia ULPGC. Dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica, se han desarrollado investigaciones previas relacionadas con el uso de tecnología de SEDM para la fabricación y evaluación de electrodos mediante procesos de fabricación aditiva. Entre estos trabajos, destaca el estudio publicado por Bordón et al. [382], en el que se evaluaron diferentes estrategias de mecanizado sobre piezas de aluminio utilizando electrodos de cobre convencionales y fabricados mediante tecnología de difusión atómica. Los análisis realizados incluyeron el estudio de la rugosidad superficial (empleando el rugosímetro Mitutoyo SJ-201P empleado en esta investigación), los parámetros VDI, la tasa de desgaste del electrodo (TWR) y la tasa de arranque de material (MRR), empleando el mismo equipo de electroerosión ONA DB300 utilizado en el presente trabajo.

Así mismo, Monzón et al. [383], también pertenecientes a la Universidad de las Palmas llevaron a cabo una comparación más detallada, empleando tablas comerciales de fabricantes de máquinas EDM para evaluar el comportamiento de los electrodos electroconformados frente a los convencionales.

Para este análisis, se diseñó un modelo de prueba con una geometría simple: un paralelepípedo de 25 mm x 50 mm x 10 mm (Figura 6.20), con la intención de facilitar el estudio desde un punto de vista dimensional y evaluar el comportamiento de los electrodos electroconformados en geometrías críticas para la deposición, como esquinas de 90° o bordes afilados, donde la uniformidad del grosor y la resistencia a la fractura pueden ser problemáticas [383].



Figura 6.20. Geometría del electrodo electroconformado. Obtenido de [383].

Los resultados indicaron que, en valores bajos de VDI, el acabado superficial de los electrodos electroconformados es superior, mientras que en valores altos la calidad disminuye. En particular, dentro del rango VDI industrial (22-24), el rendimiento de los electrodos electroconformados fue similar al de los electrodos de cobre convencionales, validando así su aplicación para usos industriales. En condiciones más exigentes (VDI 27), se realizaron pruebas incrementando el tiempo de pulso activado y la corriente de intensidad (A), con el fin de evaluar cómo estas variables afectaban la rugosidad superficial.

Estos resultados validan la viabilidad de los electrodos electroconformados en aplicaciones industriales cuando se eligen adecuadamente los parámetros de operación, especialmente en operaciones de acabado donde pueden ofrecer un rendimiento similar al de los electrodos convencionales a un costo significativamente menor. Además, estos estudios han servido de referencia tanto metodológica como técnica para complementar y contrastar los resultados obtenidos en esta investigación. Por este motivo a continuación se describen los diferentes ensayos que se realizaron durante esta investigación.

6.2.4.1. Refuerzo de cáscaras e incorporación al portaelectrodos

Las cáscaras obtenidas en este trabajo de investigación presentan un espesor medio en torno a los 200 µm, valor suficiente para resistir los efectos del desgaste durante la erosión por penetración. Sin embargo, esta delgadez estructural supone una limitación importante en términos de rigidez y estabilidad, especialmente durante las fases de manipulación, acoplamiento y uso como herramienta activa. Por este motivo, se estableció como necesaria la incorporación de un refuerzo estructural en la cara no funcional de las cáscaras, con el fin de garantizar su integridad dimensional y planitud durante el mecanizado.

Para llevar a cabo este refuerzo, se seleccionó una masilla epóxica comercial compuesta por dos componentes. Esta masilla permite una aplicación controlada y rápida, ya que su tiempo de manipulación es de 10 minutos y el curado completo se alcanza tras aproximadamente una hora a temperatura ambiente. Su presentación en forma de pasta permite una distribución homogénea sobre la cáscara sin alterar su morfología superficial.

Durante el procedimiento, se empleó un protector reutilizable que actuó como molde auxiliar (Figura 6.21), asegurando un espesor constante de la masilla y evitando excedentes dimensionales. La mezcla homogénea de ambos componentes se aplicó directamente sobre la superficie posterior de la cáscara, ejerciendo una presión controlada mediante el uso del molde.



Figura 6.21. Refuerzo de las electroformas con el uso de masilla epóxica.

Una vez aplicada la masilla sobre el protector se dejó un tiempo de curado inicial de 30 minutos. Este intervalo permitió obtener la rigidez necesaria para proceder al desmoldeo de la cáscara sin comprometer su integridad estructural ni su precisión dimensional. Tras ello se dejó otros 30 minutos, obteniendo una pieza reforzada y lista para su incorporación en el sistema de sujeción específico del portaelectrodos (Figura 6.22).



Figura 6.22. Procedimiento de relleno y colocación de la cáscara como herramienta SEDM.

Como las cáscaras empleadas para la electroerosión fueron objeto de procesos de medición del espesor, hubo que retirar la cáscara de la pieza modelo antes de aplicar el refuerzo en la parte posterior. Aunque esta manipulación se realizó de forma muy cuidadosa, dada la naturaleza de pieza con poco espesor, el riesgo de provocar pequeñas deformaciones existe, por lo que se consideró conveniente hacer un control metrológico de su ensamblaje en el portaelectrodos. Para evaluar estas desviaciones geométricas se empleó la máquina de medición por coordenadas Mitutoyo Crysta-Plus M443, disponible en el Servicio de Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. En la Figura 6.23 se observa el procedimiento llevado a cabo por el técnico servicio, en el cual se registraron los datos del plano de referencia del portaelectrodos, y el plano formado por el contorno exterior de la zona texturizada, para evaluar las desviaciones angulares entre ellos.



a) b)

Figura 6.23. Toma de referencias para el estudio del error de ángulo entre planos: a) colocación del porta con la cáscara; b) toma de medidas con el palpador de rubí.

Este procedimiento permitió determinar los ángulos resultantes entre planos, identificando posibles desviaciones que podrían comprometer el paralelismo necesario para un mecanizado preciso. En función de los resultados obtenidos, fue posible realizar ajustes finos en la colocación de la cáscara, garantizando así una mejor alineación que minimice los errores de inclinación durante el proceso de mecanizado por descarga eléctrica y mejore la uniformidad de la textura reproducida en la pieza erosionada. Las Tablas 6.6 y 6.7 presentan los resultados obtenidos en este proceso de medición.

Tabla 6.6. Valores de los diferentes planos a relacionar.

Electrodo	Plano	X	Y	Z	α	β	γ	L	d	n
EMT_SE_BR_1	Porta	0	0	0,001	90:00:03	90:00:10	0:00:10	0,001	0.0147	8
	Textura	0	0.005	3,108	89:59:58	89:55:00	0:05:00	3,108	0.0529	25
EMT_TIB_1	Porta	0	0	0,005	89:59:47	90:00:00	0:00:13	0,005	0.0145	8
	Textura	-0.004	0.007	3,145	90:04:11	89:51:52	0:09:08	3,145	0.1135	25
EMT_SE_SR_2	Porta	0	0	-0,001	89:59:49	90:00:14	0:00:18	0,001	0.0096	8
	Textura	-0.006	-0.008	3,397	90:05:49	90:08:22	0:10:12	3,397	0.1503	25

Tabla 6.7. Valor de error entre planos.

Electrodo	XY	YZ	ZX	Ángulo espacial (º)
EMT_SE_BR_1	165:00:39	0:05:10	0:00:05	0:05:10
EMT_TIB_1	116:48:18	0:08:08	0:04:24	0:09:14
EMT_SE_SR_1	72:07:10	0:08:08	0:06:00	0:10:07

En la Tabla 6.6 se muestran los ángulos de orientación de los dos planos en los ejes principales, y con esta información se calcula el ángulo espacial máximo entre los dos plantos que se muestra en la Tabla 6.7 para los tres electrodos medidos. El ángulo mayor corresponde al electrodo con la textura de piel de tiburón y tiene un valor de 10 minutos y 7 segundos. Esta desviación angular máxima implica que, si se orientase en la dirección más desfavorable, que sería la dirección diagonal de la superficie texturizada con una dimensión de 25 mm, la desviación máxima sería aproximadamente de 0,073 mm. Este valor, aunque bajo, puede generar desviaciones significativas en alguna zona de la superficie microtexturizada.

El refuerzo de las cáscaras electroconformadas mediante masilla epóxica no solo proporciona la resistencia necesaria para su manipulación y uso en SEDM, sino que también contribuye de forma significativa a mantener la alineación entre planos funcionales. Los resultados obtenidos demuestran que, incluso con refuerzo, pueden aparecer errores angulares relevantes si no se controla el proceso de curado y montaje. Es por ello que se recomienda realizar el refuerzo antes del desmontaje de la pieza modelo, para conservar la geometría original y evitar deformaciones indeseadas que puedan afectar al rendimiento del electrodo.

Este estudio evidencia la necesidad de aplicar procedimientos estandarizados de refuerzo y verificación angular como parte de la trazabilidad metrológica en la fabricación de herramientas para microtexturización por SEDM, garantizando así una mayor eficiencia, precisión y fiabilidad en la transferencia de textura al componente final.

6.2.4.2. Ensayos con electrodos iniciales

Con las primeras electroformas obtenidas al inicio de la Tesis, se realizaron algunas pruebas para observar el comportamiento que tendrían las mismas si se usaban como herramientas para el proceso de electroerosión, durante la estancia de investigación realizada en la UCA.

A diferencia de los electrodos tradicionales de cobre macizo, los electrodos evaluados presentan una configuración en "cáscara" de espesor reducido, lo que implica una menor masa y baja rigidez.

6.2.4.2.1. Metodología y equipamiento

Durante las diferentes pruebas que se realizaron para estudiar el efecto de la intensidad en el rendimiento de las cáscaras de cobre, se emplearon diversos VDI ya caracterizados previamente por el Grupo de Investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la UCA, para la realización de pruebas durante el desarrollo del proyecto "TEXTURE" que dio origen a esta Tesis. Esto era debido a que no se sabían aún que parámetros podrían ser más adecuados cuando se trabajaba con cáscaras de poco espesor como las realizadas hasta el momento. En la Tabla 6.8 se pueden ver los parámetros asociados a las diferentes VDI empleadas.

Tabla 6.8. Parámetros para el proceso de SEDM.

Parámetros	VDI 12	VDI 20	VDI 22	VDI 25	VDI 27	VDI 31	VDI 33
Intensidad media (A)	1.0	1.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
Tiempo de pulso (µs)	3.2	3.2	6.4	13.0	13.0	50.0	100.0
Tiempo de pausa (µs)	6.4	6.4	12.0	6.4	6.4	13.0	25.00
Tiempo de retroceso (s)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Tiempo de trabajo (s)	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	0.50
Compensación	0	0.048	0.060	0.075	0.090	0.135	0.180

Dentro de los diferentes tipos de electrodos generados hasta la fecha, se quisieron ensayar diferentes tipologías de los mismos, donde los principales empleados para estas pruebas fueron:

- **EMT_D9**: electrodo microtexturizado con textura biomimética inspirada en la piel de tiburón (serie de escamas distribuidos sobre la superficie)) de 170 µm de espesor en la zona funcional.
- **EMT_D2:** electrodo microtexturizado con textura de semiesferas entrantes (matriz intercalada de 13 x13 de semiesferas de 0.5 mm de diámetro) de 120 µm de espesor en la zona funcional.
- **EMT_D5.1**: electrodo microtexturizado con textura de semiesferas salientes (matriz intercalada de 7 x 8 de semiesferas de 1.2 mm de diámetro) de 110 µm de espesor en la zona funcional.

A parte de los electrodos descritos, se realizaron pruebas con otras cáscaras para ajustar las condiciones que se consideraron más adecuadas para esos ensayos.

No obstante, con los 3 electrodos seleccionados se realizaron algunas pruebas, que en un primer momento parecían dar resultados coherentes. Para ello se usaron los parámetros que se describen en la Tabla 6.9 y 6.10.

Como se puede observar en la tabla, se trabajaron dos tipos de materiales, una aleación de aluminio AL7010 y una aleación de titanio Ti6AlV4. De esta manera se podía valorar el comportamiento de las electroformas al erosionar cada uno de los materiales. Por otra parte, el equipo de electroerosión empleado es el ONA Serie "NX3", descrito en el capítulo de metodología.

Tabla 6.9. Parámetros de SEDM para los diferentes electrodos usando como pieza de trabajo Al7010.

Electrodos	Material a erosionar	VDI	Profundidad (mm)
EMT_D9	Al7010	12	0.60
EMT_D2	Al7010	20	0.60
EMT_D5.1	Al7010	20	0.25
EMT_D5.1	Al7010	22	0.25
EMT_D5.1	Al7010	25	0.25

Tabla 6.10. Parámetros de SEDM para los diferentes electrodos usando como pieza de trabajo Ti6AlV4.

Electrodos	Material a erosionar	VDI	Profundidad (mm)
EMT_D5.1	Ti6AlV4	25	0.15
EMT_D5.1	Ti6AlV4	27	0.15
EMT_D5.1	Ti6AlV4	31	0.15
EMT_D5.1	Ti6AlV4	33	0.15
EMT_D2	Ti6AlV4	22	0.60

Una vez se llevaron a cabo los ensayos, al ser los primeros no había intensión de calcular MRR o TWR, por lo que únicamente se realizó una inspección visual de dos de electrodos tras las erosiones con el equipo Infinite Focus G5 PLUS, permitiendo captar con gran precisión una valiosa información geométrica con la que evaluar los desgastes ocasionados sobre los mismos tras la electroerosión.

6.2.4.2.2. Resultados

Para la toma de medidas, se emplearon los mismos parámetros estudiados en la caracterización metrológica del error acumulado (véase Figuras 6.3 y 6.4), los cuales son:

- c): diámetro de la semiesfera o largo de la escama
- d): distancia horizontal entre centros para semiesferas o distancia entre partes traseras de las escamas
- e): distancia vertical entre centros de semiesferas o entre paredes laterales de escamas
- f): altura del elemento generador de la textura

Con dichas medidas como referencias, a continuación, se muestran los resultados del desgaste de los electrodos tras un ensayo. Hay que tener en cuenta que la geometría del electrodo de semiesferas está en sobre relieve sobre la superficie del electrodo y generan esas microcavidades en la superficie de la pieza erosionada. El desgaste de esta geometría será en el sentido de disminuir sus dimensiones. Sin embargo, en el electrodo con la textura de piel de tiburón, los elementos diseñados están en bajo relieve y por tanto al desgastarse el electrodo las dimensiones tenderían a aumentar. Las siguientes Tablas 6.11 y 6.12 ilustran los valores en términos dimensionales del electrodo con textura de piel de tiburón y el electrodo de semiesferas, antes y después de la erosión, cuantificando el desgaste entre ambas situaciones.

Tabla 6.11. Análisis del desgaste de la electroforma tras erosionar de textura piel de tiburón.

Valores dimensionales electrodo 1 piel tiburón		
Electrodo sin usar	**Electrodo tras erosionar**	**Desgaste**
c= 1.056 mm	**c=** 1.065 mm	**-0.010 mm**
d= 2.051 mm	**d=** 2.040 mm	**0.011 mm**
e= 1.119 mm	**e=** 1.117 mm	**0.002 mm**
f= 0.139 mm	**f=** 0.131 mm	**0.008 mm**

Tabla 6.12. Análisis del desgaste de la electroforma tras erosionar.

Valores dimensionales electrodo 2 semiesferas		
Electrodo sin usar	**Electrodo tras erosionar**	**Desgaste**
c= 1.111 mm	**c=** 1.149 mm	**-0.038 mm**
d= 2.516 mm	**d=** 2.518 mm	**-0.002 mm**
e= 2.515 mm	**e=** 2.508 mm	**0.007 mm**
f= 0.458 mm	**f=** 0.443 mm	**0.015 mm**

Como se puede observar, las magnitudes de referencia se han modificado muy pocas micras debido a que el proceso de electroerosión se realizó en condiciones de acabado con unas VDI muy bajas para minimizar el desgaste de la herramienta. En algunas de ellas se ha mantenido el sentido de desgaste mencionado anteriormente, pero en otros se obtienen valores en la dirección opuesta, posiblemente debido a pequeñas variaciones dimensionales causadas por las temperaturas a las que se someten los electrodos durante el proceso de EDM, y también por las adherencias de pequeñas cantidades del material erosionado en la superficie del electrodo.

Se ha analizado únicamente la primera erosión del electrodo en la que se suelen atenuar las pequeñas irregularidades superficiales que pueden haber quedado en la elaboración de estas herramientas. Se debe a que las descargas eléctricas se concentran en estos puntos en los momentos iniciales del proceso, y también generan los pequeños redondeos de las aristas vivas. Una vez que las superficies del electrodo se suavicen, la distribución de corriente en sus superficies será más homogénea en las siguientes operaciones con el electrodo y su desgaste será menor y progresivo.

Se afirma, por tanto, al igual que autores como Yarlagadda et al. que los electrodos de cobre electroconformados presentan un buen potencial para su uso como herramientas de electroerosión, aunque no se recomienda su uso en operaciones de desbaste [242]. En la siguiente Tabla 6.13 se pueden ver los diferentes electrodos utilizados para realizar las pruebas y como ha quedado la cara texturizada tras la erosión.

Tabla 6.13. Desgaste del electrodo tras su uso como herramienta en el proceso de electroerosión.

Electrodos empleados en las primeras erosiones		
		
Textura piel de tiburón	Textura piel de tiburón	Textura semiesferas
		
Textura semiesferas	Textura de diseño	Textura semiesferas

6.2.4.3. Ensayos con electrodos finales microtexturizados

Tras todo el proceso de investigación, y tras diversos cambios, este segundo estudio se centra en la aplicación de electrodos de cobre microtexturizados, obtenidos mediante electroconformado, para la transferencia de sus patrones sobre una aleación de aluminio 7010. Esta aleación, perteneciente al sistema Al-Zn-Mg-Cu, destaca por su idoneidad en aplicaciones que requieren una alta relación resistencia/peso. Es ampliamente empleada en la industria aeroespacial por su elevada resistencia mecánica, adecuada respuesta a tratamientos térmicos y excelente estabilidad dimensional (Véase Figura 6.24).



Figura 6.24. Ensayos con equipo SEDM de la ULPGC.

6.2.4.3.1. Metodología y equipamiento

Para el desarrollo de los ensayos se consideraron tres configuraciones geométricas distintas de texturizado, generadas mediante electroconformado, además de un electrodo mecanizado de cobre macizo para usarlo como referencia. En concreto, se dispuso de:

- **Electrodo convencional**: pieza de cobre macizo de geometría rectangular plana de 9 x 28 mm (sin microtextura).
- **EMT_SE_BR_1**: electrodo microtexturizado con un patrón geométrico en bajo relieve (es decir, con microcavidades de 1.2mm de diámetro en la cara de trabajo del electrodo).
- **EMT_SE_SR_1**: electrodo microtexturizado con un patrón similar, pero en sobre relieve (microsalientes de 1.2mm de diámetro sobre la superficie del electrodo).
- **EMT_TIB_1**: electrodo microtexturizado con textura biomimética inspirada en la piel de tiburón (serie de escamas distribuidos sobre la superficie).

Los ensayos se realizaron en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria utilizando el equipo ONA Serie DB300, replicando las condiciones de trabajo del estudio previo desarrollado en la Universidad de Cádiz, mediante el uso del mismo parámetro de acabado superficial VDI 20. Los parámetros eléctricos utilizados se recogen en la Tabla 6.14, y fueron mantenidos constantes para todas las pruebas con el objetivo de garantizar la comparabilidad de los resultados. Salvo la textura de piel de tiburón que se profundizó 0.2 mm, para el resto de las texturas se profundiza la erosión hasta 0.6 mm.

Tabla 6.14. Parámetros empleados para una VDI 20 según el tipo de microtextura utilizada.

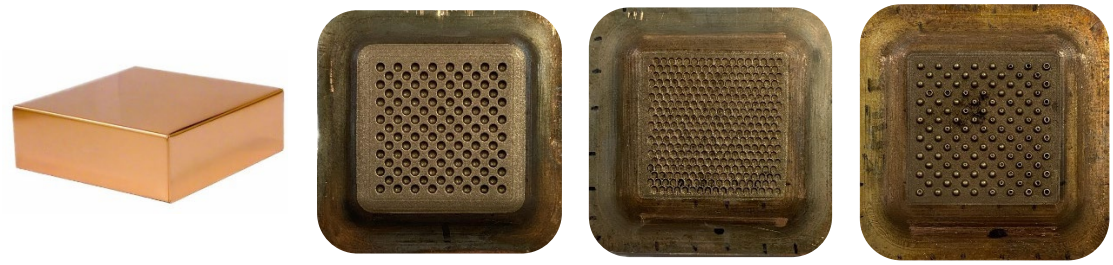
Parámetros VDI 20	**Electrodo**
Profundidad (mm)	0.6/0.2
Voltaje (V)	-200
Intensidad media (A)	1.0
Tiempo de pulso (µs)	3.2
Tiempo de pausa (µs)	6.4
Tiempo de retroceso (s)	0.30
Tiempo de trabajo (s)	0.30
Compensación	0.03
Polaridad	-

La pieza de trabajo consistió en una plancha de aleación Al7010 con dimensiones 105 × 86 × 10 mm, dividida en una matriz de 3 × 4 para permitir múltiples ensayos independientes. La combinación de electrodos de cobre y piezas de aluminio es particularmente interesante por varias razones:

- Existe una diferencia significativa en punto de fusión entre ambos materiales (1085 °C para Cu vs. 660 °C para Al), lo que favorece que el material de trabajo sea erosionado preferentemente durante la descarga, reduciendo el desgaste del electrodo.
- El cobre no se difunde fácilmente en la superficie del aluminio, evitando problemas de contaminación superficial no deseada.
- En términos de transferencia de energía, el cobre permite mantener una alta precisión de descarga, necesaria para la reproducción fiel de los patrones microtexturizados.

Inicialmente se verificaron los parámetros de la máquina mediante ensayos con el electrodo macizo de cobre para asegurar el correcto funcionamiento del proceso. Posteriormente se utilizó una de las primeras cáscaras electroconformadas, que a pesar de presentar un espesor menor a los que se iban a ensayar nos daría información para confirmar que los parámetros VDI establecidos no resultaran demasiado exigentes para los espesores de cobre previstos.

Los electrodos ensayados, ilustrados en la Figura 6.25, se emplearon en 3 ensayos consecutivos: en primer lugar, se testearon los electrodos con semiesferas en bajorrelieve, seguidos por la textura de "piel de tiburón", y finalmente, las semiesferas en sobre relieve. Durante cada ensayo se registraron los pesos de la pieza y del electrodo, permitiendo analizar el desgaste en ambos casos y el tiempo de ejecución del programa.



a) b) c) d)

Figura 6.25. Electrodos utilizados en los ensayos SEDM: a) cobre macizo; b) EMT_SE_BR_1; c) EMT_TIB_1; d) EMT_SE_SR_1.

6.2.4.3.2. Resultados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos, iniciando con la medición de los pesos de los electrodos microtexturizados tras las diferentes erosiones (véase Tabla 6.15).

Tabla 6.15. Pesos obtenidos en los electrodos tras las diferentes erosiones.

Peso del electrodo de Cu (g)			
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**
Previo	16.543	16.383	17.085
1	16.479	16.379	17.031
Diferencia	-0.064	-0.004	-0.054
2	16.444	16373	16.960
Diferencia	-0.035	-0.006	-0.071
3	16.412	16.362	16.883
Diferencia	-0.032	-0.011	-0.077

En el electrodo de semiesferas en bajo relieve se observa que la primera erosión presenta una mayor reducción de su masa respecto los siguientes dos mecanizados, casi el doble. Este fenómeno se atribuye a un posible mal relleno de las semiesferas, lo cual se observa en la Figura 6.26, en la que se aprecia que dicho relleno no se generó de manera correcta, provocando deformaciones en la réplica de la forma; se llega, incluso, a visualizar una semiesfera adicional dentro de la misma, posiblemente debido a un relleno excesivo de la cáscara en la tercera fase del programa de electroconformado.

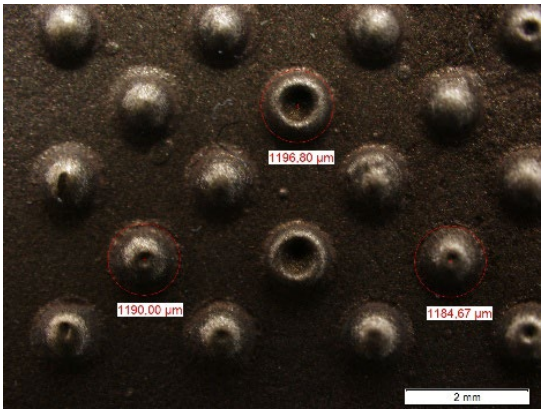


Figura 6.26. Detalle de las semiesferas erosionadas.

En el caso de las microtexturas tipo "piel de tiburón" (EMT_TIB_1), los dos primeros ensayos arrojaron valores muy pequeños, atribuibles a un posicionamiento inadecuado de la herramienta respecto a la pieza de trabajo y al error de paralelismo en la cara del electrodo antes mencionado. Una vez corregido este error en la última erosión, se observó un aumento en el peso perdido por el electrodo, que indica que ha estado erosionando una mayor área de su superficie funcional.

Por último, el electrodo con semiesferas en sobre relieve (EMT_SE_SR_1) fue el que generó las erosiones con mejores condiciones, debido al mínimo error de paralelismo en la cara texturizada, lo que se reflejó en valores de pérdida de material muy parecidos en los dos últimos ensayos. El desgaste es significativamente mayor debido a que su geometría hace que se esté erosionando desde un primer momento con un área mucho mayor de electrodo.

Asimismo, se midió la pérdida de peso en la pieza de trabajo, fabricada en aleación Al7010, cuyos resultados se muestran en la siguiente Tabla 6.16.

Tabla 6.16. Pesos obtenidos en la pieza de trabajo tras las diferentes erosiones.

Peso de la pieza de Al7010 (g)			
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**
Previo	256.956	256.471	256.265
1	256.825	256.436	255.730
Diferencia	-0.131	-0.035	-0.535
2	256.677	256.399	255.075
Diferencia	-0.148	-0.037	-0.655
3	256.471	256.265	254.346
Diferencia	-0.206	-0.134	-0.729

Se aprecia que, en el caso del electrodo de semiesferas en bajorrelieve, a medida que se realizaban sucesivos ensayos, se removía una mayor cantidad de material, debido a un mejor posicionamiento de la pieza. Un comportamiento similar se observó con la textura tipo "piel de tiburón", en la que la última erosión mostró un valor notablemente superior. En el electrodo con semiesferas en sobre

relieve, aunque los valores incrementaron también, las diferencias fueron más pequeñas, dado que las erosiones resultaron muy similares en las tres pruebas.

Los tiempos de erosión (Tabla 6.17), reflejados en la siguiente tabla, confirman que la herramienta con textura tipo "piel de tiburón" presentó tiempos significativamente menores en los dos primeros ensayos debido a un posicionamiento deficiente que hizo que solo erosionara por una esquina del electrodo aumentando muy poco a poco el área erosionada. Este mismo problema se dio en menor medida, al profundizar un valor mucho mayor, en el primer mecanizado con el electrodo de semiesferas bajo relieve. Para el resto de los casos, y especialmente en la textura sobre relieve, requirieron tiempos mucho mayores pues desde un primer momento la erosión se extiende a toda la superficie de la base del electrodo y luego incrementa poco a poco al genera la textura. Justo lo contrario ocurre con la textura bajo relieve que se empieza a erosionar con la parte más saliente de los elementos de la textura y poco a poco va aumentando el área de mecanizado hasta llegar a la base del electrodo.

Tabla 6.17. Tiempos obtenidos durante las diferentes erosiones.

Tiempo de erosión (min)				
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**	**macizo**
1	59.00	15.00	178.00	166.00
2	83.00	13.00	216.00	-
3	95.00	52.00	244.00	-

Además, se analizó la relación entre el desgaste del electrodo y el material eliminado de la pieza. En los electrodos EMT_TIB_1 y EMT_SE_SR_1, la relación resultó muy razonable, ya que el desgaste sufrido en el electrodo fue mínimo en comparación con el de la pieza. No obstante, en el caso de EMT_SE_BR_1, el mal relleno de las semiesferas se tradujo en mayores valores de desgaste del electrodo, a lo que se suma las desviaciones en el ensamblaje ya mencionados, influye en los valores de relación de desgaste obtenido. Todos ellos se resumen en la siguiente Tabla 6.18., donde se aprecia que en los ensayos realizados en las mejores condiciones tiende a tener una relación 1/9.

Tabla 6.18. Relación entre desgate de electrodo y pieza.

Relación entre desgate de electrodo y pieza			
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**
1	1/2	1/8	1/10
2	1/4	1/6	1/9
3	1/6	1/12	1/9

- **Evaluación del índice TWR (%)**

El TWR se define como el volumen del electrodo desgastado respecto al volumen del material eliminado de la pieza. Una disminución en el TWR indica una mayor eficiencia del proceso. Los valores obtenidos se detallan en la siguiente Tabla 6.19., que siguiendo el mismo argumento anterior tienden a estar en torno al 3%.

Tabla 6.19. Valores de TWR en los diferentes ensayos de electroerosión.

TWR (%)			
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**
1	15.51	3.79	3.17
2	7.55	5.37	3.42
3	4.89	2.59	3.34

- **Evaluación del MRR (mm^3/min)**

El MRR representa el volumen de material eliminado de la pieza de trabajo por unidad de tiempo, expresado en mm^3/min. Un valor más elevado de MRR indica una mayor eficiencia en la eliminación de material, lo que puede traducirse en un proceso de electroerosión más productivo. Los resultados obtenidos son los representados en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Valores de TWR en los diferentes ensayos de electroerosión.

MRR (mm^3/min)			
Erosión	**EMT_SE_BR_1**	**EMT_TIB_1**	**EMT_SE_SR_1**
1	0.787	0.827	1.066
2	0.632	1.009	1.075
3	0.769	0.914	1.059

Estos valores son muy coherentes y similares a los obtenidos por otros autores en el empleo de electrodos SEDM electroconformados. Se observa que en los ensayos realizados en mejores condiciones este valor está en torno a 1 mm^3/min. Para los ensayos con microesferas en bajo relieve se ve un valor significativamente más bajo que en los ensayos con la misma textura sobre relieve, mientras que los de la textura en sobre relieve con piel de tiburón los valores son muy parecidos a la textura de microesferas en sobre relieve. Esta información parece indicar que este parámetro está más influenciado por el tipo de textura que por el patrón geométrico de la misma. Se requeriría un mayor número de ensayos para verificar esta hipótesis.

Además del análisis cuantitativo realizado mediante el pesaje de las cáscaras antes y después del proceso de erosión para evaluar el rendimiento del electrodo, se consideró fundamental complementar esta información con una evaluación cualitativa y cuantitativa visual, que permitiera observar posibles alteraciones geométricas o deterioros superficiales generados durante los ensayos de SEDM. Este análisis visual se planteó como una herramienta de verificación para corroborar si el proceso de erosión afectaba de forma significativa a la geometría funcional de las cáscaras, especialmente en zonas críticas como aristas o detalles finos de las texturas.

Para ello, se empleó el microscopio de fluorescencia Olympus BX51, con el objetivo de capturar imágenes de alta resolución de las zonas funcionales de las cáscaras antes de su uso y tras completar los ciclos de erosión correspondientes. La elección de este equipo se justifica por su capacidad para detectar de forma clara defectos superficiales, pequeñas deformaciones o zonas de desgaste no evidentes a simple vista, aspectos cruciales para valorar la durabilidad y estabilidad geométrica de las herramientas.

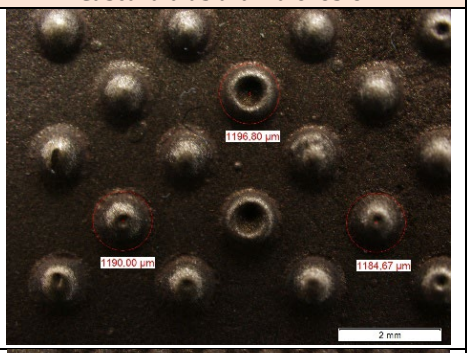
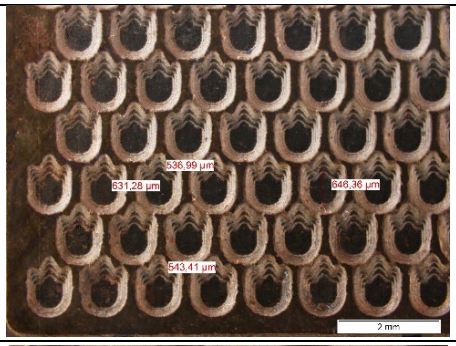
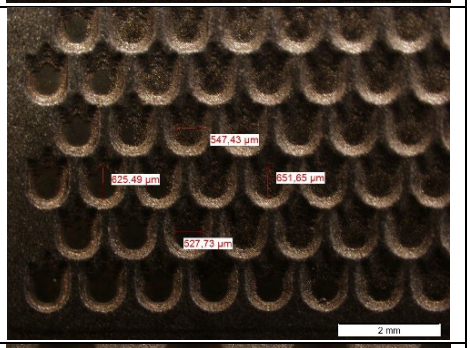
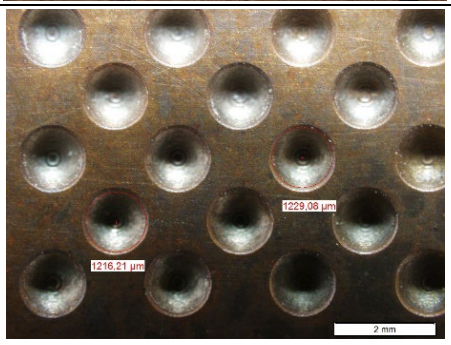
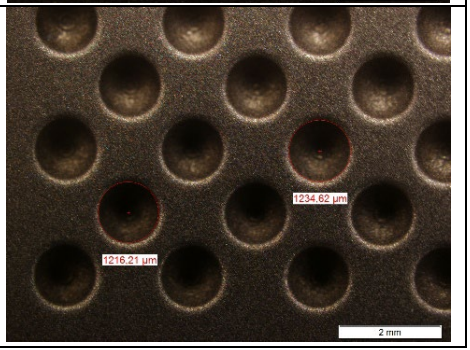
Durante esta evaluación se realizaron microfotografías de distintos puntos estratégicos en cada electrodo, enfocando especialmente en las esquinas —zonas proclives a presentar mayores esfuerzos térmicos durante la electroerosión y espesores reducidos en las electroformas. Estas imágenes se han incluido en detalle en el apartado de Anexos, aunque una selección representativa se resume en la Tabla 6.21, en la cual se muestra la evolución visible de una esquina característica antes y después del tercer ensayo de erosión.

Los resultados visuales confirman algunos de los hallazgos previamente discutidos. En el caso del electrodo EMT_SE_BR_1, como ya se mencionó en apartados anteriores, se partió de una geometría incorrectamente generada, con las semiesferas parcialmente selladas debido a una deficiente deposición de cobre durante el electroconformado. Esta anomalía provocó una eliminación de material en la zona inferior de las semiesferas tras la erosión, observándose una textura incompleta que no replica fielmente el modelo CAD original.

Por el contrario, en los electrodos EMT_TIB_1 y EMT_SE_SR_1, la inspección visual posterior al tercer ensayo de erosión no revela daños estructurales significativos ni pérdida de definición en los elementos texturales. Estos resultados visuales refuerzan evidencian la alta durabilidad y capacidad

de replicabilidad del proceso cuando la cáscara ha sido correctamente fabricada, reforzada y alineada. Sí que se puede observar un cierto redondeo de las aristas en los elementos generadores de las texturas, generadas por las características del proceso de fabricación aditiva, lo que avala la idea que en los primeros usos de estas cáscaras se produce un mayor nivel de desgaste.

Tabla 6.21. Evolución de las cáscaras durante los ensayos.

Electrodo	Cáscara sin erosionar	Cáscara tras última erosión
EMT_SE_BR_1		
EMT_TIB_1		
EMT_SE_SR_1		

La inclusión de este análisis visual, junto con el estudio de masa, proporciona una visión holística del comportamiento de las cáscaras como herramientas funcionales, permitiendo identificar no solo los errores geométricos cuantificables, sino también patrones de desgaste visualmente evidentes que pudieran anticipar cambios en la geometría transferida durante su uso, así como posibles fallos funcionales.

6.2.4.3.3. Comparativa con electrodo macizo mecanizado convencionalmente

Con el fin de establecer una base de referencia para el desempeño de los electrodos microtexturizados, se realizó un ensayo adicional utilizando un electrodo macizo de cobre mecanizado por métodos convencionales. Este ensayo empleó los mismos parámetros eléctricos y condiciones de trabajo que los ensayos anteriores, permitiendo una comparación directa en términos de TWR y MRR.

La Figura 6.27 muestra la comparación del MRR entre los distintos electrodos. El electrodo macizo presentó un valor medio de 0,85 mm^3/min, lo que lo posiciona entre EMT_SE_BR_1 (0.73 mm^3/min) y EMT_TIB_1 (0.91 mm^3/min). Si bien el electrodo EMT_SE_SR_1 tuvo el MRR más alto (~1.06 mm^3/min), este valor debe ser contextualizado considerando la geometría texturizada que promueve una mayor superficie efectiva de contacto (prácticamente la misma a la del electrodo macizo, solo en la zona plana sin contar el área de las semiesferas) y por tanto una tasa de desgaste superior, aunque controlada.

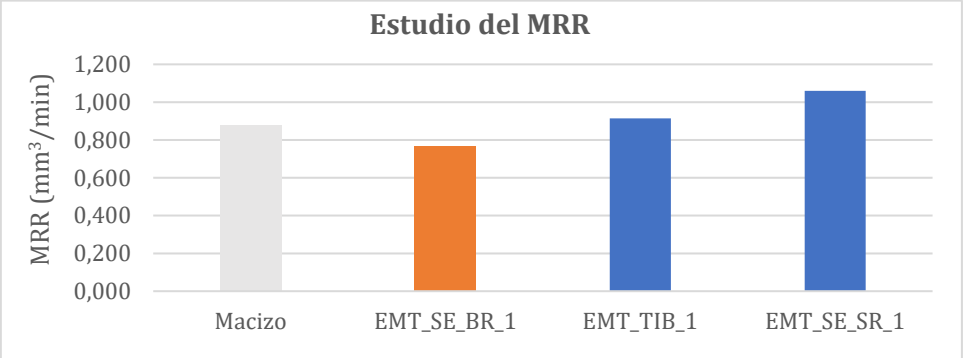


Figura 6.27. Comparativa del TWR de electrodo macizo y electrodos electroconformados.

En cuanto al TWR (Figura 6.28), los resultados muestran que el electrodo macizo presenta un valor de 3.65 %, inferior al de EMT_SE_BR_1 (4.85 %), pero superior al de EMT_TIB_1 (2.55 %) y EMT_SE_SR_1 (3.35 %). Estos datos indican que los electrodos microtexturizados por electroconformado no solo son competitivos, sino que pueden superar en eficiencia al electrodo convencional cuando se diseñan adecuadamente.

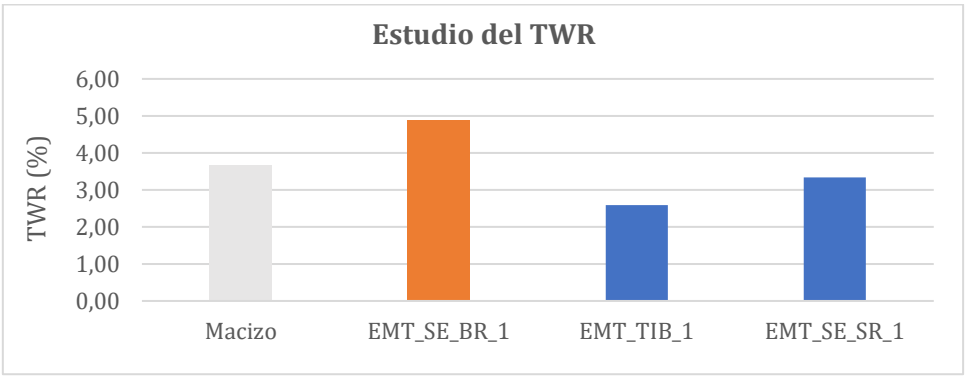


Figura 6.28. Comparativa del TWR de electrodo macizo y electrodos electroconformados.

Este análisis comparativo pone de manifiesto que los electrodos microtexturizados mediante electroconformado no solo son viables desde el punto de vista técnico, sino que además ofrecen ventajas claras frente a los electrodos tradicionales:

- Menores o similares valores de TWR, lo que indica una mayor eficiencia relativa del material del electrodo.
- Geometrías personalizables que permiten diseñar herramientas funcionales adaptadas a diferentes objetivos de texturizado.
- Posibilidad de fabricar herramientas ligeras y reproducibles, ideales para microtexturizado de alta precisión.

Estos resultados aportan información valiosa para orientar futuros desarrollos en herramientas microtexturizadas, de modo que se pueda equilibrar la eficiencia en la eliminación de material (MRR) con la durabilidad del electrodo (TWR), optimizando así el proceso de SEDM para aplicaciones industriales avanzadas.

6.2.5. Funcionalidad de las texturas obtenidas

La evaluación de las características funcionales de las texturas desarrolladas se ha realizado mediante ensayos de medición del ángulo de contacto con un fluido. Este ensayo es fundamental para caracterizar las propiedades de humectabilidad de una superficie, ya que este parámetro influye directamente en fenómenos tales como la adhesión, la autolimpieza y la interacción con líquidos. En el contexto de la fabricación avanzada, la texturización superficial se erige como una herramienta determinante para modular el comportamiento hidrofóbico o hidrofílico de las piezas, permitiendo optimizar sus aplicaciones en diversos campos.

- **El Ángulo de Contacto y su relevancia en Superficies Texturizadas**

El ángulo de contacto se define como el ángulo formado entre la tangente a la curva de una gota de líquido y la superficie sólida en el punto de contacto (véase Figura 6.29). Esta medida resulta indispensable para evaluar la interacción entre el líquido y la superficie, ya que permite inferir la capacidad de la superficie para repeler o atraer líquidos. En el ámbito de la ingeniería de superficies, un ángulo de contacto elevado se asocia con una mayor hidrofobicidad, mientras que valores bajos indican mayor hidrofilia. La medición de este ángulo se convierte, por tanto, en un indicador clave para el diseño de superficies que requieren un control preciso de la humectabilidad [24,25].

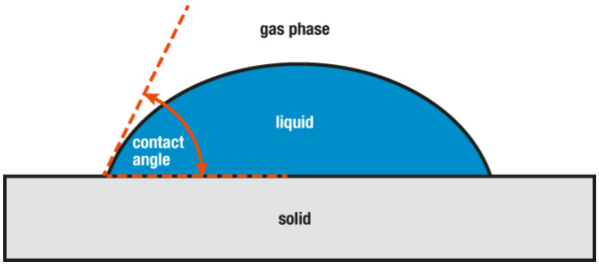


Figura 6.29. Definición del ángulo de contacto.

Históricamente, el estudio del ángulo de contacto ha impulsado avances significativos en el desarrollo de recubrimientos y tratamientos superficiales, evidenciados desde las investigaciones pioneras sobre la repelencia del agua en hojas de loto hasta las actuales aplicaciones en superficies autolimpiantes y anti-hielo [25,26]. La capacidad de modificar la topografía superficial mediante texturización ha permitido adaptar las propiedades de contacto, facilitando el diseño de materiales con comportamientos específicos para cada aplicación.

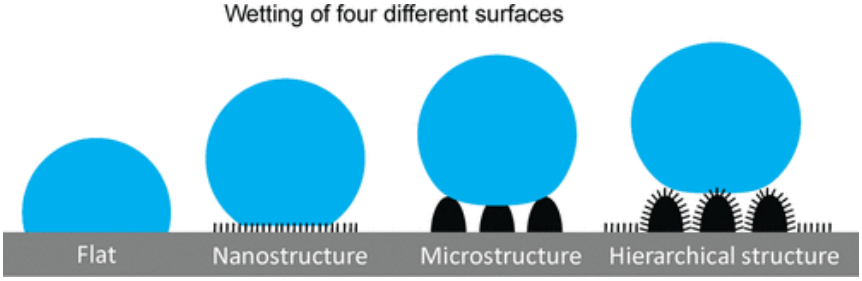


Figura 6.30. Esquema y humectación de las cuatro diferentes superficies fabricadas. Obtenido de [30].

Por ejemplo, las texturas inspiradas en la piel de tiburón, con estructuras jerárquicas, reducen significativamente el área de contacto entre la gota y la superficie, promoviendo una superhidrofobicidad que minimiza la adhesión de líquidos [26,31]. En contraste, superficies con estructuras entrantes pueden incrementar la humectabilidad mediante el aumento de la capilaridad [26].

El comportamiento de las superficies frente a los líquidos se puede clasificar en función del ángulo de contacto medido, considerando además la rugosidad superficial y la histéresis entre los ángulos avanzados y de retroceso, como lo demuestran las investigaciones clásicas de Wenzel [32] y Cassie y Baxter [33]. Atendiendo a eso, las superficies pueden clasificarse en tres grandes categorías (véase Figura 6.31) en función de su ángulo de contacto:

- **Superficies Hidrofílicas**: Presentan ángulos de contacto menores a 90 grados, lo que indica una fuerte interacción entre el líquido y el sólido, permitiendo que el líquido se esparza fácilmente sobre la superficie. Estas superficies se emplean en aplicaciones que requieren una alta absorción o adhesión, como los recubrimientos de tinta, los dispositivos biomédicos y las superficies que promueven la difusión de fluidos [36,37].
- **Superficies Hidrofóbicas**: Exhiben ángulos de contacto mayores a 90 grados, lo que sugiere una baja afinidad entre el líquido y el sólido. En estas superficies, el líquido forma gotas compactas debido a la resistencia de la superficie a ser mojada. Son ideales para aplicaciones antiadherentes, repelentes de agua y superficies autolimpiantes, como se observa en las hojas de loto o superficies recubiertas con polímeros hidrofóbicos [25].
- **Superficies Superhidrofóbicas**: Estas superficies poseen ángulos de contacto superiores a 150 grados, lo que las convierte en altamente resistentes a la humectabilidad. Este tipo de superficies son deseables en entornos que requieren la mínima interacción con líquidos, como las aplicaciones de autolimpieza, la reducción del arrastre en vehículos y el manejo de líquidos en microfluidos [14,38].

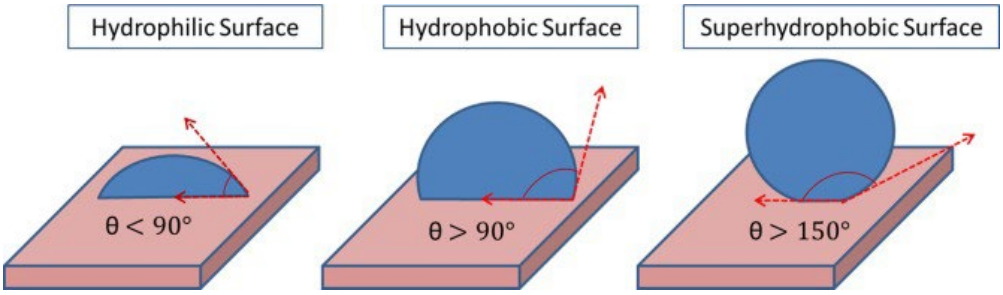


Figura 6.31. Clasificación principal de las superficies según su ángulo de contacto.

No obstante, este comportamiento se mantiene mientras la escala del patrón superficial sea mucho menor que el tamaño de la gota de líquido [39]. Cuando las estructuras de la topografía superficial se aproximan al tamaño de la gota, una parte considerable del volumen de la gota puede quedar atrapada en las cavidades de la superficie, lo que resulta en una disminución del ángulo de contacto medido [40,41].

Los estudios del ángulo de contacto involucran tanto métodos experimentales como teóricos para comprender estas interacciones entre líquido y sólido. Las técnicas experimentales proporcionan datos directos sobre el comportamiento del líquido en contacto con una superficie, mientras que las simulaciones computacionales y los modelos matemáticos permiten predecir y optimizar este comportamiento antes de la fabricación de materiales [42,43].

Existen varios métodos para medir el ángulo de contacto, como la medición de gotas sésiles [44], la técnica de la burbuja cautiva [45] y el método del ángulo de inclinación [46], cada uno con ventajas y limitaciones dependiendo de la precisión requerida y el tipo de superficie que se esté estudiando . Estas técnicas, complementadas con métodos de imagen avanzados (AFM, SEM) [47], permiten obtener una caracterización detallada de la interacción líquido-sólido en superficies texturizadas, proporcionando datos esenciales para el diseño y la optimización de nuevas texturas. En esta investigación se empleará únicamente el método de medición de gotas sésiles.

6.2.5.1. Estudio del comportamiento de las texturas en piezas MSLA

Con el objetivo de analizar la funcionalidad final de las superficies texturizadas, especialmente en lo relativo a propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas, se realizaron ensayos de medición de ángulo de contacto utilizando el instrumento DMe-211Plus. Este equipo, junto con el software FAMAS, permitió calcular automáticamente los valores de ángulo de contacto de gotas sésiles, obteniendo estadísticas como la media y la desviación típica, y documentando visualmente el comportamiento de la gota sobre la superficie.

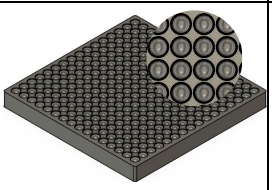
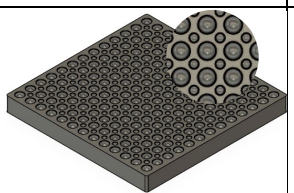
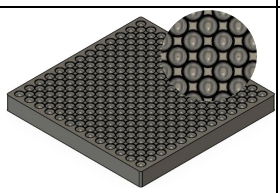
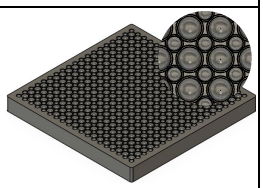
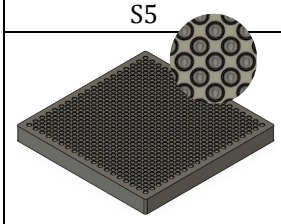
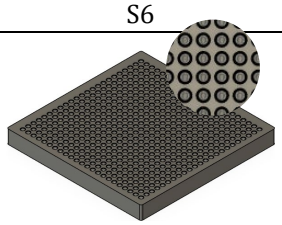
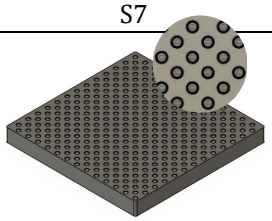
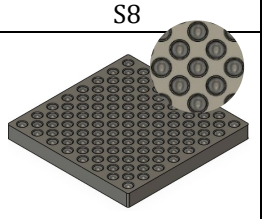
En este estudio se han evaluado dos grupos de microtexturas diseñadas con el objetivo de manipular el ángulo de contacto: por un lado, una textura inspirada en la piel de tiburón, conocida por inducir propiedades superhidrofóbicas; y, por otro, una textura basada en semiesferas entrantes, que se espera exhiba un comportamiento hidrofílico.

- **Texturas bajo relieve (Caso de estudio: semiesferas)**

En este apartado, se analizan texturas generadas a partir de patrones de semiesferas entrantes, las cuales constituyen una geometría recurrente en sistemas naturales y biomiméticos, conocidos por su capacidad para manipular la interacción entre superficies sólidas y líquidos.

El diseño de las texturas evaluadas se basó en matrices de semiesferas de diferentes diámetros, que oscilan entre 0.5 mm y 1.2 mm, generando ocho variantes distintas, como se detalla en la Tabla 6.22. Estas texturas, creadas en resina fotosensible mediante MSLA, ofrecen una oportunidad para estudiar cómo las propiedades geométricas y la densidad del patrón influyen en el comportamiento hidrofílico. La humectabilidad de estas superficies se evaluó a través de mediciones del ángulo de contacto, empleando agua como líquido.

Tabla 6.22. Texturas bajo relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto.

Texturas bajo relieve			
S1	S2	S3	S4
			
S5	S6	S7	S8
			

Las características de cada textura son:

- S1 (1): Matriz lineal (16x16) de semiesferas de 1 mm.
- S2 (2): Matriz intercalada (13x13) de semiesferas de 1 mm con matriz (12x12) de semiesferas de 0.5 mm.
- S3 (3): Matriz intercalada (13x13 / 12x12) de semiesferas de 1mm.
- S4 (4): Matriz intercalada (18x18) de semiesferas de 1 mm con matriz (19 x19) de semiesferas de 0.5 mm.
- S5 (5): Matriz intercalada (19x19 / 18x18) de semiesferas de 0.5 mm.
- S6 (6): Matriz lineal (23x23) de semiesferas de 0.5 mm.
- S7 (7): Matriz intercalada (13x13 / 13x13) de semiesferas de 0.5 mm.
- S8 (8): Matriz intercalada (8x8 / 7x7) de semiesferas de 1.2 mm.

Los resultados experimentales muestran que la mayoría de las texturas con semiesferas entrantes presentan ángulos de contacto significativamente reducidos, en un rango de 50° a 90°, lo que evidencia una elevada capacidad de humectación, tal y como se ilustra en la Tabla 6.23. Este comportamiento está en consonancia con estudios previos, como los realizados por Quéré [26], que describen cómo las geometrías bajo relieve favorecen la adhesión de agua debido a efectos de capilaridad y el aumento del área de contacto efectivo entre la superficie sólida y el líquido.

Tabla 6.23. Estudio ángulo de contacto en microtexturas semiesferas.

Textura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)
S1	90.20	73.60	69.00	89.30	72.00	73.60	74.20	75.70	63.80	63.20	**74.10**	**9.20**
S2	62.80	58.60	57.00	62.90	61.90	75.10	57.10	60.70	86.90	62.80	**64.00**	**9.30**
S3	72.50	75.80	93.40	73.60	80.60	65.50	71.00	69.00	58.00	82.30	**72.80**	**7.80**
S4	83.70	94.90	95.10	95.60	89.00	92.20	93.30	87.80	87.80	90.30	**90.50**	**4.00**
S5	72.50	68.80	57.80	72.80	64.20	72.00	63.70	74.00	73.50	72.30	**68.70**	**5.60**
S6	71.90	72.60	74.50	74.10	74.50	73.80	77.40	81.10	81.40	75.70	**75.20**	**3.50**
S7	60.40	56.50	58.60	58.60	59.50	57.30	59.50	58.40	60.40	63.20	**58.80**	**1.90**
S8	60.60	60.50	63.60	69.20	64.60	64.80	64.20	61.10	60.00	60.60	**62.50**	**2.90**

Cabe destacar que, aunque la mayoría de las texturas analizadas manifiestan un comportamiento hidrofílico, una de las configuraciones estudiadas alcanza un ángulo de contacto cercano a los 90°, límite en el que las superficies comienzan a exhibir características hidrofóbicas. Este hallazgo resalta la importancia de optimizar la geometría y densidad del patrón para alcanzar el desempeño deseado en aplicaciones específicas. La Figura 4.46 ilustra estos resultados, permitiendo visualizar de manera clara las diferencias en el comportamiento hidrofílico entre las distintas texturas analizadas.

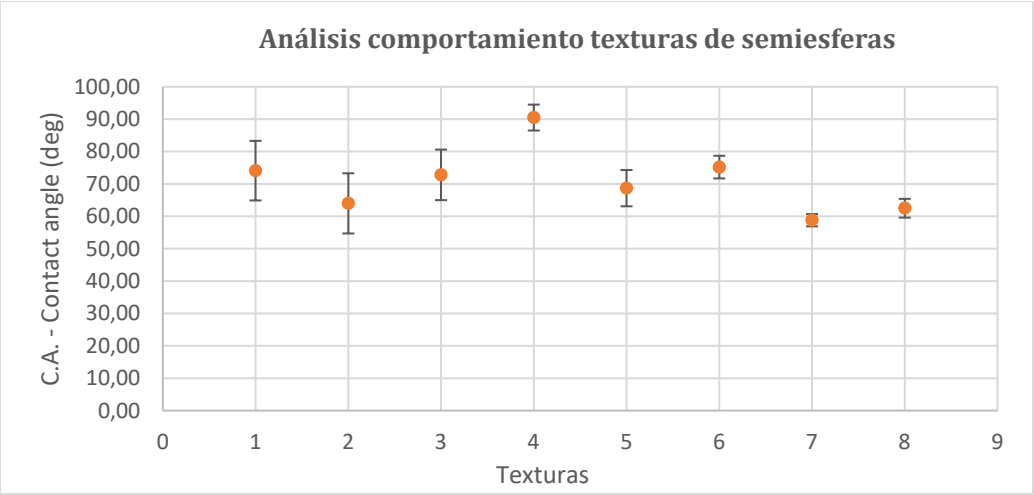


Figura 6.32. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de semiesferas bajo relieve.

El análisis de las texturas en función del ángulo de contacto permitió identificar tendencias significativas relacionadas con la geometría y distribución de las semiesferas, reafirmando en gran medida las hipótesis planteadas en la literatura. Los resultados indican que el tamaño de las semiesferas, la configuración de las matrices y la densidad de las texturas tienen un impacto determinante en el hidrofílico.

En primer lugar, las texturas con semiesferas de menor tamaño, como S2, S5 y S7, presentan valores de ángulo de contacto más bajos, evidenciando un comportamiento hidrofílico más pronunciado. En particular, S7, con un promedio de ángulo de contacto de 58.80º exhibió el comportamiento más hidrofílico. Esto se debe probablemente a la combinación de su matriz intercalada y el tamaño reducido de las semiesferas, lo que maximiza el área efectiva de interacción entre la gota y los relieves.

En contraste, las texturas con semiesferas más grandes, como S1 (1 mm1mm) y S8 (1.2 mm1.2mm), mostraron ángulos de contacto más elevados, indicando un comportamiento más hidrofóbico. Si bien estas texturas tienen una geometría bajo relieve, las dimensiones mayores de las semiesferas parecen reducir la capacidad del agua para adaptarse a las irregularidades de la superficie, limitando el efecto de mojado. Sin embargo, S8, a pesar de tener semiesferas de mayor tamaño, mostró un comportamiento relativamente hidrofílico (62.50º), probablemente debido a su diseño de matriz intercalada, que compensó parcialmente el efecto del tamaño.

Otro aspecto relevante es la influencia de la densidad de la matriz. En el caso de S4, con matrices altamente compactas de 18×18 y 19×19 semiesferas, el ángulo de contacto fue el más elevado (90.50◦90.50◦), lo que evidencia un comportamiento marcadamente hidrofóbico. Este resultado contradice parcialmente las expectativas iniciales, ya que, aunque una mayor densidad debería aumentar la rugosidad efectiva, también puede generar compactación excesiva que dificulte la penetración del líquido en los huecos entre las semiesferas, limitando las interacciones capilares. Por el contrario, texturas con densidad moderada, como S2 y S7, lograron un balance óptimo que favorece un menor ángulo de contacto.

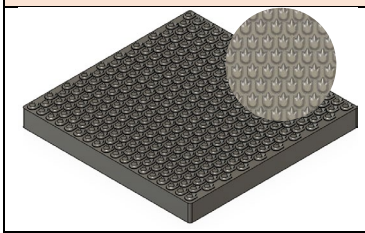
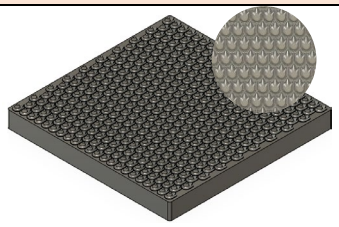
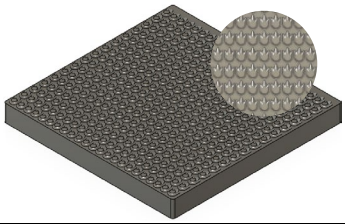
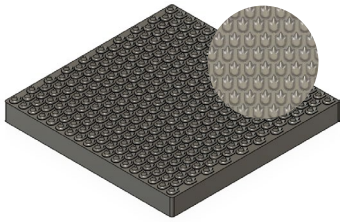
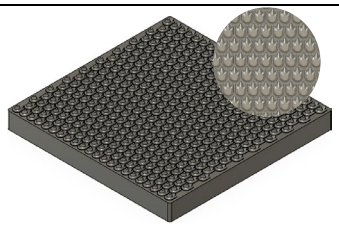
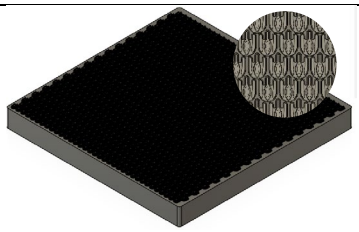
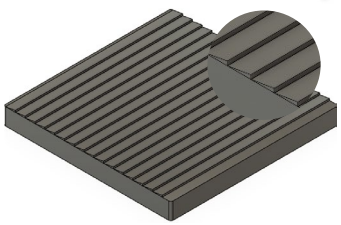
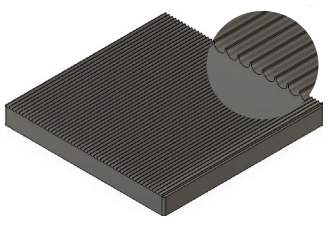
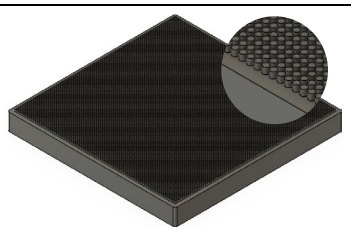
Finalmente, las texturas uniformes (por ejemplo, S1 y S6) tienden a mostrar ángulos de contacto más altos en comparación con las intercaladas. Esto refuerza la importancia de la complejidad geométrica en el diseño de texturas, ya que configuraciones más heterogéneas ofrecen mayor área efectiva para la interacción líquido-sólido, facilitando el comportamiento hidrofílico esperado.

- **Textura sobre relieve (Caso de estudio: piel de tiburón)**

En el caso de las texturas sobre relieve, como se indicó previamente, se estudió la textura bioinspirada en la piel del tiburón. El primer estudio analiza nueve texturas, donde las tres primeras emplean escamas de tiburón con la misma dimensión, pero variando la separación entre las mismas y matrices intercaladas o lineales. El resto de las texturas, son simplificaciones del efecto de la piel del tiburón, donde según otros estudios, la superficie sigue un comportamiento hidrofóbico. En la Tabla 6.24 se ilustran las diferentes texturas descritas previamente. Las características de cada textura son:

- T1 (1): matriz intercalada (18x10 / 17x9) de escamas de tiburón de 200 µm de alto.
- T2 (2): matriz intercalada (22x10 / 17x9) de escamas de tiburón de 200 µm de alto.
- T3 (3): matriz (16x23) de escamas de tiburón de 200 µm de alto.
- T4 (4): matriz intercalada (18x10 / 17x9) de escamas de tiburón de 150 µm de alto.
- T5 (5): matriz intercalada (21x9 / 17x9) de escamas de tiburón de 150 µm de alto.
- T6 (6): matriz intercalada (35x16 / 35x16) de escamas de tiburón de 175 µm de alto.
- T7 (7): matriz de 16 triángulos de 0.2 mm de altura y 1.16 mm de largo.
- T8 (8): matriz de 47 ondas de 0.362 mm de diámetro de canal y 0.225 mm de altura.
- T9 (9): cuadrícula (77x77) de cilindros de 200 µm de diámetro y altura.

Tabla 6.24. Texturas sobre relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto.

Texturas sobre relieve		
		
T1	T2	T3
		
T4	T5	T6
		
T7	T8	T9

Debido al tipo de textura, se espera que las mediciones del ángulo de contacto en la superficie muestren valores consistentemente superiores a 90°, próximos a 150°, para así clasificarse como

superficie superhidrofóbica, al igual que actuaría en un entorno real. No obstante, los resultados obtenidos fueron totalmente contradictorios, obteniendo valores inferiores a 50° en las texturas que emplean escamas reales y en el resto de texturas valores en torno a los 60°, exceptuando las texturas T8, cuyo valor es muy próximo a 90° como se observa en la Tabla 6.25.

Tabla 6.25. Estudio ángulo de contacto en microtexturas piel de tiburón.

Textura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)
Tib1	46,90	39,80	31,70	29,10	26,40	35,60	35,90	29,60	41,50	40,50	**35,10**	**6,40**
Tib2	48,70	48,80	47,30	42,10	42,40	43,70	42,80	54,00	50,40	40,90	**45,60**	**4,50**
Tib3	54,60	42,60	51,90	47,60	51,90	53,90	48,30	48,90	47,70	47,50	**48,80**	**3,50**
Tib4	51,40	50,20	58,00	54,50	54,50	58,40	57,10	60,10	61,30	62,40	**56,50**	**4,10**
Tib5	53,40	56,40	65,90	54,60	64,90	59,20	60,80	62,80	60,80	65,70	**59,80**	**4,40**
Tib6	51,20	53,30	62,10	55,00	64,80	68,90	61,10	62,70	57,50	64,80	**59,70**	**5,50**
Tib7	74,30	73,40	69,40	71,90	69,50	66,60	63,30	75,60	73,90	63,10	**69,60**	**4,40**
Tib8	90,40	89,30	86,10	85,70	96,10	82,00	82,20	91,40	85,20	88,30	**87,40**	**4,30**
Tib9	55,20	52,70	63,90	65,90	62,70	67,10	60,70	65,70	66,70	65,80	**62,00**	**5,00**

Para que se observe de manera más gráfica y relacionada los valores, a continuación, se muestra en la Figura 6.33, los valores medios, junto a la desviación típica obtenida durante las mediciones.

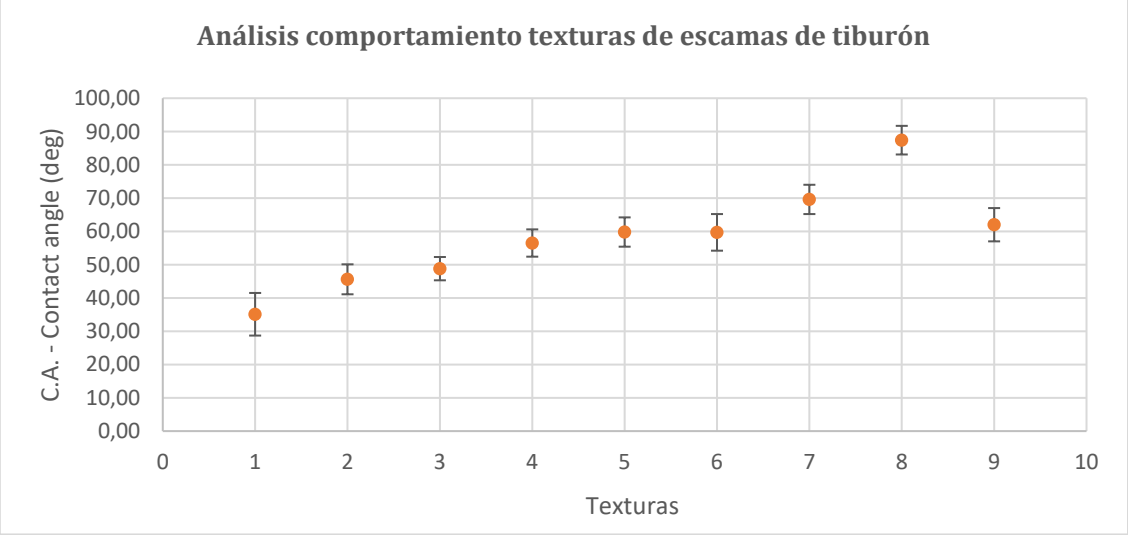
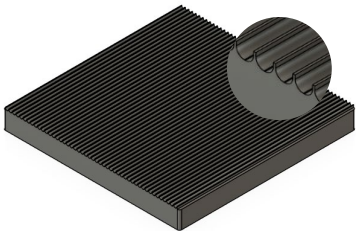
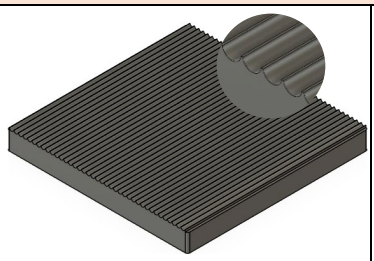
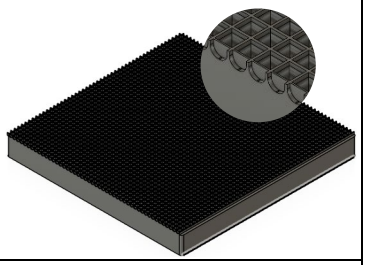
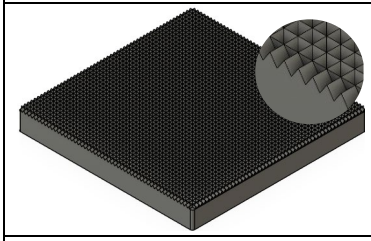
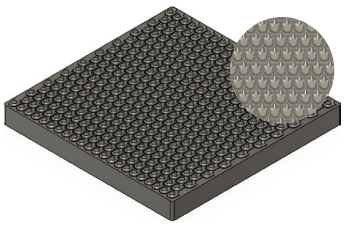
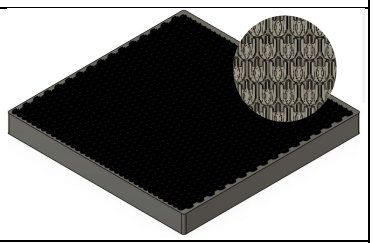
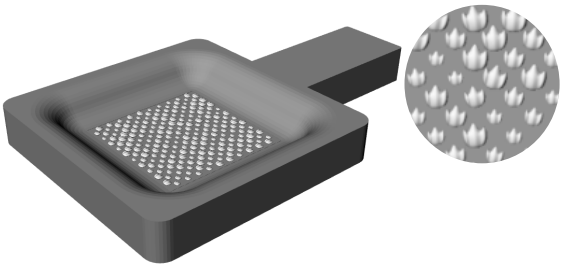


Figura 6.33. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de piel de tiburón sobre relieve.

Este resultado no es coherente y esto puede deberse a la falta de altura que tienen las diferentes texturas, así como al espacio presente entre escamas. Es por ello que se hará un nuevo estudio para mejorar estos resultados, tratando de obtener resultados similares a otros estudios que demuestran que las estructuras jerárquicas y la rugosidad multiescala reducen la adhesión del agua y promueven la formación de gotas esféricas [31]. La intención de este rediseño es la minimización del área de contacto entre la gota y la superficie. Teniendo esto en cuenta se ha realizado un segundo estudio de texturas simplificadas que simulan la piel de tiburón, las cuales se ilustran en la Tabla 6.26.

Tabla 6.26. Texturas sobre relieve analizadas mediante estudio del ángulo de contacto.

Texturas sobre relieve		
		
T10	T11	T12
		
T13	T14	T15
		
T16		

Estas texturas ilustradas en la tabla anterior tienen las siguientes características:

- T10 (1): matriz de 47 ondas de 362 µm de diámetro de canal y 275 µm de altura.
- T11 (2): matriz de 40 ondas de 500 µm de diámetro de canal y 225 mm de altura
- T12 (3): matriz cruzada de 47 ondas de 362 µm de diámetro de canal y 275 µm de altura
- T13 (4): matriz cruzada de 51 triángulos con 275 µm de alto y 38 µm de base
- T14 (5): matriz intercalada (22x10 / 17x9) de escamas de tiburón de 350 µm de alto
- T15 (6): matriz intercalada (35x16 / 35x16) de escamas de tiburón de 250 µm de alto
- T16 (7): Escama parametrizada en Rhinoceros

Los resultados se pueden observar en la siguiente Figura 6.34.

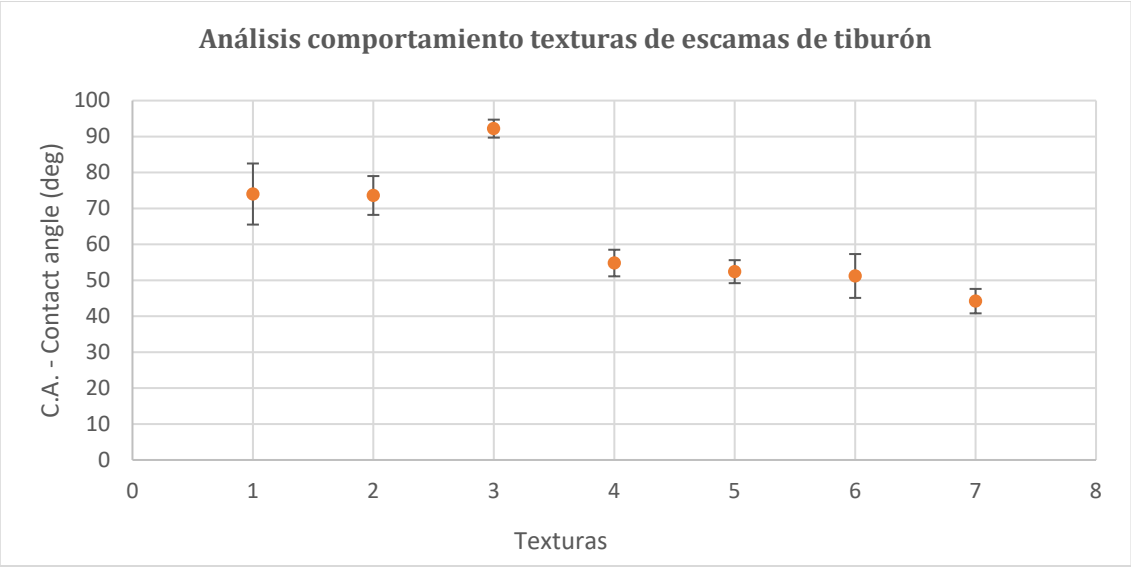


Figura 6.34. Representación gráfica de los valores medios junto a las desviaciones de los ángulos de contacto de las texturas de piel de tiburón sobre relieve.

Los valores medidos continúan siendo inferiores a aquellos que se esperarían al reflejar el comportamiento hidrofóbico de texturas con diseños más realistas, como los que incorporan escamas, o incluso de aquellos que, mediante diseños simplificados, buscan replicar dicho comportamiento. Por ello, se optó por analizar, como se ilustra en la Figura 6.35, el desempeño de la primera textura estudiada, pero en este caso evaluando la superficie erosionada en lugar de la pieza modelo.

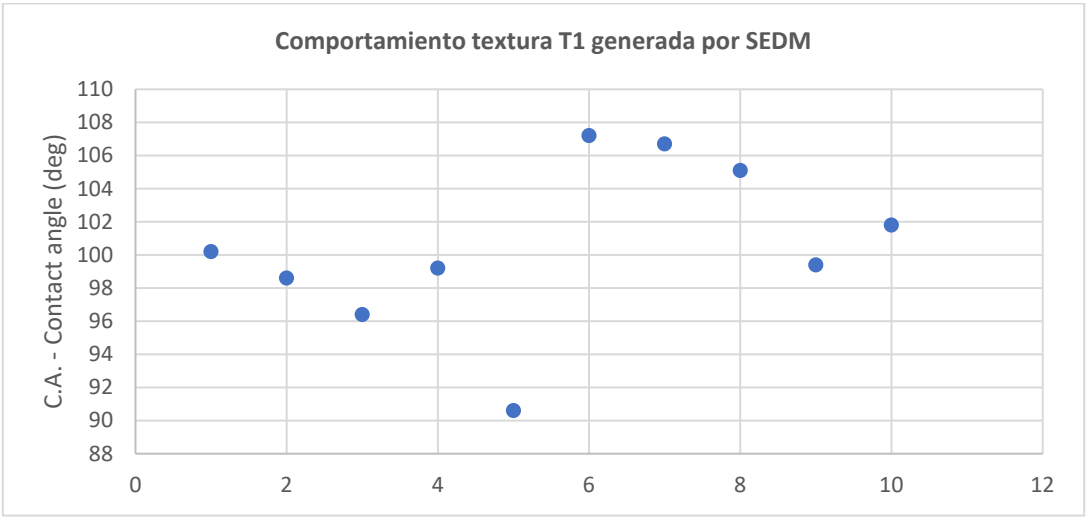


Figura 6.35. Representación gráfica de los valores medios en la textura de piel de tiburón generada mediante SEDM.

Se observa que, aunque la textura T1 presenta inicialmente valores alrededor de 35° en la pieza modelo, tras someterla al proceso de electroerosión, estos valores se modifican, transformándose en una superficie con propiedades hidrofóbicas. Este hallazgo plantea la interrogante sobre si, al aplicar la textura mediante electroerosión, la relevancia de la propia textura se ve superada por la rugosidad inducida durante el proceso SEDM, o si el material empleado también influye en el comportamiento final. En consecuencia, en el siguiente apartado se llevará a cabo un análisis detallado para evaluar conjuntamente la influencia del material y la rugosidad en el rendimiento hidrofóbico.

6.2.5.2. Influencia del material en la texturización de superficies

Una de las observaciones que tuvieron lugar durante el estudio del ángulo de contacto fue la gran variabilidad del comportamiento de la textura según el material, concretamente la textura generada en la pieza modelo, en la pieza de resina y la textura generada por electroerosión en la pieza de aluminio. Esto fue más evidente en la textura de piel de tiburón cuyo objetivo al realizar su diseño era obtener un comportamiento hidrofóbico. Es por ello por lo que se ha realizado un estudio genérico para determinar según los autores y sus estudios, como puede influir la textura y el material, cuando se generan texturizados, respondiendo así a la pregunta de investigación:

"En la texturización de superficies combinando diferentes procesos de fabricación, ¿qué aspecto tiene más influencia "la textura o el material"?"

Partiendo de los autores Cassie y Baxter como referentes en el estudio del ángulo de contacto, se puede observar como ya en esa época los autores sugieren que incluso los materiales hidrofílicos pueden volverse hidrofóbicos con la correcta combinación de textura, lo que indica que, aunque el material es importante, la textura puede anular su influencia bajo ciertas condiciones.

Años más tarde autores como Bico et al. examinaron diferentes materiales, como el vidrio y el aluminio, texturizados con patrones idénticos [49]. Se encontró que, aunque el ángulo de contacto inicial era mayor en el vidrio debido a su naturaleza más hidrófoba, una texturización adecuada aumentó la hidrofobicidad del aluminio a niveles comparables al vidrio. Este estudio sugiere que la textura puede tener un mayor impacto que el material base, dependiendo del patrón empleado.

En la misma línea, Wang et al. investigaron el comportamiento hidrofóbico en materiales como el polímero de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y el silicio [50]. Al aplicar el mismo patrón de microtextura, se descubrió que el PVDF mostraba mejores propiedades hidrofóbicas debido a sus propiedades de baja energía superficial. Este hallazgo respalda la idea de que, aunque la textura puede mejorar la hidrofobicidad, los materiales con baja energía superficial tienden a exhibir una mayor hidrofobicidad en comparación con aquellos con una energía superficial alta, como el silicio.

Yendo a un ejemplo práctico de hidrofobicidad tenemos también el conocido "efecto loto", el cual ha sido ampliamente estudiado en diversas superficies y texturas. Según Barthlott y Neinhuis, la combinación de microtexturas y materiales hidrofóbicos es lo que genera superficies extremadamente repelentes al agua, como las hojas de loto. Este estudio utilizó materiales como polímeros y silicio y encontró que, aunque la textura micrométrica fue clave, los materiales con propiedades hidrofóbicas mostraron un mejor rendimiento [51].

Shiu et al. replicaron este estudio utilizando nanotexturas en diferentes sustratos como el silicio y el polietileno [52]. El hallazgo principal fue que, aunque la nanotextura incrementó la hidrofobicidad en todos los materiales, el polietileno, con su baja energía superficial, mostró una mayor capacidad para mantener gotitas de agua esféricas y resistentes al deslizamiento. De este modo, se concluyó que la combinación de una baja energía superficial con texturas adecuadas optimiza la hidrofobicidad.

Por otra parte, el trabajo de Zheng et al. reveló que la escala de la textura (micro vs. nano) tiene un impacto directo sobre la hidrofobicidad [53]. En este estudio, se aplicó la misma textura tanto a superficies metálicas como poliméricas, y se concluyó que las texturas en la escala nanométrica producen una mayor resistencia al agua en comparación con las texturas en la escala micrométrica. Este resultado fue consistente en materiales con baja energía superficial, como el polímero de fluoropolímero, y en materiales de alta energía superficial como el aluminio, lo que refuerza la idea de que la textura tiende a tener mayor influencia que el material, especialmente cuando se trabaja a nanoescala.

En una revisión más reciente, Lafuma y Quéré exploraron la relación entre la energía superficial del material y el patrón de textura aplicado [54]. Se demostró que los materiales con alta energía superficial (como el vidrio o el acero inoxidable) requieren texturas más complejas para alcanzar niveles comparables de hidrofobicidad en comparación con los materiales de baja energía

superficial (como los polímeros fluorados). Aunque las texturas nanométricas lograron aumentar significativamente el ángulo de contacto en ambos tipos de materiales, los materiales de baja energía superficial mostraron mejores resultados.

En resumen, la hidrofobicidad de una superficie es el resultado de la interacción entre la textura y las propiedades del material. Sin embargo, en la mayoría de los estudios revisados, parece que la textura tiene una mayor influencia que el material, especialmente cuando se trabaja a escala nanométrica. No obstante, la energía superficial del material sigue siendo un factor importante, ya que materiales con baja energía superficial como los polímeros fluorados tienden a mostrar una mayor hidrofobicidad incluso antes de la texturización. Aun así, la combinación de una textura adecuada con materiales de baja energía superficial suele producir los mejores resultados.

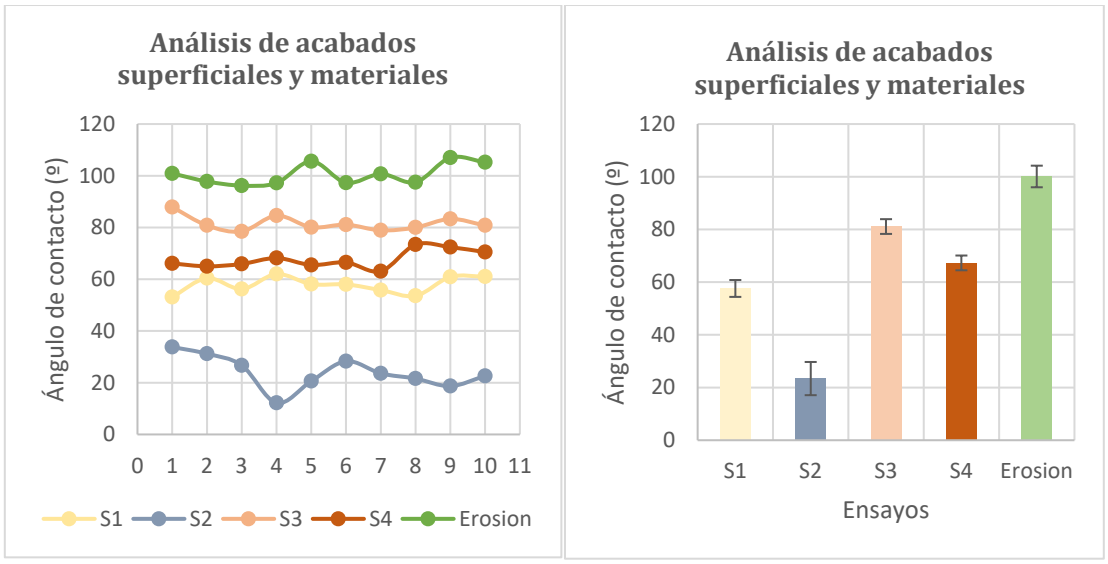
6.2.5.3. Comparativa entre material y acabado superficial

El objetivo principal de este estudio es analizar y comparar la influencia relativa del material base y del texturizado sobre las propiedades funcionales de las superficies, específicamente en relación con el ángulo de contacto. Se busca determinar si las características inherentes del material (como su composición y propiedades intrínsecas) tienen un impacto predominante o si, por el contrario, la textura inducida mediante el diseño o procesos de fabricación, como el granallado o la impresión 3D, resulta ser el factor decisivo en el comportamiento final de la superficie.

Para ello se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales. Estas pruebas incluyeron la evaluación de cinco tipos de superficies que diferían tanto en el tipo de material empleado como en el acabado superficial. Los ensayos se diseñaron para determinar si la textura inducida en los procesos iniciales, como la impresión 3D o el granallado, mantiene su funcionalidad o sufre modificaciones tras ser sometida al proceso de electroerosión por penetración. Este análisis tiene implicaciones directas en el diseño y fabricación de piezas funcionales con propiedades controladas, como superficies hidrofóbicas o hidrófilas.

Los ensayos del estudio de ángulo de contacto se realizaron con las diferentes muestras y se tomaron 10 valores para cada uno como se observa en la Figura 6.36:

1. **Superficies de las piezas modelo (S1 y S2):** Se fabricaron dos tipos de piezas modelo:
    - S1: Superficie base sin textura adicional, que representa las características iniciales del material generado por fabricación aditiva.
    - S2: La misma pieza modelo fue sometida a un proceso de granallado para modificar su acabado superficial, generando una superficie más rugosa con micro texturas que pueden alterar el ángulo de contacto.
2. **Material de la pieza mecanizada (S3 y S4):** Se utilizó aluminio 7010 como material a erosionar en el proceso de SEDM. Para este material se evaluaron:
    - S3: Aluminio con superficie pulida, representando una condición inicial sin texturas adicionales.
    - S4: Aluminio sometido a un proceso de granallado para obtener un acabado superficial rugoso.
3. **Superficies erosionadas en AL7010 con rugosidad de 2 µm (Erosión):** Finalmente, se estudió el acabado superficial resultante tras el proceso de electroerosión. Esta etapa tenía como objetivo comprender cómo el texturizado inicial y las características del material influían en la superficie final erosionada.



a) b)

Figura 6.36. Gráficas donde se ilustran: a) los valores obtenidos para cada textura en términos de ángulo de contacto; b) así como los valores promedios y desviaciones estándar.

El análisis de los valores promedio de ángulo de contacto (en grados) y sus desviaciones estándar, medidos para las diferentes superficies (S1, S2, S3, S4 y Erosión), permite evaluar cómo influyen tanto el material base como el texturizado superficial en el comportamiento de humectabilidad. A continuación, se analizan las características principales de cada grupo y se compara su influencia relativa.

1) Superficies Modelo (S1 y S2)

- **S1 (Modelo sin textura):** El ángulo de contacto promedio para la superficie base sin texturizado es de 57.6° ± 3.2. Este valor representa un comportamiento moderadamente hidrofílico, lo cual es consistente con las propiedades de una superficie relativamente lisa obtenida mediante impresión 3D sin tratamientos adicionales.
- **S2 (Modelo granallado):** Al aplicar un proceso de granallado, el ángulo de contacto disminuye drásticamente a 23.4° ± 6.3, indicando una superficie significativamente más hidrofílica. Este cambio demuestra que la rugosidad generada por el granallado promueve la adhesión del agua al generar una mayor interacción entre la superficie y el líquido. La mayor desviación estándar sugiere que el proceso de granallado puede haber generado variaciones en la textura que afectan la homogeneidad del ángulo de contacto.

Si se realiza una comparativa entre estas dos superficies, se observa que la disminución del ángulo de contacto en más de un 59% evidencia que el texturizado superficial tiene una influencia muy significativa en las propiedades de humectabilidad de la pieza modelo, superando la influencia del material base en este caso.

2) Superficies de AL7010 (S3 y S4)

- **S3 (Aluminio granallado):** Con un ángulo de contacto promedio de 81.1° ± 2.8, la superficie de aluminio granallado presenta un comportamiento más hidrofóbico en comparación con las superficies de resina, incluso tras el tratamiento.
- **S4 (Aluminio pulido):** El aluminio pulido muestra un ángulo de contacto promedio de 67.3° ± 2.8, evidenciando un comportamiento ligeramente más hidrofílico que el del aluminio granallado. Este resultado puede explicarse por la menor rugosidad de la superficie pulida, reduciendo la influencia de las irregularidades superficiales.

- **Superficie Erosionada (Erosión):** La superficie erosionada presenta el ángulo de contacto más alto de todos los casos estudiados (100.1° ± 4.1), indicando un comportamiento marcadamente hidrofóbico. Este comportamiento puede atribuirse a la microestructura única generada por el proceso de electroerosión por penetración (SEDM), donde la solidificación rápida del material fundido y el posible depósito de subproductos modifican la topografía y la energía superficial de la muestra.

Al integrar los resultados, emergen tendencias claras:

- **Efecto del material:** Las superficies de aluminio (S3 y S4) presentan, en general, ángulos de contacto más altos que las superficies de resina (S1 y S2), lo que demuestra que la tensión superficial del material es un factor determinante en el comportamiento de humectabilidad.
- **Efecto del acabado superficial:** El granallado genera una disminución notable en el ángulo de contacto de las superficies de resina, pero incrementa el ángulo en las superficies de aluminio, resaltando que el impacto del acabado superficial resultante de este proceso de fabricación depende en gran medida de la naturaleza del material base.
- **Superficie erosionada**: La superficie resultante del SEDM presenta propiedades únicas, significativamente más hidrofóbicas que las de las superficies iniciales, independientemente del material o tratamiento previo. Esto sugiere que las propiedades finales de las superficies erosionadas no solo dependen del material base ni del texturizado inicial, sino también de las condiciones específicas del proceso de mecanizado.

Este análisis resalta la importancia de considerar tanto las propiedades intrínsecas del material como los tratamientos superficiales y procesos posteriores al evaluar el desempeño funcional de las superficies. En aplicaciones donde la funcionalidad de la superficie es crítica, será esencial controlar y optimizar estos parámetros para garantizar que las propiedades finales cumplan con los requisitos establecidos.

6.2.5.4. Caracterización de las piezas erosionadas

Una vez concluidos los ensayos de electroerosión por penetración con los electrodos electroconformados, se realizó un estudio exhaustivo enfocado en caracterizar integralmente la calidad superficial de las piezas de aluminio 7017 obtenidas. Este análisis no solo consideró aspectos visuales y metrológicos basados en parámetros de rugosidad superficial, sino que también incorporó un estudio adicional del comportamiento funcional de la superficie a través de la medición del ángulo de contacto.

El propósito de esta caracterización fue triple: primero, verificar si los niveles de rugosidad obtenidos (Ra) se ajustaban a la especificación técnica inicial, representada por el valor teórico de rugosidad tipo VDI 20, ampliamente utilizado como referencia en procesos industriales de microtexturizado mediante SEDM; segundo, determinar el grado de fidelidad geométrica en la replicación de las microtexturas desde los electrodos hacia las superficies erosionadas; y tercero, evaluar cómo estas texturas afectaban al comportamiento funcional de la superficie, empleando el ángulo de contacto como parámetro indicador clave para estudiar la interacción superficial con líquidos, particularmente en términos de hidrofobicidad o humectabilidad.

Además, se consideró esencial realizar una comparativa directa entre estos resultados actuales de Ra y los obtenidos en las primeras etapas del estudio, llevadas a cabo previamente en la Universidad de Cádiz, permitiendo así cuantificar el efecto de las mejoras introducidas en las etapas intermedias del proyecto.

6.2.5.4.1. Metodología y equipamiento

Primeramente, se llevó a cabo un estudio del ángulo de contacto. Estos datos proporcionan información clave sobre las propiedades funcionales, tales como la hidrofobicidad o humectabilidad, directamente relacionadas con la eficacia potencial de las texturas aplicadas.

Para complementar este análisis cuantitativo y verificar visualmente la calidad geométrica de la textura transferida al aluminio, se recurrió al microscopio de fluorescencia Olympus BX51. Este equipo permitió la obtención de imágenes en alta resolución de las zonas erosionadas, facilitando así un análisis visual detallado y validación geométrica.

Por último, de manera complementaria, para entender el comportamiento de la superficie en el estudio del ángulo de contacto, se realiza una caracterización de la rugosidad superficial, empleando un rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-201, calibrado conforme a la norma ISO 1997, configurado con perfil R y filtro 2CR75 (Figura 6.37).

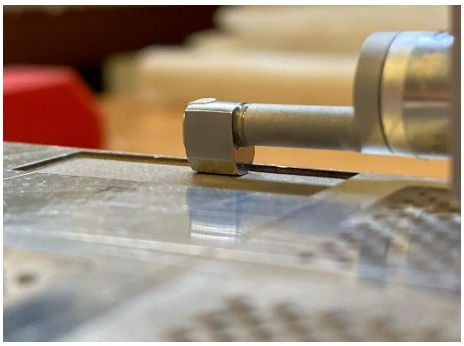


Figura 6.37. Zonas de medición de las texturas erosionadas.

Se aplicaron dos valores diferentes de longitud de corte o cut-off, 2,5 mm (con tres longitudes de muestreo) y 0,8 mm (con cinco longitudes de muestreo), para capturar tanto las irregularidades a escala macroscópica como los detalles microestructurales más finos. Para asegurar la representatividad estadística, se efectuaron cuatro mediciones distribuidas estratégicamente en diferentes áreas planas del área erosionada, correspondientes a los bordes y centros característicos de cada textura (Figura 6.38).

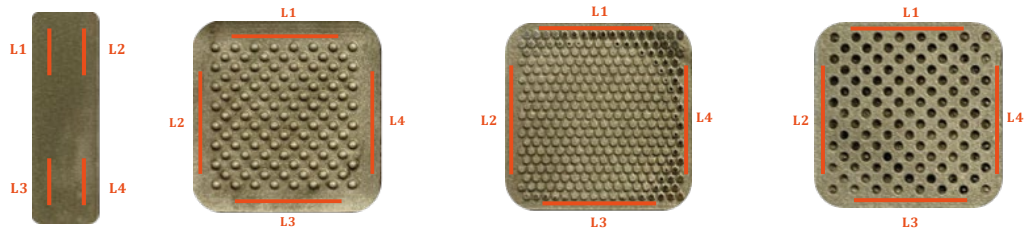


Figura 6.38. Zonas de medición de las texturas erosionadas: a) Electrodo macizo; b) EMT_SE_BR_1; c) EMT_TIB_1; d) EMT_SE_SR_1.

El parámetro principal analizado fue la rugosidad media aritmética (Ra), a partir del cual se calcularon los valores de VDI mediante la siguiente expresión:

$$\textit{Grado VDI} = 20 \times \log (10 \times Ra)$$

donde Ra se expresa en micras [384].

Este enfoque metodológico integral asegura una caracterización completa de las superficies erosionadas, combinando parámetros metrológicos clásicos con análisis funcionales específicos, ofreciendo así una visión global del desempeño técnico de los electrodos electroconformados y proporcionando información valiosa para futuras optimizaciones y aplicaciones industriales.

Resultados sobre el comportamiento funcional de la superficie

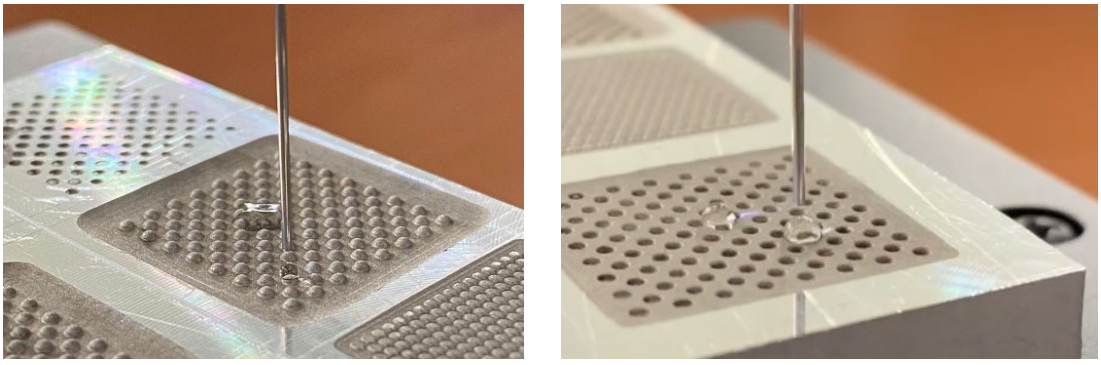
Se realizó un estudio adicional del comportamiento funcional de las superficies texturizadas generadas por SEDM, específicamente analizando el ángulo de contacto. Este parámetro es crucial para determinar propiedades funcionales como la hidrofobicidad o hidrofília, directamente relacionadas con la funcionalidad prevista para cada textura.

Tal como se describió previamente en el capítulo 4, se esperaba que las texturas con elementos en relieve, especialmente la textura biomimética inspirada en la piel de tiburón, presentasen un comportamiento claramente hidrofóbico debido a su función natural de repeler agua y facilitar el desplazamiento del animal en medios acuáticos. Por otro lado, las texturas diseñadas en bajo relieve deberían mostrar un comportamiento hidrofílico, promoviendo una mayor retención de líquidos.

Previo al estudio, se formuló la siguiente pregunta de investigación:

"¿Influye más la rugosidad superficial producida por el proceso de electroerosión que la propia textura generada intencionalmente sobre el comportamiento funcional de la superficie?"

Con este objetivo, se evaluó el ángulo de contacto usando gotas de agua sobre las superficies texturizadas (Figura 6.39).



a) b)

Figura 6.39. Fotografía de la gota sobre la superficie erosionada: a) textura sobre relieve; b) textura bajo relieve.

En la Tabla 6.27 se presentan detalladamente los resultados obtenidos del ángulo de contacto medido en cada una de las superficies texturizadas.

Tabla 6.27. Resultados del ángulo de contacto de las texturas erosionadas.

Textura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)
SB	78.9	55.7	66.5	82.8	82.76	79.5	79.3	79.5	54.1	81.8	**73.5**	**11.0**
TIB	113.1	106.6	105.1	103.2	117.73	111.0	88.4	82.9	86.7	94.7	**100.5**	**12.2**
SS	110.0	109.5	98.9	101.4	109.70	98.4	107.3	107.1	105.5	101.4	**104.5**	**4.6**

Los resultados muestran claramente comportamientos diferenciales según el tipo de textura. La textura en bajo relieve (SB) presentó valores promedio de ángulo de contacto de aproximadamente 73,5°, indicando un comportamiento moderadamente hidrofílico, consistente con su diseño inicial

para retener líquidos. Sin embargo, se observó una ligera elevación en los valores en comparación con las mediciones anteriores realizadas en las piezas modelo, sugiriendo que la rugosidad adicional generada por el proceso de erosión puede aumentar ligeramente la hidrofobicidad de la superficie, reduciendo su capacidad para retener líquidos en comparación con una superficie perfectamente lisa.

Por su parte, las texturas en relieve (TIB y SS) mostraron valores de ángulo de contacto claramente hidrofóbicos, alcanzando valores promedio superiores a los 100°. En particular, la textura biomimética de piel de tiburón (TIB) presentó una dispersión relativamente mayor (12,2°), reflejando una mayor sensibilidad a irregularidades superficiales y variaciones puntuales del proceso de erosión. La textura de semiesferas en relieve (SS), con un promedio más estable (104,5°) y menor desviación estándar (4,6°), confirmó un comportamiento altamente hidrofóbico debido probablemente al efecto combinado de la geometría de la textura y la rugosidad generada por la electroerosión.

Estos resultados sugieren dos conclusiones clave. En primer lugar, se valida que la textura diseñada intencionalmente ejerce un papel predominante en definir el comportamiento superficial esperado. Además, la rugosidad superficial inducida por el proceso SEDM puede tener una influencia significativa modulando el comportamiento final; incrementando la hidrofobicidad en superficies con elementos en relieve y reduciendo la hidrofilia esperada en texturas bajo relieve.

Estos hallazgos destacan la importancia de considerar no solo la textura diseñada, sino también el acabado superficial generado por los procesos de fabricación para alcanzar comportamientos funcionales específicos, lo que establece bases sólidas para futuras investigaciones y optimizaciones en aplicaciones industriales que requieran control preciso de propiedades superficiales.

6.2.5.4.2. Resultados de la inspección visual

En la Figura 6.40 se muestran imágenes representativas de las superficies erosionadas con los tres electrodos. Visualmente, se observa una buena replicación de las texturas diseñadas, especialmente en los casos de EMT_TIB_1 y EMT_SE_SR_1, que muestran patrones bien definidos y alta fidelidad geométrica. Por el contrario, EMT_SE_BR_1 evidencia un defecto asociado a la fabricación inicial de la semiesfera entrante, lo que ha repercutido negativamente en la reproducción de dicha geometría en la pieza final.



a) b) c)

Figura 6.40. Pieza de aluminio 7017 erosionada: a) erosión EMT_SE_BR_1; b) erosión EMT_TIB_1; c) erosión EMT_SE_SR_1

El análisis conjunto de los parámetros de rugosidad y la inspección visual permiten concluir que el proceso de fabricación de electrodos mediante tecnología MSLA y electroconformado es capaz de generar superficies erosionadas con un alto nivel de precisión y replicabilidad, alcanzando valores de rugosidad comparables, e incluso inferiores en algunos casos, a los obtenidos por medios convencionales. Las mejoras introducidas a lo largo del proceso, como el refuerzo de cáscaras, la limpieza asistida y el cambio de equipo de impresión, han repercutido positivamente en la calidad final de las texturas erosionadas.

Asimismo, los resultados de VDI obtenidos validan el proceso como una alternativa eficaz para aplicaciones donde se exige una texturización superficial precisa. Aunque se identifican ligeras desviaciones respecto al valor teórico, estas pueden ser corregidas con ajustes adicionales en los parámetros de erosión.

En resumen, este estudio demuestra la solidez del enfoque propuesto en la presente tesis para la generación de superficies funcionales por SEDM, ofreciendo un equilibrio entre precisión geométrica, eficiencia del proceso y calidad superficial.

6.2.5.4.3. Resultados sobre la rugosidad superficial

A continuación, se presentan en detalle los resultados obtenidos mediante el rugosímetro, agrupados según el tipo de textura generada. Para las texturas EMT_TIB_1 y EMT_SE_SR_1, además, se realiza una comparación exhaustiva entre los resultados actuales obtenidos en la ULPGC y los datos procedentes del primer estudio realizado en la Universidad de Cádiz.

- **Textura EMT_SE_BR_1 (semiesferas en bajo relieve)**

La textura EMT_SE_BR_1, evaluada únicamente en este último estudio, presenta valores de rugosidad media (Ra) comprendidos entre 2,46 µm y 3,32 µm para cut-off de 2,5 mm, y entre 2,29 µm y 2,46 µm para cut-off de 0,8 mm (Tabla 6.28). Estos resultados indican una rugosidad moderada que refleja con precisión la intención del proceso de obtener texturas definidas y uniformes. La baja variación entre las distintas mediciones indica un comportamiento consistente del electrodo durante las pasadas sucesivas, mostrando una alta estabilidad dimensional.

Tabla 6.28. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_SE_BR_1.

Parámetros	L1		L2		L3		L4	
Cutt-off	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8
Ra	2.96	2.46	3.32	2.31	2.46	2.29	2.72	2.35

- **Textura EMT_TIB_1 (Textura bioinspirada de piel de tiburón)**

Esta textura muestra un comportamiento similar entre las pruebas iniciales realizadas en Cádiz y los resultados recientes obtenidos en la ULPGC (Tabla 6.29). En el primer estudio los valores de Ra para el cut-off de 2,5 mm oscilaron entre 1,90 µm y 2,38 µm, mientras que para cut-off de 0,8 mm los valores variaron entre 1,77 µm y 1,93 µm. En el estudio más reciente los valores de Ra se mantienen en rangos comparables, pero con un ligero incremento, alcanzando valores entre 1,99 µm y 2,50 µm para cut-off de 2,5 mm y entre 1,97 µm y 2,14 µm para cut-off de 0,8 mm.

Tabla 6.29. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_TIB_1.

Prueba	Parámetros	L1		L2		L3		L4	
	Cutt-off	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8
1º (UCA)	Ra	2.15	1.93	1.90	1.89	1.92	1.82	2.38	1.77
2º (ULPGC)	Ra	2.50	2.14	2.37	1.99	2.07	1.97	1.99	2.07

- **Textura EMT_SE_SR_1 (Semiesferas en sobre relieve)**

La comparación entre los estudios realizados muestra consistencia y estabilidad en los valores obtenidos, con ligeras variaciones que reflejan robustez en la textura (véase Tabla 6.30). Los valores recientes de Ra oscilan entre 2,00 µm y 2,16 µm (cut-off de 2,5 mm) y entre 2,10 µm y 2,29 µm (cut-off de 0,8 mm), indicando una alta repetibilidad en la replicación superficial.

Tabla 6.30. Parámetros de la superficie erosionada de la textura EMT_SE_SR_1.

Prueba	Parámetros	L1		L2		L3		L4	
	Cutt-off	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8
1º (UCA)	Ra	2.50	1.92	2.70	2.29	3,00	2.49	2.16	2.12
2º (ULPGC)	Ra	2,00	2.10	2.05	2.29	2.15	2.12	2.16	2.12

- **Comparativa general de rugosidad media (Ra)**

En la Tabla 6.31 se presentan los valores medios de Ra para las distintas texturas estudiadas, además de un electrodo macizo de cobre mecanizado convencionalmente que sirve como referencia.

Tabla 6.31. Valores medios de Ra para los diferentes ensayos SEDM realizados en la ULPGC.

Parámetros	Cobre macizo		EMT_SE_BR_1		EMT_TIB_1		EMT_SE_SR_1	
Cutt-off	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8	2,5	0,8
Ra	1,94	1,92	2,87	2,35	2,23	2,04	2,09	2,16

Los resultados reflejan valores de rugosidad ligeramente superiores en las superficies generadas mediante electrodos electroconformados en comparación con el electrodo mecanizado convencionalmente. Esta diferencia puede explicarse por la metodología empleada para la medición, dado que las mediciones se efectuaron en zonas próximas a los cambios de nivel de las texturas, originados por las diferentes alturas de capa del proceso de impresión 3D de las piezas modelo. Estas zonas tienden a presentar una rugosidad mayor en comparación con las superficies completamente lisas del electrodo mecanizado, lo que incrementa ligeramente los valores obtenidos.

Adicionalmente, en la Tabla 6.32 se presentan los grados VDI calculados a partir de los valores de Ra obtenidos:

Tabla 6.32. Valores de VDI obtenidos a partir de las Ra para los diferentes ensayos SEDM realizados en la ULPGC.

VDI	Cobre macizo	EMT_SE_BR_1	EMT_TIB_1	EMT_SE_SR_1
Teórico	20	20	20	20
Obtenido (cut-off 2.5 mm)	26	29	27	26
Obtenido (cut-off 0.8 mm)	26	27	26	27

Los valores obtenidos resultaron superiores al valor teórico VDI 20 previsto inicialmente. Esta desviación podría atribuirse a múltiples factores, como el atrapamiento de partículas metálicas generadas durante la erosión. Cabe destacar también que, durante las pruebas iniciales realizadas en la Universidad de Cádiz, no existía una tabla específica VDI para combinaciones Cu-Al, sino que se utilizó una tabla originalmente elaborada para combinaciones Cu-St. Al aplicar estos parámetros, pensados inicialmente para acero (material más duro y menos erosionable), al aluminio (material más blando y más fácilmente erosionable), se incrementó la agresividad del proceso de erosión, eliminando más material del previsto y generando, en consecuencia, superficies con un acabado superficial ligeramente más rugoso del esperado.

6.3. Impacto económico del proceso

Uno de los aspectos más destacables del proceso desarrollado en esta investigación es su impacto económico positivo en la fabricación de electrodos microtexturizados para procesos de electroerosión por penetración. Si bien la mayor parte de la validación técnica de este trabajo se ha

centrado en la fidelidad geométrica, la calidad superficial y el comportamiento funcional de las superficies obtenidas, resulta igualmente relevante destacar el valor estratégico que aporta esta metodología desde una perspectiva de eficiencia productiva y reducción de plazos operativos.

El procedimiento híbrido propuesto, basado en la combinación de impresión 3D de alta resolución, metalización conductiva y electroconformado, permite acortar de forma significativa los tiempos de entrega asociados a la fabricación de herramientas microtexturizadas. A diferencia de los métodos convencionales, que habitualmente requieren complejas operaciones de mecanizado, este enfoque elimina varias de las etapas críticas y altamente especializadas del proceso tradicional. Esto se traduce en una cadena de producción más eficiente, con menor dependencia de equipamiento específico y de operadores altamente cualificados para cada fase.

En escenarios prácticos, el proceso completo (desde el diseño del modelo hasta la disponibilidad funcional del electrodo) puede completarse en un margen temporal de entre uno y dos días, en función de la complejidad geométrica de la textura requerida. Para geometrías sencillas, la planificación y ejecución de todas las fases (diseño, impresión, postprocesado, metalización, electroconformado y refuerzo) puede organizarse de manera tal que al día siguiente el cliente disponga del electrodo completamente funcional, listo para ser empleado en operaciones de texturizado por SEDM. Este ritmo de producción representa una ventaja sustancial frente a alternativas habituales, donde los tiempos de mecanizado, la necesidad de múltiples utillajes, la programación CNC específica y la validación intermedia suelen multiplicar esos plazos de forma muy notable.

Otro aspecto que refuerza el valor económico del método es su flexibilidad. Al apoyarse en tecnologías digitales como el diseño CAD y la fabricación aditiva, la adaptación a nuevos diseños o modificaciones de última hora no implica reprocesos costosos ni pérdidas materiales considerables. La posibilidad de iterar sobre el diseño sin necesidad de reconvertir maquinaria o reprocesar piezas metálicas completas permite una respuesta rápida ante cambios de requisitos o personalización de patrones microtexturizados según las necesidades funcionales del cliente.

Asimismo, la automatización parcial del proceso contribuye a reducir los tiempos muertos entre etapas. Por ejemplo, el postprocesado de la pieza modelo y la fase de refuerzo de la cáscara pueden planificarse para ejecutarse fuera del horario productivo, optimizando así el uso de los recursos disponibles y maximizando la productividad sin requerir turnos adicionales ni supervisión continua. Este enfoque permite además una planificación eficiente en contextos de baja o media producción, donde los costes asociados a paradas técnicas o ajustes manuales pueden impactar significativamente en la rentabilidad global.

Desde una perspectiva cualitativa, este proceso no solo implica una aceleración en los tiempos de entrega, sino también una mejora en la trazabilidad y el control de calidad. La posibilidad de validar digitalmente el modelo CAD, reproducirlo con precisión mediante impresión 3D y obtener un molde metálico funcional con mínima intervención humana reduce la probabilidad de errores acumulativos y facilita la estandarización del procedimiento. En consecuencia, el proceso favorece una producción ágil y fiable, con menor variabilidad y mayor previsibilidad en los resultados.

En conjunto, estos factores posicionan al método propuesto como una alternativa altamente competitiva frente a las estrategias tradicionales de fabricación de herramientas microtexturizadas. Su capacidad para ofrecer electrodos funcionales en plazos reducidos, con bajo consumo de recursos y elevada fidelidad geométrica, representa una aportación significativa en términos de eficiencia productiva, adaptabilidad y respuesta al cliente. Si bien este capítulo ha puesto énfasis en la validación técnica del proceso, resulta innegable que su estructura operativa conlleva un impacto económico positivo que puede marcar la diferencia en contextos donde los tiempos de entrega, la personalización y la agilidad sean factores determinantes.

6.4. Conclusiones

En este capítulo se han abordado diferentes estudios experimentales orientados a mejorar significativamente la precisión dimensional y la calidad superficial de los electrodos microtexturizados generados para electroerosión por penetración. Estos estudios han aportado información valiosa, permitiendo identificar, caracterizar y controlar las principales fuentes de error y las variables críticas que inciden en la calidad final de las herramientas producidas.

El primer estudio se centró en la acumulación de errores durante las distintas fases del proceso de fabricación de electrodos electroconformados. Se concluyó que la etapa de fabricación aditiva mediante tecnología MSLA es la principal fuente de desviación dimensional, con errores particularmente notorios en geometrías complejas y elementos pequeños debido a las limitaciones inherentes a la resolución de la impresora 3D empleada. Este análisis permitió evidenciar que las cáscaras electroconformadas, en contraste, poseen una excelente capacidad de replicabilidad dimensional, conservando fielmente las características del modelo impreso.

El segundo estudio tuvo como objetivo optimizar la calidad de las piezas modelo mediante la incorporación de un nuevo equipo de impresión con resolución mejorada (Phrozen Mini 8K) y la implementación de diferentes protocolos de limpieza. Los resultados obtenidos demostraron mejoras significativas en la precisión geométrica, con reducciones del error dimensional promedio superiores al 90 % en ciertos parámetros críticos como la profundidad y diámetro de las microestructuras. La introducción de una limpieza asistida con lavado ultrasónico y el empleo de alturas de capa menores (25 µm) resultaron determinantes para alcanzar altos niveles de precisión dimensional, evidenciando así que un control estricto del proceso de postprocesado es esencial para asegurar la calidad superficial y funcionalidad final de las piezas generadas.

El tercer estudio consistió en evaluar el desempeño funcional de los electrodos electroconformados reforzados y utilizados como herramientas activas en procesos reales de SEDM. La incorporación de un soporte estructural mediante masilla epóxica mostró ser fundamental no solo para garantizar la rigidez estructural necesaria sino también para mantener la alineación precisa entre la superficie texturizada del electrodo y el portaherramientas. Se detectaron pequeños errores angulares, que, aunque mínimos, destacaron la importancia de realizar el refuerzo antes de extraer las cáscaras de la pieza modelo, evitando deformaciones que pudieran repercutir negativamente en la calidad del proceso de erosión.

Adicionalmente, la caracterización metrológica final de las piezas erosionadas permitió corroborar la efectividad del proceso completo. Las mediciones cuantitativas de rugosidad superficial y la comparación con valores teóricos de VDI demostraron que los electrodos electroconformados permiten obtener acabados superficiales consistentes, alcanzando valores muy cercanos a las especificaciones requeridas, especialmente tras implementar mejoras en la impresión y limpieza. Los estudios visuales con microscopía de alta resolución reafirmaron estos resultados, mostrando texturas claramente definidas y una transferencia efectiva y precisa de las microestructuras.

En conclusión, los estudios experimentales realizados en este capítulo han permitido consolidar un método eficaz y económicamente viable para la fabricación de electrodos microtexturizados mediante la combinación de tecnologías avanzadas como fabricación aditiva y electroconformado. Las mejoras introducidas en cada etapa del proceso han resultado en avances notables, logrando una mayor precisión dimensional, una reducción significativa en la acumulación de errores y un rendimiento funcional robusto y confiable.

Paralelamente, el diseño de superficies funcionales fue evaluado a través del análisis del ángulo de contacto, un parámetro crítico para caracterizar la humectabilidad y la adhesión superficial. En este sentido, se ha constatado que texturas con mayor densidad de elementos y menor diámetro de semiesferas (como las configuraciones S2, S6 y S7) promueven una notable reducción del ángulo de contacto, favoreciendo comportamientos hidrofílicos en línea con el modelo de Wenzel. Esto coincide con estudios previos que destacan la utilidad de las microtexturas biomiméticas en ingeniería de superficies [26,31,38].

Asimismo, se evidencia que las características hidrofílicas de las piezas modelo se verán alteradas en las herramientas finales debido a cambios en material, rugosidad o desgaste, por lo que es imprescindible realizar un diseño considerando esta posible variabilidad.



CAPÍTULO VII

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

A lo largo de esta tesis doctoral se ha desarrollado una investigación exhaustiva y multidisciplinar en torno a la fabricación de electrodos microtexturizados mediante la combinación de tecnologías de fabricación aditiva y electroconformado, con aplicación directa en procesos de electroerosión por penetración. Los resultados obtenidos, tanto en las fases de diseño, fabricación y caracterización como en la validación funcional mediante pruebas de mecanizado, permiten extraer un conjunto de conclusiones integradas que reflejan los logros alcanzados y la solidez del enfoque planteado. Asimismo, el análisis crítico del trabajo realizado ha permitido identificar oportunidades de mejora y posibles líneas de desarrollo futuro, que se presentan a continuación de manera estructurada.

7.1. Conclusiones

En primer lugar, cumpliendo con el **primer objetivo**, se ha establecido un marco conceptual sólido que justifica la combinación de tres procesos clave: la fabricación aditiva de alta resolución (MSLA), el electroconformado de cobre como técnica de replicación metálica precisa, y la electroerosión por penetración como método de transferencia funcional de texturas. El análisis de sus fundamentos, sinergias y limitaciones permitió identificar oportunidades de mejora sustancial respecto a los métodos tradicionales de fabricación de electrodos.

La tecnología MSLA se confirmó como una solución eficaz para generar piezas modelo con microtexturas geométricamente complejas, mostrando alta versatilidad de diseño y buena calidad de definición superficial. No obstante, se identificaron diversos desafíos que se tuvieron que tener en consideración debido a las características del proceso de electroconformado.

El electroconformado demostró ser una técnica capaz de replicar fielmente las texturas generadas en las piezas modelo poliméricas, siempre que se mantenga un control riguroso de los parámetros críticos del proceso. Su carácter aditivo, junto con la posibilidad de obtener estructuras de cobre con integridad propia sin necesidad de mecanizado posterior, refuerza su potencial como tecnología con gran potencial para la fabricación de herramientas metálicas microestructuradas.

Finalmente, se validó la capacidad de los electrodos fabricados mediante esta metodología para su aplicación en SEDM. Los resultados experimentales confirmaron que estos electrodos presentan un comportamiento mecánico estable, una adecuada capacidad de transferencia de textura y un desgaste controlado durante el mecanizado.

Desde una perspectiva integral, se concluye que la combinación estratégica de estas tres tecnologías permite explotar las ventajas específicas de cada proceso, maximizando sus fortalezas y compensando sus limitaciones individuales. Esta sinergia tecnológica ha facilitado la fabricación de electrodos microtexturizados de alta precisión, capaces de replicar microestructuras a escalas casi inalcanzables mediante el mecanizado convencional y, además, de hacerlo de una manera más eficiente y sostenible, verificando así la **primera hipótesis** de esta investigación y cumpliendo el **segundo objetivo**. La posibilidad de crear texturas funcionales y superficies complejas de forma controlada abre nuevas oportunidades en el diseño de componentes avanzados, optimizados no solo en su geometría y función, sino también en su impacto ambiental. Frente a las limitaciones de los procesos sustractivos tradicionales, caracterizados por un elevado consumo de material y la generación de residuos, el enfoque híbrido propuesto apuesta por un modelo de fabricación aditiva y replicativa más racional y sostenible, alineado con los principios de la Industria 4.0 y la fabricación sostenible.

7.1.1. Conclusiones relacionadas con la fabricación aditiva

La fabricación aditiva mediante estereolitografía por máscara (MSLA) demostró ser una solución versátil y eficaz para obtener piezas modelo con geometrías complejas y texturas superficiales de alta definición. El empleo de resinas fotopoliméricas de alta calidad y herramientas de diseño paramétrico permitió optimizar la definición de las microtexturas y fabricar con éxito estructuras como patrones bioinspirados como la de piel de tiburón o geométricos como las matrices de semiesferas en bajo relieve, las cuales serían inviables con técnicas convencionales de mecanizado, cumpliendo así con el **cuarto objetivo** de esta investigación. Dichas geometrías altamente complejas pudieron obtenerse sin necesidad de utillajes costosos y con un coste de fabricación relativamente independiente de la complejidad de la forma, lo que posiciona a la MSLA como una herramienta esencial para la creación de prototipos funcionales microestructurados.

Aunque esta tecnología de fabricación aditiva permite alcanzar geometrías muy complejas, se ha de considerar especialmente que esas piezas modelo van a ser usadas como utillaje en el proceso de electroconformado, y por tanto han de contemplar las consideraciones de diseño propias del mismo. Aunque se pueda generar microtexturas que mejoren la funcionalidad por MSLA, si no es posible fabricar las cáscaras de cobre que repliquen de forma adecuada esas microestructuras, no se podrán generar los electrodos que transferirán a la pieza final esas microtexturas. Esto confirma la quinta hipótesis planteada en esta investigación.

Así mismo, en relación al **sexto objetivo**, se identificó que las piezas modelo no sufrieron deterioro tras la extracción de la cáscara metálica, por lo que pudieron reutilizarse en múltiples ciclos de fabricación; suponiendo una reducción significativa de residuos y de costes, e incrementando la eficiencia económica y medioambiental del proceso.

No obstante, la MSLA presenta ciertas limitaciones intrínsecas, como el volumen de impresión restringido, la necesidad de postcurado de las piezas y el elevado coste de las resinas fotopoliméricas de alta calidad. En particular, se identificó que la resolución inherente de las impresoras MSLA puede inducir desviaciones dimensionales apreciables en las geometrías de alta complejidad en geometrías muy pequeñas, lo cual representa un desafío a resolver para garantizar la precisión final del electrodo. Esto respondió a la **segunda hipótesis**, y cumplió el **tercer objetivo**, identificando este proceso como el más limitante en la fabricación de electrodos microtexturizados a través de esta metodología.

Por ello, como parte del desarrollo metodológico, se implementó un protocolo de postprocesado, el cual demostró ser fundamental para mejorar la calidad superficial de las microtexturas generadas y reduciendo irregularidades. El control riguroso de estas etapas resultó especialmente importante en geometrías con elevado detalle superficial, donde pequeñas imperfecciones pueden amplificarse durante el proceso de electroconformado. En consecuencia, el postprocesado se identificó como un factor crítico para asegurar la reproducibilidad y el rendimiento funcional de las texturas replicadas.

7.1.2. Conclusiones relacionadas con el proceso de electroconformado

Uno de los aportes más relevantes de esta investigación ha sido la mejora sustancial en el control del proceso de electroconformado. El rediseño del equipo de laboratorio ha sido clave para alcanzar un mayor conocimiento, un control más preciso y reproducible de los parámetros críticos del proceso (distancia ánodo-cátodo, renovación del electrolito, intensidad de corriente). Este rediseño ha permitido generar cáscaras de cobre de mayor uniformidad y calidad, cumpliendo así con el **séptimo objetivo**.

La introducción de una pantalla protectora en el cátodo, como elemento de control del flujo electrolítico, ha sido especialmente relevante, también en el electroconformado de

miscroestructuras. Esta estrategia ha permitido no solo mejorar la homogeneidad del depósito metálico, sino también concentrar el aumento del espesor de cobre en las zonas funcionales del electrodo, obteniendo cáscaras más robustas y más adecuadas a su función posterior como herramienta. Esto corrobora la **cuarta hipótesis**, donde las soluciones empleadas a niveles macro para este proceso se pueden trasladar a escalas más reducidas, obteniendo resultados similares.

No obstante, el comportamiento de la deposición varía en función de la tipología de texturas, siendo aquellas bajo relieve las que exhiben peores comportamientos sobre todo en lo que respecta al correcto relleno de las cavidades, obteniendo cáscaras con mayor espesor en la zona funcional cuando su textura es sobre relieve. Estos resultados tienen concordancia con la **tercera hipótesis** planteada, y cumplen con el **octavo objetivo**, determinando las diferencias entre tipología de textura.

Asimismo, se ha confirmado que el estado del baño electrolítico influye decisivamente en la calidad del recubrimiento. La adecuada gestión del mismo, en cuanto a agitación, recirculación y reposición, ha demostrado ser un aspecto crítico en la estabilidad del proceso y en la reproducción precisa de las microtexturas.

7.1.3. Conclusiones relacionadas con el proceso SEDM

La validación experimental de los electrodos generados ha demostrado con claridad la efectividad del enfoque híbrido propuesto, cumpliendo así con el **décimo objetivo** de esta investigación. Los electrodos microtexturizados han sido empleados con éxito en procesos reales de electroerosión, manteniendo una elevada integridad estructural durante los ciclos de uso y mostrando una capacidad notable para replicar patrones micrométricos sobre la superficie de trabajo.

Se observó además que, gracias a la calidad del refuerzo de las cáscaras y al diseño geométrico optimizado, el desgaste del electrodo durante los procesos de erosión fue reducido, y se mantuvo una buena estabilidad dimensional durante el mecanizado. Estos resultados validan el **noveno objetivo** y no solo la funcionalidad técnica de los electrodos, sino también la eficiencia del método de fabricación en términos de durabilidad, calidad del acabado y economía de recursos.

7.1.4. Conclusiones relacionadas con el comportamiento superficial

Se ha observado que las texturas en bajo relieve con alta densidad de elementos y dimensiones reducidas favorecen una disminución significativa del ángulo de contacto, promoviendo un comportamiento hidrofílico de la superficie, mientras que aquellas con elementos sobre salientes con alta relación de aspecto presentan un comportamiento hidrofóbico. Esta tendencia confirma la influencia determinante de la morfología superficial en la respuesta interfacial del material frente a líquidos.

De igual manera, se ha identificado que, si bien la microtextura aplicada tiene un impacto predominante en el comportamiento superficial, dicho efecto puede verse modulado por el acabado inicial del sustrato, así como por el material de este. En este sentido, el proceso de electroerosión por penetración, al generar microasperezas sobre la superficie erosionada, potencia la funcionalidad de texturas con propiedades hidrofóbicas, actuando como un refuerzo topográfico adicional que puede amplificar el efecto de repulsión al líquido.

En definitiva, la contribución global de esta tesis radica en haber desarrollado y validado un método híbrido innovador para la fabricación de electrodos microtexturizados, integrando las ventajas de la fabricación aditiva y el electroconformado con la eficacia de la electroerosión por penetración, cumpliendo así el **segundo objetivo** propuesto. Se ha demostrado que este enfoque es capaz de

reproducir microestructuras complejas con alta fidelidad de forma eficiente y sostenible, representando un avance significativo frente a las técnicas convencionales. En consecuencia, la evidencia experimental obtenida no solo confirma la hipótesis inicial acerca de la viabilidad técnica y económica del método propuesto, sino que también demuestra el cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo de la investigación. Además, los logros alcanzados abren nuevas perspectivas y oportunidades para futuras investigaciones orientadas a maximizar la eficiencia, la precisión y la diversidad de aplicaciones de la fabricación de electrodos SEDM microtexturizados mediante la combinación estratégica de fabricación aditiva y electroconformado.

Desde una perspectiva personal, esta tesis ha supuesto un desafío considerable, al implicar múltiples disciplinas dentro del ámbito de la ingeniería. La naturaleza híbrida de la metodología desarrollada exigió una comprensión profunda de cada proceso y de sus interacciones. Esta complejidad metodológica convirtió la línea de investigación en un verdadero reto técnico y conceptual. No obstante, el carácter acentuadamente experimental del trabajo me ofreció la oportunidad de enfrentarme a numerosos problemas reales, lo que me hizo adoptar un enfoque resolutivo, crítico y autónomo. Afrontar y superar estos obstáculos no solo ha sido clave para avanzar en el desarrollo de la investigación, sino que también ha contribuido significativamente a mi formación como investigadora y profesional.

7.2. Líneas futuras

El trabajo realizado sienta una base sólida sobre la cual continuar explorando mejoras en la fabricación y utilización de electrodos microtexturizados mediante técnicas híbridas. Teniendo en consideración los hallazgos obtenidos y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- **Análisis de estrategias de simplificación geométrica de diseños para MSLA:**

  Explorar estrategias de diseño que permitan la simplificación geométrica de las microtexturas generadas mediante MSLA, considerando su evolución funcional durante el proceso de electroerosión. Se propone diseñar patrones escalonados o angulares que, tras el primer ciclo de erosión, se suavicen de forma natural por efecto del desgaste del electrodo, adquiriendo perfiles redondeados o curvos. Esta estrategia busca evitar geometrías complejas en la fase de impresión 3D que generen archivos muy pesados manteniendo la funcionalidad prevista en la superficie mecanizada final.

- **Exploración de nuevos materiales para la fabricación aditiva por MSLA:**

  Investigar nuevos materiales fotosensibles que pudiesen aditivarse para conseguir con propiedades mejoradas para su uso en MSLA y electroconformado. Conseguir cierto nivel de conductividad eléctrica superficial, menor necesidad de tratamientos postprocesado o mejor resistencia mecánica, ampliando así la gama de aplicaciones industriales posibles.

- **Mejora del baño electrolítico:**

  Realizar estudios específicos que analicen en detalle la composición química del baño electrolítico, así como investigar métodos avanzados para el monitoreo y mantenimiento de su calidad y propiedades fisicoquímicas a largo plazo. Esto podría incluir la implementación de sistemas automatizados de reacondicionamiento del baño, que garanticen una deposición estable y óptima en condiciones industriales continuas.

- **Diseño de pantallas específicas para control de deposición:**

  Desarrollar pantallas protectoras adaptadas a las geometrías de las piezas modelo en función de las microtexturas diseñadas, con el fin de modificar intencionadamente el flujo electrolítico durante el proceso de electroconformado. Esta estrategia permitiría compensar las variaciones de espesor inducidas por las limitaciones del proceso, favoreciendo una deposición más uniforme en las zonas funcionales críticas. De este modo, se busca alcanzar el espesor mínimo en puntos de la cáscara metálica, mejorando el rendimiento funcional de los electrodos generados.

- **Comparación de diferentes baños metálicos:**

  Explorar la utilización de otros tipos de baños de electroconformado, como baños de plata o de níquel, para evaluar sus efectos sobre la calidad del depósito, la fidelidad de la textura replicada, la resistencia mecánica de las cáscaras y su comportamiento funcional para otras aplicaciones industriales en diversos sectores.

- **Optimización de parámetros del proceso SEDM:**

  Profundizar en el estudio y la optimización de los parámetros específicos de la electroerosión por penetración, tales como intensidad, tiempo de pulso, distancia de gap y tipo de dieléctrico, con el objetivo de mejorar aún más el acabado superficial de las piezas mecanizadas y reducir la tasa de desgaste de electrodos electroconformados. Ello permitiría ampliar la aplicabilidad industrial del método híbrido desarrollado.

- **Selección de materiales con propiedades superficiales hidrofóbicas:**

  Investigar el efecto del material de la pieza a erosionar, particularmente en lo referente al comportamiento hidrofóbico y superhidrofóbico. Se propone emplear materiales con una tendencia intrínseca a la hidrofobicidad, con el objetivo de lograr ángulos de contacto mejores tras la aplicación de microtexturas.

- **Evaluación económica y ambiental integral:**

  Llevar a cabo un análisis exhaustivo de costos operativos y ambientales del proceso completo a nivel industrial, con el objetivo de documentar formalmente las ventajas comparativas del método híbrido frente a técnicas convencionales. Esto reforzaría el valor estratégico y la sostenibilidad del método propuesto.

En definitiva, los resultados y conclusiones obtenidos en esta tesis no solo validan la hipótesis inicial acerca de la viabilidad técnica y económica del método híbrido, sino que además abren nuevas perspectivas y oportunidades para futuras investigaciones orientadas a mejorar aún más la eficiencia y la precisión del proceso de fabricación de electrodos microtexturizados mediante la combinación estratégica de fabricación aditiva y electroconformado.



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Bhushan, B. Principles and Applications of Tribology. *Industrial Lubrication and Tribology* **1999**, *51*, 313–313, doi:10.1108/ilt.1999.51.6.313.1.
2. Evans, C.J.; Bryan, J.B. "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces. *CIRP Annals* **1999**, *48*, 541–556, doi:10.1016/S0007-8506(07)63233-8.
3. Suh, N.P.; Saka, N. Surface Engineering. *CIRP Annals* **1987**, *36*, 403–408, doi:10.1016/S0007-8506(07)62632-8.
4. Stout, K.J.; Blunt, L. A Contribution to the Debate on Surface Classifications-Random, Systematic, Unstructured, Structured and Engineered. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2001**, *13–14*, 2039–2044.
5. Ibatan, T.; Uddin, M.S.; Chowdhury, M.A.K. Recent Development on Surface Texturing in Enhancing Tribological Performance of Bearing Sliders. *Surface and Coatings Technology* **2015**, *272*, 102–120, doi:10.1016/j.surfcoat.2015.04.017.
6. Bruzzone, A.A.G.; Costa, H.L.; Lonardo, P.M.; Lucca, D.A. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance. *CIRP Annals* **2008**, *57*, 750–769, doi:10.1016/j.cirp.2008.09.003.
7. Moronuki, N.; Tokyo Metropolitan University Functional Texture Design and Texturing Processes. *International Journal of Automation Technology* **2016**, *10*, 4–15, doi:10.20965/ijat.2016.p0004.
8. Arizmendi, M.; Jiménez, A.; Cumbicus, W.; Artano, M. *Interempresas*. 2017,.
9. Ho, K.H.; Newman, S.T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2003**, *43*, 1287–1300, doi:10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
10. Rennie, A.E.W.; Bocking, C.E.; Bennett, G.R. Electroforming of Rapid Prototyping Mandrels for Electro-Discharge Machining Electrodes. *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, *110*, 186–196, doi:10.1016/S0924-0136(00)00878-5.
11. Muhye, A. Galvanoplastia: Procesos, Aplicaciones y Ejemplos. *Lifeder* 2018.
12. Pérez, M.; Carou, D.; Rubio, E.M.; Teti, R. Current Advances in Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* **2020**, *88*, 439–444, doi:10.1016/j.procir.2020.05.076.
13. McGeough, J.A.; Leu, M.C.; Rajurkar, K.P.; De Silva, A.K.M.; Liu, Q. Electroforming Process and Application to Micro/Macro Manufacturing. *CIRP Annals* **2001**, *50*, 499–514, doi:10.1016/S0007-8506(07)62990-4.
14. Huang, C.; Li, H.Y.; Zhu, M.J.; Yu, M.M. Present Research Situation and New Trends of Electroforming. *AMM* **2013**, *278–280*, 401–405, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.401.
15. Hernández, P.; Campos, D.; Socorro, P.; Benítez, A.; Ortega, F.; Díaz, N.; Marrero, M.D. Electroforming Applied to Manufacturing of Microcomponents. *Procedia Engineering* **2015**, *132*, 655–662, doi:10.1016/j.proeng.2015.12.544.
16. Verona, M.M.; Castellano, H.P.; Alemán Mª, M.D.; Vega, B.A. Aplicaciones Del Electroconformado a La Fabricación Rápida de Herramientas.; ULPGC: Perú, 2007.
17. García, O. Efecto de diferentes parámetros sobre la calidad de las electroformas de níquel Desarrollo y validación de dispositivo para mejorar la uniformidad de espesor, ULPGC: Las Palmas de Gran Canaria, 2014.
18. Kechagias, J.; Iakovakis, V.; Katsanos, M.; Maropoulos, S. EDM Electrode Manufacture Using Rapid Tooling: A Review. *Journal of Materials Science* **2008**, *43*, 2522–2535, doi:10.1007/s10853-008-2453-0.
19. Gillot, F.; Mognol, P.; Furet, B. Dimensional Accuracy Studies of Copper Shells Used for Electro-Discharge Machining Electrodes Made with Rapid Prototyping and the Electroforming Process. *Journal of Materials Processing Technology* **2005**, *159*, 33–39, doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.009.
20. Liu, X.Y.; Jiang, J. Environmental Effects on the Dimensions of SL5195 Resin. *Rapid Prototyping Journal* **2003**, *9*, 88–94, doi:10.1108/13552540310698152.
21. Bhushan, B. *Introduction to Tribology*; 2º.; USA, 2013; ISBN 978-1-119-94453-9.
22. Hutchings, I.M.; Hutchings, I.M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*; Edward Arnold: London, 1992; ISBN 978-0-340-56184-3.
23. Bico, J.; Thiele, U.; Quéré, D. Wetting of Textured Surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2002**, *206*, 41–46, doi:10.1016/S0927-7757(02)00061-4.

24. Nosonovsky, M.; Bhushan, B. Multiscale Friction Mechanisms and Hierarchical Surfaces in Nano- and Bio-Tribology. *Materials Science and Engineering: R: Reports* **2007**, *58*, 162–193, doi:10.1016/j.mser.2007.09.001.
25. Kumar, K.; Zindani, D.; Davim, J.P. Electrochemical Processes. In *Advanced Machining and Manufacturing Processes*; Materials Forming, Machining and Tribology; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 105–122 ISBN 978-3-319-76074-2.
26. Cheng, Z.; Du, M.; Lai, H.; Zhang, N.; Sun, K. From Petal Effect to Lotus Effect: A Facile Solution Immersion Process for the Fabrication of Super-Hydrophobic Surfaces with Controlled Adhesion. *Nanoscale* **2013**, *5*, 2776–2783, doi:10.1039/C3NR34256E.
27. Wegner, C.; Dumcke, R.; Tönnesmann, N. Design Inspiration: The Secrets of Shark Skin. **2017**, 5.
28. Leach, R.; Haitjema, H.; Su, R.; Thompson, A. Metrological Characteristics for the Calibration of Surface Topography Measuring Instruments: A Review. *Meas. Sci. Technol.* **2020**, *32*, 032001, doi:10.1088/1361-6501/abb54f.
29. ISO 17450-1:2011(En), Geometrical Product Specifications (GPS) — General Concepts — Part 1: Model for Geometrical Specification and Verification Available online: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17450:-1:ed-1:v1:en (accessed on 19 April 2025).
30. Stout, K.J. Engineered Surfaces Part 1.— A Philosophy of Manufacture. *KSME International Journal* **2000**, *14*, 72–83, doi:10.1007/BF03184773.
31. Burakowski, T.; Wierzchon, T. *Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies*; CRC Press: Boca Raton, 1998; ISBN 978-0-367-80232-5.
32. Tillmann, W.; Vogli, E. Modern Surface Technology. In *Modern Surface Technology*; John Wiley & Sons, Ltd, 2006; p. I–XX ISBN 978-3-527-60881-2.
33. ASM Handbook *Surface Engineering*; ASM International, 1994; Vol. 5; ISBN 978-1-62708-170-2.
34. Kennedy, D.; Xue, Y.; Mihaylova, E. Current and Future Applications of Surface Engineering.; 2005.
35. Hosmani, S.S.; Kuppusami, P.; Goyal, R.K. Basics of Surface Alloying. In *An Introduction to Surface Alloying of Metals*; Hosmani, S.S., Kuppusami, P., Goyal, R.K., Eds.; Springer India: New Delhi, 2014; pp. 1–28 ISBN 978-81-322-1889-0.
36. Wang, J. Sampling for the Measurement of Structured Surfaces. doctoral, University of Huddersfield, 2012.
37. Jiang, X.J.; Whitehouse, D.J. Technological Shifts in Surface Metrology. *CIRP Annals* **2012**, *61*, 815–836, doi:10.1016/j.cirp.2012.05.009.
38. Hahn, T. *International Tables for Crystallography. Vol. A: Space-Group Symmetry*; 5. ed., reprinted with corrections.; Springer: Dordrecht, 2005; ISBN 978-0-7923-6590-7.
39. Groover, M. *Fundamentos De Manufactura Moderna*; 2018; Vol. 92; ISBN 978-970-10-6240-1.
40. Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. *Manufactura, ingenieria y tecnologia*; 5º Edición.; México, 2008; ISBN 0-13-148965-8.
41. Schuetz, G. *Modern Machine Shop*. 2019,.
42. Alves, M.L.; Ferreira, B.B.; Leta, F.R. Evaluación de Parámetros de Rugosidad usando Análisis de Imágenes de Diferentes Microscopios Ópticos y Electrónicos. *Inf. tecnol.* **2011**, *22*, 129–146, doi:10.4067/S0718-07642011000400014.
43. Mendoza Cruz, P. Especificación Geométrica de Productos. Indicación de La Calidad Superficial En La Documentación Técnica de Productos. UNE-EN-ISO 1302: PDF Free Download. In; 2018.
44. 2.3.- Parámetros de Rugosidad. | TFM02.- Metrología Dimensional, Superficial y Geométrica. Available online: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM02/es_DFM_TFM02_Contenidos/website_23_parmetros_de_rugosidad.html (accessed on 4 June 2020).
45. Ramezani, M.; Mohd Ripin, Z.; Pasang, T.; Jiang, C.-P. Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications. *Metals* **2023**, *13*, 1299, doi:10.3390/met13071299.
46. Pratap, T.; Patra, K. Micro-Nano Surface Texturing, Characterization and Their Impact on Bio-Interfaces. In; 2021; pp. 577–610 ISBN 978-0-12-817453-1.
47. Malshe, A.; Rajurkar, K.; Samant, A.; Hansen, H.N.; Bapat, S.; Jiang, W. Bio-Inspired Functional Surfaces for Advanced Applications. *CIRP Annals* **2013**, *62*, 607–628, doi:10.1016/j.cirp.2013.05.008.
48. Vasudev, H.; Mehta, A. Techniques for Improving Engineering Material's Tribological Performance Using Laser Cladding Process in Laser Surface Texturing. In *Thermal Claddings for Engineering Applications*; CRC Press, 2024 ISBN 978-1-03-271383-0.

49. Liu, Z.; Niu, T.; Lei, Y.; Luo, Y. Metal Surface Wettability Modification by Nanosecond Laser Surface Texturing: A Review. *Biosurface and Biotribology* **2022**, *8*, 95–120, doi:10.1049/bsb2.12039.
50. Ramesh, A.; Akrama, W.; Mishra, S.P.; Cannon, A.H.; Polycarpou, A.A.P.; King, W.P.; Engineering, S. Friction Characteristics of Microtextured Surfaces under Mixed and Hydrodynamic Lubrication. **2012**.
51. Greiner, C.; Schäfer, M. Bio-Inspired Scale-like Surface Textures and Their Tribological Properties. *Bioinspir. Biomim.* **2015**, *10*, 044001, doi:10.1088/1748-3190/10/4/044001.
52. Artur, K.; Norbert, R.; Łukasz, O.; Jacek, P.; Marcin, S.; Jozef, B. Laser Surface Texturing: Characteristics and Applications. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment* **2023**, *5*, 240–248, doi:10.2478/czoto-2023-0026.
53. Khorasani, A.; Goldberg, M.; Doeven, E.; Littlefair, G. Titanium in Biomedical Applications—Properties and Fabrication: A Review. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering* **2015**, *5*, 593–619, doi:10.1166/jbt.2015.1361.
54. Grützmacher, P.G.; Profito, F.J.; Rosenkranz, A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives. *Lubricants* **2019**, *7*, 95, doi:10.3390/lubricants7110095.
55. Torres, J.I.A. Texturización Superficial de Aleaciones Metálicas mediante Láser. 210.
56. Zhang, P.; Lv, F.Y. A Review of the Recent Advances in Superhydrophobic Surfaces and the Emerging Energy-Related Applications. *Energy* **2015**, *82*, 1068–1087, doi:10.1016/j.energy.2015.01.061.
57. Bhushan, B.; Jung, Y.C.; Koch, K. Micro-, Nano- and Hierarchical Structures for Superhydrophobicity, Self-Cleaning and Low Adhesion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2009**, *367*, 1631–1672, doi:10.1098/rsta.2009.0014.
58. Said, S.A.M.; Al-Aqeeli, N.; Walwil, H.M. The Potential of Using Textured and Anti-Reflective Coated Glasses in Minimizing Dust Fouling. *Solar Energy* **2015**, *113*, 295–302, doi:10.1016/j.solener.2015.01.007.
59. Song, J.; Huang, H.; Wang, X.; Shi, W. Status and Prospects of Surface Texturing: Design, Manufacturing and Applications. *Surf. Sci. Tech.* **2023**, *1*, 21, doi:10.1007/s44251-023-00022-5.
60. Kumar, V.; Verma, R.; Sharma, V.S.; Sharma, V. Recent Progresses in Super-Hydrophobicity and Micro-Texturing for Engineering Applications. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* **2022**, *9*, 043003, doi:10.1088/2051-672X/ac4321.
61. Thanigaivelan, R.; Prakash, S.; Sekar, M. Surface Modification Techniques for Bio-Materials: An Overview. In; 2022; pp. 42–60 ISBN 978-1-79989-576-3.
62. Raman, R.; Bashir, R. Biomimicry, Biofabrication, and Biohybrid Systems: The Emergence and Evolution of Biological Design. *Advanced Healthcare Materials* **2017**, *6*, 1700496, doi:10.1002/adhm.201700496.
63. Bhushan, B. Bioinspired Structured Surfaces. *Langmuir* **2012**, *28*, 1698–1714, doi:10.1021/la2043729.
64. Liu, K.; Jiang, L. Bio-Inspired Design of Multiscale Structures for Function Integration. *Nano Today* **2011**, *6*, 155–175, doi:10.1016/j.nantod.2011.02.002.
65. Sun, J.; Bhushan, B. Nanomanufacturing of Bioinspired Surfaces. *Tribology International* **2019**, *129*, 67–74, doi:10.1016/j.triboint.2018.08.007.
66. Wen, L.; Weaver, J.C.; Thornycroft, P.J.M.; Lauder, G.V. Hydrodynamic Function of Biomimetic Shark Skin: Effect of Denticle Pattern and Spacing. *Bioinspiration & Biomimetics* **2015**, *10*, 066010, doi:10.1088/1748-3190/10/6/066010.
67. Barthlott, W.; Neinhuis, C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces. *Planta* **1997**, *202*, 1–8, doi:10.1007/s004250050096.
68. Bogdanoff, R. The Use of Biomimetic Synthetic Setae in Adhesives. **2018**, 8.
69. Al-Masri, A.; Abdulsalam, M.; Hashaykeh, N.; Salama, W. Bio-Mimicry in Architecture: An Explorative Review of Innovative Solution toward Sustainable Buildings. *An-Najah University Journal for Research - A (Natural Sciences)* **2024**, *39*, 39–46, doi:10.35552/anujr.a.39.1.2256.
70. Gerola, A.; Robaey, Z.; Blok, V. What Does It Mean to Mimic Nature? A Typology for Biomimetic Design. *Philos. Technol.* **2023**, *36*, 65, doi:10.1007/s13347-023-00665-0.
71. Okerstrom, S.; Anderson, P. Macro to Micro: Innovation Inspired by Nature. *Microscopy and Microanalysis* **2016**, *22*, 2088–2089, doi:10.1017/S1431927616011284.

72. Czichos, H.; Saito, T.; Smith, L.E. *Springer Handbook of Metrology and Testing*; Springer Science & Business Media, 2011; ISBN 978-3-642-16641-9.
73. Fort, R. Análisis de la microrugosidad mediante técnicas portátiles: aplicaciones y casos de estudio en patrimonio. 19.
74. Vorburger, T.V.; Rhee, H.-G.; Renegar, T.B.; Song, J.-F.; Zheng, A. Comparison of Optical and Stylus Methods for Measurement of Surface Texture. *Int J Adv Manuf Technol* **2007**, *33*, 110–118, doi:10.1007/s00170-007-0953-8.
75. Hocken, R.J.; Chakraborty, N.; Brown, C. Optical Metrology of Surfaces. *CIRP Annals* **2005**, *54*, 169–183, doi:10.1016/S0007-8506(07)60025-0.
76. Rhee, H.-G.; Vorburger, T.V.; Lee, J.W.; Fu, J. Discrepancies between Roughness Measurements Obtained with Phase-Shifting and White-Light Interferometry. *Appl. Opt., AO* **2005**, *44*, 5919–5927, doi:10.1364/AO.44.005919.
77. Harasaki, A.; Schmit, J.; Wyant, J.C. Improved Vertical-Scanning Interferometry. *Appl. Opt., AO* **2000**, *39*, 2107–2115, doi:10.1364/AO.39.002107.
78. Mazzaglia, G.M.M. Evaluación de la humectabilidad y de la rugosidad de superficies de titanio con diferentes tratamientos y su relación con la adhesión celular tesis doctoral, Editorial de la Universidad de Granada: Granada, 2006.
79. Stout, K.J. The Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. *Commission of the european communities. Luxembourg* **1993**, *130*.
80. Coblas, D.G.; Fatu, A.; Maoui, A.; Hajjam, M. Manufacturing Textured Surfaces: State of Art and Recent Developments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2015**, *229*, 3–29, doi:10.1177/1350650114542242.
81. Beck, G.C. Cylinder Honing and Wiping Device 1939.
82. Schneider, Yu.G. Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instruments Parts. *Precision Engineering* **1984**, *6*, 219–225, doi:10.1016/0141-6359(84)90007-2.
83. Etsion, I.; Kligerman, Y.; Halperin, G. Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces. *Tribology Transactions* **1999**, *42*, 511–516, doi:10.1080/10402009908982248.
84. Etsion, I. Increasing Mechanical Seal Life with Laser-Textured Seal Faces. *Proceedings of the 15th International Conf on Fluid Sealing, BHR Group, Maastricht, 1997* **1997**.
85. Geiger, M.; Roth, S.; Becker, W. Influence of Laser-Produced Microstructures on the Tribological Behaviour of Ceramics. *Surface and Coatings Technology* **1998**, *100–101*, 17–22, doi:10.1016/S0257-8972(97)00581-1.
86. Geiger, M.; Popp, U.; Engel, U. Excimer Laser Micro Texturing of Cold Forging Tool Surfaces - Influence on Tool Life. *CIRP Annals* **2002**, *51*, 231–234, doi:10.1016/S0007-8506(07)61506-6.
87. Sánchez, E.V.; Lozano, M.S.; Orts, R.P. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica: Libro de Artículos*; Universidad Miguel Hernández, 2016; ISBN 978-84-16024-37-7.
88. Greco, A.; Raphaelson, S.; Ehmann, K.; Wang, Q.J.; Lin, C. Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibromechanical Texturing Method. *J. Manuf. Sci. Eng* **2009**, *131*, doi:10.1115/1.4000418.
89. Zhang, C.; Shi, G.; Ehmann, K. Investigation of Hybrid Micro-Texture Fabrication in Elliptical Vibration-Assisted Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2017**, *120*, 72–84, doi:10.1016/j.ijmachtools.2017.04.009.
90. Graham, E.; Park, C.I.; Park, S.S. Fabrication of Micro-Dimpled Surfaces through Micro Ball End Milling. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2013**, *14*, 1637–1646, doi:10.1007/s12541-013-0221-9.
91. Graham, E.; Park, C.I.; Park, S.S. Force Modeling and Applications of Inclined Ball End Milling of Micro-Dimpled Surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* **2014**, *70*, 689–700, doi:10.1007/s00170-013-5310-5.
92. Matsumura, T.; Takahashi, S. Micro Dimple Milling on Cylinder Surfaces. *Journal of Manufacturing Processes* **2012**, *14*, 135–140, doi:10.1016/j.jmapro.2011.12.002.
93. Brinksmeier, E.; Lucca, D.A.; Walter, A. Chemical Aspects of Machining Processes. *CIRP Annals* **2004**, *53*, 685–699, doi:10.1016/S0007-8506(07)60035-3.
94. Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y. Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Annals* **2006**, *55*, 745–768, doi:10.1016/j.cirp.2006.10.006.
95. Tamez, M.B.A.; Taha, I. A Review of Additive Manufacturing Technologies and Markets for Thermosetting Resins and Their Potential for Carbon Fiber Integration. *Additive Manufacturing* **2021**, *37*, 101748, doi:10.1016/j.addma.2020.101748.

96. Yan, X.; Gu, P. A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems. *Computer-Aided Design* **1996**, *28*, 307–318, doi:10.1016/0010-4485(95)00035-6.
97. Crump, S.S. Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects 1992.
98. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering* **2018**, *143*, 172–196, doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
99. 3D printing growth accelerates again Available online: https://www2.deloitte.com/content/www/us/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/3d-printing-market.html (accessed on 5 September 2021).
100. Ghamarian, I.; Ball, S.; Ghayoor, M.; Pasebani, S.; Tabei, A. Statistical Analysis of Spatial Distribution of Pores in Metal Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* **2021**, 102264, doi:10.1016/j.addma.2021.102264.
101. Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B. Introduction and Basic Principles. In *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*; Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., Eds.; Springer US: Boston, MA, 2010; pp. 20–35 ISBN 978-1-4419-1120-9.
102. Cooper, K. *Tecnología de Creación Rápida de Prototipos: Selección y Aplicación*; 2001; ISBN 978-0-429-22277-1.
103. Rasiya, G.; Shukla, A.; Saran, K. Additive Manufacturing-A Review. *Materials Today: Proceedings* **2021**, doi:10.1016/j.matpr.2021.05.181.
104. Wholers, T. Wohlers Report. In *Wholers Associates*; Fort Collins: CO, 2013.
105. Grimm, T. *User's Guide to Rapid Prototyping*; Society of Manufacturing Engineers, 2004; ISBN 978-0-87263-697-2.
106. Peerzada, M.; Abbasi, S.; Lau, K.T.; Hameed, N. Additive Manufacturing of Epoxy Resins: Materials, Methods, and Latest Trends. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, *59*, 6375–6390, doi:10.1021/acs.iecr.9b06870.
107. Rengier, F.; Mehndiratta, A.; von Tengg-Kobligk, H.; Zechmann, C.M.; Unterhinninghofen, R.; Kauczor, H.-U.; Giesel, F.L. 3D Printing Based on Imaging Data: Review of Medical Applications. *Int J CARS* **2010**, *5*, 335–341, doi:10.1007/s11548-010-0476-x.
108. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* **2017**, *110*, 442–458, doi:10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
109. Rickli, J.L.; Dasgupta, A.K.; Dinda, G.P. A Descriptive Framework for Additive Remanufacturing Systems. *International Journal of Rapid Manufacturing* **2014**, *4*, 199–218, doi:10.1504/IJRAPIDM.2014.066043.
110. Teibrich, A.; Mueller, S.; Guimbretière, F.; Kovacs, R.; Neubert, S.; Baudisch, P. Patching Physical Objects. In Proceedings of the Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, November 5 2015; pp. 83–91.
111. Brown, S.L.; Pierson, H.A. Digital Design Integrity for Additive Manufacturing: Examining Reliability Issues in the Digital Preproduction Process. *International Journal of Rapid Manufacturing* **2018**, *7*, 43–58, doi:10.1504/IJRAPIDM.2018.089728.
112. Junk, S.; Bär, F. Design Guidelines for Additive Manufacturing Using Masked Stereolithography mSLA. *Procedia CIRP* **2023**, *119*, 1122–1127, doi:10.1016/j.procir.2023.01.022.
113. SLA vs. MSLA: What Is the Difference Between SLA and MSLA 3D Printing? | ANYCUBIC 3D Printing Available online: https://store.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/sla-vs-msla (accessed on 21 April 2025).
114. Afridi, A.; Al Rashid, A.; Koç, M. Recent Advances in the Development of Stereolithography-Based Additive Manufacturing Processes: A Review of Applications and Challenges. *Bioprinting* **2024**, *43*, e00360, doi:10.1016/j.bprint.2024.e00360.
115. Watters, M.P.; Bernhardt, M.L. Curing Parameters to Improve the Mechanical Properties of Stereolithographic Printed Specimens. *Rapid Prototyping Journal* **2018**, *24*, 46–51, doi:10.1108/RPJ-11-2016-0180.
116. SLA vs DLP vs LCD 3D Printing: Which Is Best? *3DSourced* 2020.
117. Lalwani, C. LCD vs. DLP vs. SLA: Which 3D Printer is Best For You Available online: https://phrozen3d.com/blogs/guides/sla-vs-dlp-vs-lcd-which-resin-3d-printer-is-the-best-for-you (accessed on 28 September 2021).
118. Melchels, F.P.W.; Feijen, J.; Grijpma, D.W. A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering. *Biomaterials* **2010**, *31*, 6121–6130, doi:10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

119. Resins | FormFutura Available online: http://www.formfutura.com/shop/category/resins-473 (accessed on 2 October 2021).
120. Resins Products & Services |eSUN 3D Printing Materials Available online: https://www.esun3d.net/Products/Resins (accessed on 2 October 2021).
121. FunToDo Resins Available online: https://funtodo.eu (accessed on 2 October 2021).
122. Compra online tu resina de impresión 3D en Available online: https://www.3djake.es/resin (accessed on 4 October 2021).
123. 3D Printing Materials: Engineering Resins Available online: https://formlabs.com/materials/engineering/ (accessed on 8 September 2021).
124. Heller, C.; Schwentenwein, M.; Russmueller, G.; Varga, F.; Stampfl, J.; Liska, R. Vinyl Esters: Low Cytotoxicity Monomers for the Fabrication of Biocompatible 3D Scaffolds by Lithography Based Additive Manufacturing. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* **2009**, *47*, 6941–6954, doi:10.1002/pola.23734.
125. Tatlock, C.N. y A.C. y D.G. y Z. Herramientas y Técnicas Del Lenguaje de Programación Para La Impresión 3D. In Proceedings of the 2nd Summit on Advances in Programming Languages (SNAPL 2017); Krishnamurthi, B.S.L. y R.B.\ 'i k y S., Informatik, S.D.-L.-Z. fuer, Eds.; Dagstuhl, Alemania.
126. Araya-Calvo, M.; López-Gómez, I.; Chamberlain-Simon, N.; León-Salazar, J.L.; Guillén-Girón, T.; Corrales-Cordero, J.S.; Sánchez-Brenes, O. Evaluation of Compressive and Flexural Properties of Continuous Fiber Fabrication Additive Manufacturing Technology. *Additive Manufacturing* **2018**, *22*, 157–164, doi:10.1016/j.addma.2018.05.007.
127. Castoro, M. Impact of Laser Power and Build Orientation on the Mechanical Properties of Selectively Laser Sintered Parts. **2013**, 8.
128. Sachs, E.; Curodeau, A.; Gossard, D.; Jee, H.; Cima, M.; Caldarise, S. Surface Texture by 3D Printing.; 1994.
129. Curodeau, A.; Sachs, E.; Caldarise, S. Design and Fabrication of Cast Orthopedic Implants with Freeform Surface Textures from 3-D Printed Ceramic Shell. *Journal of biomedical materials research* **2000**, *53*, 525–535, doi:10.1002/1097-4636(200009)53:53.0.CO;2-1.
130. Hong, Y.; Zhang, P.; Lee, K.-H.; Lee, C.-H. Friction and Wear of Textured Surfaces Produced by 3D Printing. *Sci. China Technol. Sci.* **2017**, *60*, 1400–1406, doi:10.1007/s11431-016-9066-0.
131. Holovenko, Y.; Antonov, M.; Kollo, L.; Hussainova, I. Friction Studies of Metal Surfaces with Various 3D Printed Patterns Tested in Dry Sliding Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2018**, *232*, 43–53, doi:10.1177/1350650117738920.
132. Jafari, R.; Cloutier, C.; Allahdini, A.; Momen, G. Recent Progress and Challenges with 3D Printing of Patterned Hydrophobic and Superhydrophobic Surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* **2019**, *103*, 1225–1238, doi:10.1007/s00170-019-03630-4.
133. Ko, K.; Jin, S.; Lee, S.E.; Lee, I.; Hong, J.-W. Bio-Inspired Bimaterial Composites Patterned Using Three-Dimensional Printing. *Composites Part B: Engineering* **2019**, *165*, 594–603, doi:10.1016/j.compositesb.2019.02.008.
134. Johnson, A.A.; Bingham, G.A.; Majewski, C.E. The Design and Assessment of Bio-Inspired Additive Manufactured Stab-Resistant Armour. *Virtual and Physical Prototyping* **2018**, *13*, 49–57, doi:10.1080/17452759.2017.1369438.
135. Mai, J.; Thistleton, C.; Löschke, S.K.; Proust, G.; Dong, A. Towards a New Techno-Aesthetic Paradigm: Experiments with Pattern, Texture and Colour in 3D-Printed Wood-Plastic Composites. **2016**, 10.
136. Ou, J.; Dublon, G.; Cheng, C.-Y.; Heibeck, F.; Willis, K.; Ishii, H. *Cilllia: 3D Printed Micro-Pillar Structures for Surface Texture, Actuation and Sensing*; 2016; p. 5764;.
137. Van Rompay, T.; Finger, F.; Saakes, D.; Fenko, A. "See Me, Feel Me": Effects of 3D-Printed Surface Patterns on Beverage Evaluation. *Food Quality and Preference* **2017**, *62*, 332–339, doi:10.1016/j.foodqual.2016.12.002.
138. Mantihal, S.; Prakash, S.; Bhandari, B. Texture-Modified 3D Printed Dark Chocolate: Sensory Evaluation and Consumer Perception Study. *J Texture Stud* **2019**, *50*, 386–399, doi:10.1111/jtxs.12472.
139. Spahiu, T.; Fafenrot, S.; Grimmelsmann, N.; Piperi, E.; Shehi, E.; Ehrmann, A. Varying Fabric Drape by 3D-Imprinted Patterns for Garment Design. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *254*, 172023, doi:10.1088/1757-899X/254/17/172023.

140. Maekawa, K.; Nishii, T.; Hayashi, T.; Akabane, H.; Agu, M. Laser Fabrication of Affective 3D Objects with 1/f Fluctuation. *JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering* **2003**, *46*, 460–466, doi:10.1299/jsmea.46.460.
141. Armillotta, A. Assessment of Surface Quality on Textured FDM Prototypes. *Rapid Prototyping Journal* **2006**, *12*, 35–41, doi:10.1108/13552540610637255.
142. Kanada, Y. 3D Printing of Generative Art Using the Assembly and Deformation of Direction-Specified Parts. *Rapid Prototyping Journal* **2016**, *22*, 636–644, doi:10.1108/RPJ-01-2015-0009.
143. Jee, H.; Sachs, E. Surface Macro-Texture Design for Rapid Prototyping. *Rapid Prototyping Journal* **2000**, *6*, 50–60, doi:10.1108/13552540010309877.
144. Zhou, S.; Jiang, C.; Lefebvre, S. Topology-Constrained Synthesis of Vector Patterns. *ACM Transactions on Graphics* **2014**, *33*, 1–11, doi:10.1145/2661229.2661238.
145. Dumas, J.; Lu, A.; Lefebvre, S.; Wu, J.; Dick, C. By-Example Synthesis of Structurally Sound Patterns. *ACM Trans. Graph.* **2015**, *34*, 137:1-137:12, doi:10.1145/2766984.
146. Herholz, P.; Koch, S.; Boubekeur, T.; Alexa, M. Unsharp Masking Geometry Improves 3D Prints. *Computers & Graphics* **2017**, *66*, doi:10.1016/j.cag.2017.05.018.
147. Pintus, R.; Gobbetti, E.; Cignoni, P.; Scopigno, R. Shape Enhancement for Rapid Prototyping. *The Visual Computer* **2010**, *26*, 831–840, doi:10.1007/s00371-010-0488-0.
148. Kobayashi, Y.; Shirai, K. Multi-Axis Milling for Micro-Texturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **2008**, *9*, 34–38.
149. Yaman, U.; Dolen, M.; Hoffmann, C. Generation of Patterned Indentations for Additive Manufacturing Technologies. *IISE Trans.* **2019**, doi:10.1080/24725854.2018.1491076.
150. Jin, G.Q.; Li, W.D.; Gao, L.; Popplewell, K. A Hybrid and Adaptive Tool-Path Generation Approach of Rapid Prototyping and Manufacturing for Biomedical Models. *Comput. Ind.* **2013**, *64*, 336–349, doi:10.1016/j.compind.2012.12.003.
151. Jin, G.Q.; Li, W.D.; Tsai, C.F.; Wang, L. Adaptive Tool-Path Generation of Rapid Prototyping for Complex Product Models. *Journal of Manufacturing Systems* **2011**, *30*, 154–164, doi:10.1016/j.jmsy.2011.05.007.
152. Boeykens, L. 3D Texturing: Sustainable, Personalized, Functional | Materialise 2022.
153. Personaliza tu equipaje aquí | Samsonite España Available online: https://www.samsonite.es/personalizacion/ (accessed on 9 August 2022).
154. 10 Years of 3D Printing at Samsonite: Innovation from Design to the Production Line | Materialise - Innovators You Can Count On Available online: https://www.materialise.com/en/cases/10-years-of-3d-printing-at-samsonite-innovation-from-design-to-production-line (accessed on 9 August 2022).
155. McGeough, J.A. Electroforming. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*; Laperrière, L., Reinhart, G., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2014; pp. 443–446 ISBN 978-3-642-20617-7.
156. The International Academy for Production Engineering *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*; Chatti, S., Laperrière, L., Reinhart, G., Tolio, T., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019; ISBN 978-3-662-53119-8.
157. Sánchez Morales, C.J. Desarrollo de un equipo de Micro-Electroconformado. Estudio experimental de aplicación a la fabricación de herramientas para el texturizado de superficies estructuradas. Doctoral Thesis, ULPGC: Spain, 2021.
158. Hafezi, H.; Rosenfeld, A. Apparatus and Method for Improving Uniformity in Electroplating 2006.
159. Du, L.; Yang, T.; Zhao, M.; Tao, Y.; Luo, L.; Wang, L.; Liu, C. Study on Improving Thickness Uniformity of Microfluidic Chip Mold in the Electroforming Process. *Micromachines (Basel)* **2016**, *7*, 7, doi:10.3390/mi7010007.
160. Booking, C.; Jacobson, D.M.; Rennie, A.E.W.; Bennett, G. The Fabrication of Electronic Packages from High Silicon Aluminium Alloys Using Thin Shell Electroformed (TSE) EDM Electrodes. *Transactions of the IMF* **2002**, *80*, 92–96, doi:10.1080/00202967.2002.11871441.
161. Benítez, A.N.; Ortega, F.; Monzón, M.D.; Hernández, P.M.; Marrero, M.D. Desarrollo de Electrodos EDM a Partir de Fabricación Aditiva y Electroconformado.; 2010.
162. Yang, H.; Kang, S. Improvement of Thickness Uniformity in Nickel Electroforming for the LIGA Process. **2000**, doi:10.1016/S0890-6955(99)00107-8.
163. Tan, Y.-J.; Lim, K.Y. Understanding and Improving the Uniformity of Electrodeposition. *Surface & Coatings Technology* **2003**, *2–3*, 255–262, doi:10.1016/S0257-8972(02)00916-7.
164. Galvanoplastia de Cobre, Parte 4: Colocación de Ánodo-Cátodo y Distribución de Corriente Secundaria. - Biblioteca En Línea Gratuita Available online:

https://www.thefreelibrary.com/Electroplating+of+copper%2C+Part+4%3A+anode-cathode+placement+and...-a0189552836 (accessed on 20 February 2022).
165. Gateros Plating Ltd Available online: https://www.gaterosplating.co.uk/copper-anodes (accessed on 20 February 2022).
166. Sole, M.J. Electroforming: Methods, Materials, and Merchandise. *JOM* **1994**, *46*, 29–35, doi:10.1007/BF03220715.
167. Watson, S. Modern Electroforming. *Transactions of the IMF* **1989**, *67*, 89–94, doi:10.1080/00202967.1989.11870849.
168. Hernández-Castellano, P.M.; Benítez-Vega, A.N.; Díaz-Padilla, N.; Ortega-García, F.; Socorro-Perdomo, P.; Marrero-Alemán, M.D.; Salguero, J. Design and Manufacture of Structured Surfaces by Electroforming. *Procedia Manufacturing* **2017**, *13*, 402–409, doi:10.1016/j.promfg.2017.09.030.
169. Hussain, M.S. Electroforming a Process for Macro/Nano Manufacturing. *IJNM* **2010**, *6*, 324, doi:10.1504/IJNM.2010.034794.
170. Jh, L.; Ec, P.; J, J.; Sb, J. Effect of Additives on Microstructure and Mechanical Properties of Nickel Plate/Mask Fabricated by Electroforming Process. *J. Electrochem. Soc.* **2009**, *156*, D108–D112.
171. Yeh, Y.-M.; Tu, G.-C.; Fu, M.-N. Simulation Analysis and Experimental Verification of UV-LIGA Process for High-Aspect-Ratio Ni–Fe Micro-Mold Insert. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2003**, *42*, 6683, doi:10.1143/JJAP.42.6683.
172. Brousseau, E.B.; Dimov, S.S.; Pham, D.T. Some Recent Advances in Multi-Material Micro- and Nano-Manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* **2010**, *47*, 161–180, doi:10.1007/s00170-009-2214-5.
173. Ming, P.M.; Li, Y.J.; Wang, Y.L.; Jiang, W.J. Fabrication of Micro-Precision Sieves with High Open Area Percentage Using Micro-Electroforming Technology. *AMR* **2012**, *426*, 64–68, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.426.64.
174. Zhao, M.; Du, L.; Xu, Z.; Zhang, X.; Cao, Q.; Ji, X.; Wei, Z.; Liu, J. Improving the Thickness Uniformity of Micro Electroforming Layer by Megasonic Agitation and the Application. *Materials Chemistry and Physics* **2020**, *239*, 122331, doi:10.1016/j.matchemphys.2019.122331.
175. Park, C.-W.; Park, K.-Y. An Effect of Dummy Cathode on Thickness Uniformity in Electroforming Process. *Results in Physics* **2014**, *4*, 107–112, doi:10.1016/j.rinp.2014.07.004.
176. Ryu, S.; Choo, S.; Choi, H.-J.; Kim, C.-H.; Lee, H. Replication of Rose Petal Surfaces Using a Nickel Electroforming Process and UV Nanoimprint Lithography. *Applied Surface Science* **2014**, *322*, 57–63, doi:10.1016/j.apsusc.2014.10.063.
177. Williams, S.S.; Retterer, S.; Lopez, R.; Ruiz, R.; Samulski, E.T.; DeSimone, J.M. High-Resolution PFPE-Based Molding Techniques for Nanofabrication of High-Pattern Density, Sub-20 Nm Features: A Fundamental Materials Approach. *Nano Lett.* **2010**, *10*, 1421–1428, doi:10.1021/nl100326q.
178. Choo, S.; Choi, H.J.; Lee, H. Replication of Rose-Petal Surface Structure Using UV-Nanoimprint Lithography. *Materials Letters* **2014**, *121*, 170–173, doi:10.1016/j.matlet.2014.01.037.
179. Du, L.; Liu, H.; Liu, C.; Zhu, S.; Qin, J. *Study on the Uniformity of Micro Electroforming Mold Insert Used in Micro Fluidic-Chip Fabrication*; 2007;
180. Li, H.Y.; Huang, C.; Zeng, H.P.; Jiang, K.Y. Experimental Study of Bipolar Pulse Electroforming on Micro Optical Aspheric Mold Manufacturing. *AMR* **2010**, *154–155*, 806–809, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.806.
181. Sun, S.; Li, Z.; Wang, P.; Huang, W. Fabrication of Micro Gear with New Technologies. In Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation; IEEE: Changchun, China, 2009; pp. 1427–1432.
182. Cohen, A.; Frodis, U.; Tseng', F.-G.; Zhang, G.; Mansfeld, F.; Wi, P. EFAB: Low-Cost Automated Electrochemical Batch Fabrication of Arbitrary 3-B Microstructures. 12.
183. Said, R.A. Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition: Experimental Investigation and Theoretical Modelling. 10.
184. Madden, J.D.; Hunter, I.W. Three-Dimensional Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition. *Journal of Microelectromechanical Systems* **1996**, *5*, 24–32, doi:10.1109/84.485212.
185. Zhu, D.; Zeng, Y.B. Micro Electroforming of High-Aspect-Ratio Metallic Microstructures by Using a Movable Mask. *CIRP Annals* **2008**, *57*, 227–230, doi:10.1016/j.cirp.2008.03.092.
186. Song, C.; Du, L.; Ji, X. Reducing the Residual Stress in Micro Electroforming Layer by Megasonic Agitation. *Ultrasonics Sonochemistry* **2018**, *49*, 233–240, doi:10.1016/j.ultsonch.2018.08.012.

187. Web of Science [v.5.34] - Análisis de Resultados de La Colección Principal de Web of Science Available online: https://wcs-webofknowledge-com.bibezproxy.uca.es/RA/analyze.do?product=WOS&SID=E6sGAz9rG5FbJ6joWY9&field=TASCA_JCRCategories_JCRCategories_en&yearSort=false (accessed on 28 December 2019).
188. Mascaraque-Ramírez, C.; Franco, P. Experimental Study of Tool Degradation in EDM Processes: Electrode Material Loss at the Border and Central Zones. *Int J Adv Manuf Technol* **2018**, *95*, 3497–3511, doi:10.1007/s00170-017-1469-5.
189. Joshi, A.Y.; Joshi, A.Y. A Systematic Review on Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Heliyon* **2019**, *5*, e02963, doi:10.1016/j.heliyon.2019.e02963.
190. Tsai, H.C.; Yan, B.H.; Huang, F.Y. EDM Performance of Cr/Cu-Based Composite Electrodes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **2003**, *43*, 245–252, doi:10.1016/S0890-6955(02)00238-9.
191. Megama La Electroerosión por Penetración. *Megama* 2019.
192. Bolufer, P. *Interempresas*. 2012,.
193. Amorim, F.L.; Weingaertner, W.L. The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Sinking Electrical Discharge Machining (EDM) of AISI P20 Tool Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2007**, *29*, 366–371, doi:10.1590/S1678-58782007000400004.
194. Puertas, I.; Luis, C.J. A Study on the Machining Parameters Optimisation of Electrical Discharge Machining. *Journal of Materials Processing Technology* **2003**, *143–144*, 521–526, doi:10.1016/S0924-0136(03)00392-3.
195. Zúñiga Ortiz, L.M. Estado Del Arte de Los Sistemas de Corte de Alta Precisión Edm y Pecm Para Aceros Hsla: Factibilidad de La Hibridación de Ambos Sistemas, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales: Saltillo, 2013.
196. Semon, G. *A Practical Guide to Electro-Discharge Machining*; Ateliers des Charmilles, 1975; ISBN 978-80-13-02356-8.
197. Arthur, A.; Dickens, P.M.; Cobb, R.C. Using Rapid Prototyping to Produce Electrical Discharge Machining Electrodes. *Rapid Prototyping Journal* **1996**, *2*, 4–12, doi:10.1108/13552549610109036.
198. By penetration EDM Available online: https://www.interempresas.net/MetalWorking/Articles/12327-By-penetration-EDM.html (accessed on 16 March 2021).
199. Producto de Grafito de Carbono,Electrodos de Grafito UHP Available online: http://www.feishinecarbon.es/index.html (accessed on 12 June 2020).
200. Pérez Blanco, L. Optimización del proceso de electroerosión, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación: Cantabria, 2014.
201. Medellín, H.; Flores, A.; Morales, J. Caracterización Experimental del Maquinado por Descarga Eléctrica en Agua. **2008**, 11.
202. Correa Valencia, M.; Pamies-Teixeira, J. Prediction of roughness surface in textured by electrical erosion using bayesian networks. *sist.telemat.* **2013**, *11*, 77, doi:10.18046/syt.v11i27.1696.
203. Joudivand Sarand, M.H.; Shabgard, M.R. Investigation of the Effect of Thermal Diffusivity Coefficient of Tool Material on Electrode-Tool Wear in the EDM Process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* **2015**, *15*, 806–821, doi:10.1016/j.acme.2015.06.009.
204. Guitrau, E.Bud. *The EDM Handbook*; Hanser Gardner Publications: Cincinnati, 1997; ISBN 1-56990-242-9.
205. Mohril, N.; Suzuki, M.; Furuya, M.; Saito', N.; Kobayashi, S.A. ElectrodeWear Process in Electrical Discharge Machining. 4.
206. Marafona, J.; Wykes, C. A New Method of Optimising Material Removal Rate Using EDM with Copper–Tungsten Electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2000**, *40*, 153–164, doi:10.1016/S0890-6955(99)00062-0.
207. Torres, A.; Luis, C.J.; Puertas, I. EDM Machinability and Surface Roughness Analysis of TiB2 Using Copper Electrodes. *Journal of Alloys and Compounds* **2017**, *690*, 337–347, doi:10.1016/j.jallcom.2016.08.110.
208. Barenji, R.V.; Pourasl, H.H.; Khojastehnezhad, V.M. Electrical Discharge Machining of the AISI D6 Tool Steel: Prediction and Modeling of the Material Removal Rate and Tool Wear Ratio. *Precision Engineering* **2016**, *45*, 435–444, doi:10.1016/j.precisioneng.2016.01.012.

209. Kumar, S.; Dave, H.K.; Desai, K.P. Experimental Investigation on Performance of Different Tool Movement Strategies in EDM Process for Boring Operation. *Int J Adv Manuf Technol* **2016**, *87*, 1609–1620, doi:10.1007/s00170-016-8443-5.
210. Yin, Q.; Wang, B.; Zhang, Y.; Ji, F.; Liu, G. Research of Lower Tool Electrode Wear in Simultaneous EDM and ECM. *Journal of Materials Processing Technology* **2014**, *214*, 1759–1768, doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.03.025.
211. Uhlmann, E.; Domingos, D.C. Automated Dressing of Graphite Electrodes for Electrical Discharge Machining (EDM) of Seal Slots in Turbine Components. *Procedia Manufacturing* **2016**, *6*, 45–52, doi:10.1016/j.promfg.2016.11.007.
212. Tricarico, C.; Delpretti, R.; Dauw, D.F. Geometrical Simulation of the EDM Die-Sinking Process. *CIRP Annals* **1988**, *37*, 191–196, doi:10.1016/S0007-8506(07)61616-3.
213. How accurate is wire EDM? Available online: https://www.micropulsewest.com/our-blog/how-accurate-is-wire-edm/ (accessed on 12 June 2020).
214. Staff *Fine MetalWorking*. May 26 2021,.
215. Konig, W.; Aachen, R.; Dauw, D.F. EDM-Future Steps towards the Machining of Ceramics.
216. Lee, L.C.; Lim, L.C.; Wong, Y.S.; Lu, H.H. Towards a Better Understanding of the Surface Features of Electro-Discharge Machined Tool Steels. **1990**, 11.
217. Surface Finish Achievable with EDM Available online: https://www.micropulsewest.com/our-blog/surface-finish-achievable-with-edm/ (accessed on 12 June 2020).
218. Yadav, S.; Kumar, V.; Misra, J.P.; Singh, R.K.; Upadhyay, V. Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* **2023**, doi:10.1177/09544089231215695.
219. Comparing EDM with conventional machining Available online: https://www.micropulsewest.com/our-blog/comparing-edm-conventional-machining/ (accessed on 12 June 2020).
220. EDM versus Milling in Mold or Die Machining. *Pacific Die Casting Corp.* 2019.
221. Zelinski, P. EDM vs. Milling In Die/Mold Machining 2000.
222. Modica, F.; Marrocco, V.; Fassi, I. Micro-Electro-Discharge Machining (Micro-EDM). In *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide*; Fassi, I., Shipley, D., Eds.; Springer Tracts in Mechanical Engineering; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 149–173 ISBN 978-3-319-39651-4.
223. Rajurkar, K.P.; Yu, Z.Y. 3D Micro-EDM Using CAD/CAM. *CIRP Annals* **2000**, *49*, 127–130, doi:10.1016/S0007-8506(07)62911-4.
224. Yu, Z.Y.; Masuzawa, T.; Fujino, M. Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method -. *CIRP Annals* **1998**, *47*, 169–172, doi:10.1016/S0007-8506(07)62810-8.
225. Masuzawa, T.; Kuo, C.-L.; Fujino, M. A Combined Electrical Machining Process for Micronozzle Fabrication. *CIRP Annals* **1994**, *43*, 189–192, doi:10.1016/S0007-8506(07)62193-3.
226. Masuzawa, T.; Fujino, M.; Kobayashi, K.; Suzuki, T.; Kinoshita, N. Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining. *CIRP Annals* **1985**, *34*, 431–434, doi:10.1016/S0007-8506(07)61805-8.
227. Pham, D.T.; Dimov, S.S.; Bigot, S.; Ivanov, A.; Popov, K. Micro-EDM—Recent Developments and Research Issues. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, *149*, 50–57, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.02.008.
228. Kibria, G.; Bhattacharyya, B. 4 - Microelectrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V: Implementation of Innovative Machining Strategies. In *Microfabrication and Precision Engineering*; Davim, J.P., Ed.; Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series; Woodhead Publishing, 2017; pp. 99–142 ISBN 978-0-85709-485-8.
229. Choudhary, M.S.K. Review Study and Importance of Micro Electric Discharge. **2017**.
230. Raju, L.; Hiremath, S.S. A State-of-the-Art Review on Micro Electro-Discharge Machining. *Procedia Technology* **2016**, *25*, 1281–1288, doi:10.1016/j.protcy.2016.08.222.
231. Connected Papers | Find and Explore Academic Papers Available online: https://www.connectedpapers.com/ (accessed on 6 April 2025).
232. Yarlagadda, P.K.D.V.; Christodoulou, P.; Subramanian, V.S. Feasibility Studies on the Production of Electro-Discharge Machining Electrodes with Rapid Prototyping and the Electroforming Process. *Journal of Materials Processing Technology* **1999**, *89–90*, 231–237, doi:10.1016/S0924-0136(99)00072-2.

233. Search - Consensus: AI Search Engine for Research Available online: https://consensus.app/search/ (accessed on 6 April 2025).
234. Elicit: The AI Research Assistant Available online: https://elicit.com/ (accessed on 6 April 2025).
235. AI Research Assistant with Agentic Approach | SciSpace Available online: https://scispace.com (accessed on 6 April 2025).
236. Barlas, P.A. *Making EDM Electrodes By Stereolithography*; 1988;
237. *Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping*; European Conference on Rapid Prototyping, Dickens, P.M., Eds.; University of Nottingham: Nottingham, 1992; ISBN 978-0-9519759-0-9.
238. *Proceedings of the 2nd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing: The University of Nottingham, 15th-16th July, 1993*; European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Dickens, P.M., Institution of Mechanical Engineers (Great Britain), Design Council, University of Nottingham, Eds.; University of Nottingham: Nottingham [England, 1993; ISBN 978-0-9519759-1-6.
239. Altan, T.; Lilly, B.W.; Kruth, J.P.; König, W.; Tönshoff, H.K.; van Luttervelt, C.A.; Khairy, A.B. Advanced Techniques for Die and Mold Manufacturing. *CIRP Annals* **1993**, *42*, 707–716, doi:10.1016/S0007-8506(07)62533-5.
240. Zhang, M.; Guo, D.; Jin, Z. EDM Performance of Electroformed Cu-ZrB2 Shell Electrodes. *Rapid Prototyping Journal* **2009**, *15*, 150–156, doi:10.1108/13552540910943450.
241. Medelli´n-Castillo, H.I.; Pedraza Torres, J.E. Rapid Prototyping and Manufacturing: A Review of Current Technologies. In Proceedings of the Volume 4: Design and Manufacturing; ASMEDC: Lake Buena Vista, Florida, USA, January 1 2009; pp. 609–621.
242. Kruth, J.P. Material Incress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. *CIRP Annals* **1991**, *40*, 603–614, doi:10.1016/S0007-8506(07)61136-6.
243. *Proceedings of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing: Hotel Villa Carlotta, Lake Maggiore, Belgirate, Italy, June 13th, 14th and 15th, 1995*; European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Dickens, P.M., Eds.; University of Nottingham: Nottingham, England, 1995; ISBN 978-0-9519759-4-7.
244. Ippolito, R.; Iuliano, L.; Gatto, A. EDM Tooling by Solid Freeform Fabrication & Electroplating Techniques.; 1996.
245. Bocking, C.; Rennie, A.E.W.; Bennett, G.R. Relationships Between Wall Thickness and Erosion Depth of Thin Walled Electroformed EDM Electrodes Produced From RP Models 469. **2000**, doi:10.26153/TSW/3073.
246. Shome, S.N.; Basu, J.; Sinha, G.P. *Proceedings of the National Conference on Advanced Manufacturing & Robotics,*; Allied Publishers, 2004; ISBN 978-81-7764-671-9.
247. Stucker, B.; Qu, X. A Finish Machining Strategy for Rapid Manufactured Parts and Tools. *Rapid Prototyping Journal* **2003**, *9*, 194–200, doi:10.1108/13552540310489578.
248. Zaw, H.M.; Fuh, J.Y.H.; Nee, A.Y.C.; Lu, L. Formation of a New EDM Electrode Material Using Sintering Techniques. *Journal of Materials Processing Technology* **1999**, *89–90*, 182–186, doi:10.1016/S0924-0136(99)00054-0.
249. Stucker, B.; Bradley, W.; Eubank, P.T.; Norasetthekul, S.; Bozkurt, B. Zirconium Diboride/Copper EDM Electrodes From Selective Laser Sintering. 10.
250. Choi, D.-S.; Lee, S.H.; Shin, B.S.; Whang, K.H.; Song, Y.A.; Park, S.H.; Jee, H.S. Development of a Direct Metal Freeform Fabrication Technique Using CO2 Laser Welding and Milling Technology. *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, *113*, 273–279, doi:10.1016/S0924-0136(01)00652-5.
251. Roberge, P.R. Chapado Sin Electrodos Available online: http://www.corrosion-doctors.org/MetalCoatings/Electroless.htm (accessed on 25 May 2020).
252. Onizuka, M. Electroformed Electrode for Electric Discharge Machining 1981.
253. Cao, Q.-D.; Fang, L.; Lv, J.-M.; Zhang, X.-P.; Thuy Dat, N. Effects of Pulse Reverse Electroforming Parameters on the Thickness Uniformity of Electroformed Copper Foil. *Transactions of the IMF* **2018**, *96*, 108–112, doi:10.1080/00202967.2018.1423736.
254. Rajurkar, K.P.; Pandit, S.M. Formation and Ejection of EDM Debris. *Journal of engineering for industry* **1986**, *108*, 22–26, doi:10.1115/1.3187036.
255. Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Sánchez-Morales, C.J.; Marrero-Alemán, M.D.; Martinez, J.M.V. Metrological Assessment of Microtextured EDM Electrodes Generated by Additive Manufacturing and Electroforming. *Key Engineering Materials* **2023**, *960*, 47–56, doi:10.4028/p-aqE0Xb.

256. Blom, R. Production and Evaluation of Rapid Tooling for Electric Discharge Machining Using Electroforming and Spray Metal Deposition Techniques. **2005**, 169.
257. Yang, B. Rapid Tooling by Integration of Solid Freedom Fabrication and Electrodepostion. *Disertación* **2000**, 181.
258. Sheng, P.; Bennet, D.; Thurwachter, S.; von Turkovich, B.F. Environmental-Based Systems Planning for Machining. *CIRP Annals* **1998**, *47*, 409–414, doi:10.1016/S0007-8506(07)62863-7.
259. Mohanty, S.; Mohanty, R.; Mahapatra, S. Study on Performance of EDM Electrodes Produced Through Rapid Tooling Route. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* **2017**, *16*, 357–374, doi:10.1142/S0219686717500214.
260. Luo, Y.; Ji, Z.; Caudill, R.J.; Leu, M.C. Lifecycle Analysis for Environmentally Conscious Solid Freeform Manufacturing. In Proceedings of the Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.00CH37082); May 2000; pp. 33–38.
261. Hsu, C.Y.; Chen, D.Y.; Lai, M.Y.; Tzou, G.J. EDM Electrode Manufacturing Using RP Combining Electroless Plating with Electroforming. *Int J Adv Manuf Technol* **2008**, *38*, 915–924, doi:10.1007/s00170-007-1155-0.
262. Roschli, A.; Borish, M.; Barnes, A.; MacDonald, E.; Wang, P.; Feldhausen, T. Chapter 4 - Geometry Data Storage. In *Motion and Path Planning for Additive Manufacturing*; Roschli, A.C., Borish, M.C., Barnes, A.K., Feldhausen, T.A., Wang, P.L., MacDonald, E., Eds.; Additive Manufacturing Materials and Technologies; Elsevier, 2024; pp. 59–69 ISBN 978-0-443-15286-3.
263. Phrozen Sonic Mini 8K Resin 3D Printer Available online: https://phrozen3d.com/products/sonic-mini-8k (accessed on 19 November 2024).
264. CHITUBOX | All-in-One SLA/DLP/LCD Slicer | 3D Printing Preprocessing Software- Available online: https://www.chitubox.com/en/download/chitubox-pro (accessed on 9 June 2023).
265. Mitutoyo, Product: TM-1005B Available online: https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/TM_Generation_B_Series/TM-1005B/$catalogue/mitutoyoData/PR/176-819D/index.xhtml (accessed on 31 March 2025).
266. Microscopy, L.M.S.L.U.A.; Europa, H.P.; 41-13; Llobregat, 4ª plantaL'Hospitalet de; rutas, 08908 Spain Teléfono : +34 93 494 95 30 Teléfono de servicio : +34 902 11 90 94 Fax : +34 93 494 95 24 Planificador de LAS X Life Science Software para aplicaciones de ciencias de la vida Available online: https://www.leica-microsystems.com/es/productos/software-de-microscopia/detalles/leica-las-x-ls/ (accessed on 8 June 2022).
267. Microscopio Binocular Biológico BX-51, OLYMPUS® Available online: https://ictsl.net/productos/aparatos/microscopiobinocularbiologicobx51olympus.html (accessed on 31 March 2025).
268. Alicona, B. InfiniteFocus G6. Fast measurements for smooth surfaces & offline CAD planning. Available online: https://www.alicona.com/en/products/infinitefocus/ (accessed on 9 June 2022).
269. MountainsMap® Surface Analysis Software for Profilometers Available online: https://www.digitalsurf.com/software-solutions/profilometry/ (accessed on 31 March 2025).
270. UNE *Especificación Geométrica de Productos (GPS). Calidad Superficial: Áreas. Parte 1: Indicación de La Textura Superficial. (ISO 25178-1:2016).*;
271. Bhushan, B. Biomimetics: Lessons from Nature–an Overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2009**, *367*, 1445–1486, doi:10.1098/rsta.2009.0011.
272. Erb, R.M.; Libanori, R.; Rothfuchs, N.; Studart, A.R. Composites Reinforced in Three Dimensions by Using Low Magnetic Fields. *Science* **2012**, *335*, 199–204, doi:10.1126/science.1210822.
273. Fishwick, M. Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things. *The Journal of American Culture* **2004**, *27*, 234–234, doi:10.1111/j.1537-4726.2004.133_10.x.
274. Wong, W. *Fundamentos Del Diseño*; 1º.; Gustavo Gili, 2012; ISBN 978-84-252-1643-5.
275. Contreras, A. Patrones Aleatorios En El Diseño de Interfaces Para Entornos Digitales. *festivaldelaimagen.com*.
276. Zhang, L.; Du, J.; Zhuang, X.; Wang, Z.; Pei, J. Geometric Prediction of Conic Tool in Micro-EDM Milling with Fix-Length Compensation Using Simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2015**, *89*, 86–94, doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.007.

277. Savio, G.; Rosso, S.; Meneghello, R.; Concheri, G. Geometric Modeling of Cellular Materials for Additive Manufacturing in Biomedical Field: A Review. *Applied Bionics and Biomechanics* **2018**, *2018*, 1654782, doi:10.1155/2018/1654782.
278. Ion, A.; Kovacs, R.; Schneider, O.; Lopes, P.; Baudisch, P. *Metamaterial Textures*; 2018; p. 12;.
279. Može, M.; Zupančič, M.; Golobič, I. Pattern Geometry Optimization on Superbiphilic Aluminum Surfaces for Enhanced Pool Boiling Heat Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2020**, *161*, 120265, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120265.
280. Leveles, B.; Kemény, A.; Orbulov, I. Manufacturing and Investigation of Aluminium Matrix Bimodal Metal Foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2020**, *903*, 012053, doi:10.1088/1757-899X/903/1/012053.
281. Liu, K.; Jiang, L. Bio-Inspired Self-Cleaning Surfaces. *Annual Review of Materials Research* **2012**, *42*, 231–263, doi:10.1146/annurev-matsci-070511-155046.
282. Hu, H.; Wang, D.; Tian, H.; Huang, Q.; Wang, C.; Chen, X.; Gao, Y.; Li, X.; Chen, X.; Zheng, Z.; et al. Bioinspired Hierarchical Structures for Contact-Sensible Adhesives. *Advanced Functional Materials* **2021**, *32*, doi:10.1002/adfm.202109076.
283. Kimchi, R.; Palmer, S.E. Form and Texture in HierarchicallyConstructed Patterns. **1982**.
284. Schifferstein, H.N.J.; Hekkert, P. *Product Experience*; 2007; ISBN 978-0-08-045089-6.
285. González Suárez, P. Desarrollo De Texturizados Superficiales Estéticos Y/O Funcionales. **2023**.
286. Torreblanca, D.; Patino, E. *Texturas Bioinspiradas y Fabricación Digital*; 2021; ISBN 978-958-764-957-4.
287. Lenau, T. *Biomimetics as a Design Methodology - Possibilities and Challenges*; 2009; Vol. 5;.
288. Dean, B.; Bhushan, B. Shark-Skin Surfaces for Fluid-Drag Reduction in Turbulent Flow: A Review. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* **2010**, *368*, 4775–4806, doi:10.1098/rsta.2010.0201.
289. Lee, D.-G.; Kim, Y.-J. Effects of Biomimetic Riblet Configurations on the Drag Reduction. *dteees* **2017**, doi:10.12783/dteees/eccsd2016/5830.
290. Hamilton, B.W.; Tutunea-Fatan, R.O.; Bordatchev, E.V. Preliminary Assessment of Asymmetric Triangular Riblet Microstructures for Drag Deduction and Fouling Resistance: Numerical Modeling, Fabrication, and Performance Evaluation. *Micromachines* **2022**, *13*, 2208, doi:10.3390/mi13122208.
291. Wanhao Duplicator 7 Plus. Reseña 2021. *Impresora-3D.Online* 2018.
292. Wei, P.-T.; Wei, T.C. Application in Self-Adsorption Pd Nanoparticles with High Adhesion. *Meet. Abstr.* **2023**, *MA2023-02*, 1231–1231, doi:10.1149/MA2023-02201231mtgabs.
293. Shin, W.G.; Deshmukh, P. Electroless Deposition of Ni Nanoparticles on Boron Particles: Physicochemical and Oxidation Properties. *Meet. Abstr.* **2024**, *MA2024-01*, 3034, doi:10.1149/MA2024-01263034mtgabs.
294. Pianka, H.; Boufal, V.P.; Alisiyonok, O.; Vlasov, M.; Chernik, A.; Xue, Y.; Taleb, A. Effects of Incorporating TiO2 Aggregates on the Growth, Anticorrosion, and Antibacterial Properties of Electrodeposited Multifunctional Coatings Based on Sn-Ni Materials. *Coatings* **2024**, *14*, 1344, doi:10.3390/coatings14111344.
295. Wang, Y.; Ma, B.; Li, W.; Liaw, P.K.; Wang, X.; Yang, S.; Zhong, N. Microstructures, Physical and Corrosion Behavior of NiCoFeCu High-Entropy Alloy Nanocomposite Coatings Electro-Co-Deposited with Nano-Si3N4 Particles. *Journal of Materials Research and Technology* **2024**, *33*, 2731–2743, doi:10.1016/j.jmrt.2024.09.262.
296. Mahović Poljaček, S.; Tomašegović, T.; Theohari, S.; Iakovidis, I.; Orfanoudakis, S.; Ntaflou, E. Optimization of the Interfacial Properties between Mechanically and Electrochemically Treated Aluminium and Nano-Modified Coatings for Printed Outdoor Applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **2024**, *135*, 103840, doi:10.1016/j.ijadhadh.2024.103840.
297. Wieland WILAPLAT. Electroforming Baths.
298. Tektronix Keithley 2400 Graphical Series SMU Instruments Available online: https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-graphical-series-sourcemeter (accessed on 13 March 2025).
299. Bomba peristáltica de 24V CC con tubo de silicona, bomba de líquido de agua de alto flujo, bomba de vacío dosificadora, autocebante, anticorrosión - AliExpress 13 Available online: //es.aliexpress.com/item/1005006677109633.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=&aff_short_key= (accessed on 27 February 2025).

300. Ortega-García, F. Efecto de Diferentes Parámetros Sobre La Calidad de Las Electroformas de Níquel Desarrollo y Validación de Dispositivo Para Mejorar La Uniformidad de Espesor. Thesis, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2014.
301. Oh, Y.; Chung, S.; Lee, M. Optimization of Thickness Uniformity in Electrodeposition onto a Patterned Substrate. *Mater. Trans.* **2004**, *45*, 3005–3010, doi:10.2320/matertrans.45.3005.
302. Masuku, E.S.; Mileham, A.R.; Hardisty, H.; Bramley, A.N.; Johal, C.; Detassis, P. A Finite Element Simulation of the Electroplating Process. *CIRP Annals* **2002**, *51*, 169–172, doi:10.1016/S0007-8506(07)61492-9.
303. Arquam, H.; Sharma, V.K.; Verma, A.B.; Kumbhakar, J.; Taguchi, G. An Overview on Taguchi's Method Employed for Product Quality Improvement and Its Control. *Journal of Science and Technology* **2024**.
304. Farzad-Rik, S.; Mahmoodi, M.; Tagimalek, H.; Maraki, M. Evaluation Affects Parameters of Fe-Rich CuAlNi Combination Electrodes in Mechanical Properties of GMAW-Based WAAM Process Using Taguchi Method. **2024**, *20*, 61–72, doi:10.22034/IJISSI.2024.2019560.1277.
305. Heydari, H.; Ahmadipouya, S.; Maddah, A.S.; Rokhforouz, M.-R. Experimental and Mathematical Analysis of Electroformed Rotating Cone Electrode. *Korean J. Chem. Eng.* **2020**, *37*, 724–729, doi:10.1007/s11814-020-0479-4.
306. Permadi, B.; Asroni, A.; Budiyanto, E. Proses elektroplating nikel dengan variasi jarak anoda katoda dan tegangan listrik pada baja ST-41. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin* **2020**, *8*, doi:10.24127/trb.v8i2.1080.
307. Putra, A.D.; Tsamroh, D.I.; Pradani, Y.F.; Meditama, R.F.; Muflih, A. Effect of Cathode Distance, Anode and Electroplating Time on Aluminum Alloy Corrosion Rate. *TRANSMISI* **2023**, *19*, 56–62, doi:10.26905/jtmt.v19i1.9572.
308. Aisyah, I.S.; Susilo, R.R.; Murjito The Effect of Distance Variation on Electroplating Process of Decorative Nickel-Chrome on the Microstructure, Thickness and Weight of Plating on A36 Steel. *AIP Conference Proceedings* **2022**, *2453*, 020013, doi:10.1063/5.0094401.
309. Hernández, P.; Socas, A.; Benítez, A.; Díaz, N.; Marrero, M.; Ortega, F.; Monzón, M. Computer Aided Electroforming. Elecform3D™. *Procedia Engineering* **2013**, *63*, 532–539, doi:10.1016/j.proeng.2013.08.198.
310. Memannavaz, H.; Pebdeni, H.H.; Liaghat, G.; Rahmati, S.; Najafi, M.; Fazeli, H. Numerical and Experimental Analysis of Copper Electroforming on an Aluminum Substrate as a Rotating Cone Electrode Cell. *ChemistrySelect* **2019**, *4*, 11839–11847, doi:10.1002/slct.201903204.
311. Biswal, H.J.; Vundavilli, P.R.; Gupta, A. Fabrication and Characterization of Nickel Microtubes through Electroforming: Deposition Optimization Using Evolutionary Algorithms. *J. of Materi Eng and Perform* **2022**, *31*, 1140–1154, doi:10.1007/s11665-021-06223-z.
312. Andreou, E.; Roy, S. Modelling the Scaling-Up of the Nickel Electroforming Process. *Frontiers in Chemical Engineering* **2022**, *4*.
313. Zhao, M.; Du, L.; Qi, L.; Li, Y.; Li, Y.; Li, X. Numerical Simulations and Electrochemical Experiments of the Mass Transfer of Microvias Electroforming under Ultrasonic Agitation. *Ultrasonics Sonochemistry* **2018**, *48*, 424–431, doi:10.1016/j.ultsonch.2018.07.002.
314. Sun, H.; Wang, X. Numerical Simulation of Nickel Electroforming Process Influenced by Flow Field. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems; April 2015; pp. 502–506.
315. McGeough, J.A.; Rasmussen, H. Analysis of Electroforming with Direct Current. *Journal of Mechanical Engineering Science* **1977**, *19*, 163–166, doi:10.1243/JMES_JOUR_1977_019_036_02.
316. Chalupa, A.; Warner, J.; Martin, J. Computational Study of Chemical Uniformity Impacts on Electrodeposition. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* **2024**, *37*, 238–243, doi:10.1109/TSM.2024.3414121.
317. Stereolithography on Silicon for Microfluidics and Microsensor Packaging. *Microsystem Technologies-micro-and Nanosystems-information Storage and Processing Systems* **2003**, *9*, 319–323, doi:10.1007/S00542-002-0254-Y.
318. Reeves, P.E. Reducing the Surface Deviation of Stereolithography Components.
319. Bordón, P.; Paz, R.; Monzón, M.D. Evaluation of the Performance of Atomic Diffusion Additive Manufacturing Electrodes in Electrical Discharge Machining. *Materials* **2022**, *15*, 5953, doi:10.3390/ma15175953.
320. Monzón, M.; Benítez, A.N.; Marrero, M.D.; Hernández, N.; Hernández, P.; Aisa, J. Validation of Electrical Discharge Machining Electrodes Made with Rapid Tooling Technologies. *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, *196*, 109–114, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.05.025.

321. Barati Darband, Gh.; Aliofkhazraei, M.; Khorsand, S.; Sokhanvar, S.; Kaboli, A. Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability. *Arabian Journal of Chemistry* **2020**, *13*, 1763–1802, doi:10.1016/j.arabjc.2018.01.013.
322. Erbil, H.Y. Practical Applications of Superhydrophobic Materials and Coatings: Problems and Perspectives. *Langmuir* **2020**, *36*, 2493–2509, doi:10.1021/acs.langmuir.9b03908.
323. Quéré, D. Wetting and Roughness. *Annual Review of Materials Research* **2008**, *38*, 71–99, doi:10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434.
324. Jung, Y.C.; Bhushan, B. Mechanically Durable Carbon Nanotube–Composite Hierarchical Structures with Superhydrophobicity, Self-Cleaning, and Low-Drag. *ACS Nano* **2009**, *3*, 4155–4163, doi:10.1021/nn901509r.
325. Wenzel, R.N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Ind. Eng. Chem.* **1936**, *28*, 988–994, doi:10.1021/ie50320a024.
326. Cassie, A.B.D.; Baxter, S. Wettability of Porous Surfaces. *Trans. Faraday Soc.* **1944**, *40*, 546, doi:10.1039/tf9444000546.
327. Majhy, B.; Priyadarshini, P.; K. Sen, A. Effect of Surface Energy and Roughness on Cell Adhesion and Growth – Facile Surface Modification for Enhanced Cell Culture. *RSC Advances* **2021**, *11*, 15467–15476, doi:10.1039/D1RA02402G.
328. Wang, L.; Luo, Y.; Yang, Z.; Dai, W.; Liu, X.; Yang, J.; Lu, B.; Chen, L. Accelerated Refilling Speed in Rapid Stereolithography Based on Nano-Textured Functional Release Film. *Additive Manufacturing* **2019**, *29*, 100791, doi:10.1016/j.addma.2019.100791.
329. Nosonovsky, M.; Bhushan, B. Biologically Inspired Surfaces: Broadening the Scope of Roughness**. *Advanced Functional Materials* **2008**, *18*, 843–855, doi:10.1002/adfm.200701195.
330. Grzelak, E.M.; Errington, J.R. Nanoscale Limit to the Applicability of Wenzel's Equation. *Langmuir* **2010**, *26*, 13297–13304, doi:10.1021/la1016164.
331. Marmur, A.; Bittoun, E. When Wenzel and Cassie Are Right: Reconciling Local and Global Considerations. *Langmuir* **2009**, *25*, 1277–1281, doi:10.1021/la802667b.
332. Yong, X.; Zhang, L.T. Nanoscale Wetting on Groove-Patterned Surfaces. *Langmuir* **2009**, *25*, 5045–5053, doi:10.1021/la804025h.
333. Hashemi, L.; Glerum, W.; Farajzadeh, R.; Hajibeygi, H. Contact Angle Measurement for Hydrogen/Brine/Sandstone System Using Captive-Bubble Method Relevant for Underground Hydrogen Storage. *Advances in Water Resources* **2021**, *154*, 103964, doi:10.1016/j.advwatres.2021.103964.
334. Yan, X.; Huang, Z.; Sett, S.; Oh, J.; Cha, H.; Li, L.; Feng, L.; Wu, Y.; Zhao, C.; Orejon, D.; et al. Atmosphere-Mediated Superhydrophobicity of Rationally Designed Micro/Nanostructured Surfaces. *ACS Nano* **2019**, *13*, 4160–4173, doi:10.1021/acsnano.8b09106.
335. Bormashenko, E. Progress in Understanding Wetting Transitions on Rough Surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science* **2015**, *222*, 92–103, doi:10.1016/j.cis.2014.02.009.
336. Yuan, Y.; Lee, T.R. Contact Angle and Wetting Properties. In *Surface Science Techniques*; Bracco, G., Holst, B., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2013; pp. 3–34 ISBN 978-3-642-34243-1.
337. Scholz, D.; Simutis, P. *Understanding Interfaces: Using Contact Angle Measurements to Determine Surface Tension, Interfacial Tension, and Kinetic Properties from Contact Angle Hysteresis*; 2022;
338. Vieira, A.; Jokinen, V.; Lepikko, S.; Ras, R.H.A.; Zhou, Q. Through-Drop Imaging of Liquid–Solid Interfaces: From Contact Angle Variations Along the Droplet Perimeter to Mapping of Contact Angles Across a Surface. *Langmuir* **2024**, *40*, 9059–9067, doi:10.1021/acs.langmuir.4c00414.
339. Wang, X.; Zhang, H.; Hsu, S. The Effects of Dimple Size and Depth on Friction Reduction Under Boundary Lubrication Pressure.; American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, March 23 2009; pp. 909–911.
340. Shiu, J.-Y.; Kuo, C.-W.; Chen, P.; Mou, C.-Y. Fabrication of Tunable Superhydrophobic Surfaces by Nanosphere Lithography. *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 561–564, doi:10.1021/cm034696h.
341. Zheng, Y.; Gao, X.; Jiang, L. Directional Adhesion of Superhydrophobic Butterfly Wings. *Soft Matter* **2007**, *3*, doi:10.1039/B612667G.
342. Lafuma, A.; Quéré, D. Superhydrophobic States. *Nature Mater* **2003**, *2*, 457–460, doi:10.1038/nmat924.
343. *VDI 3400 - Electrical Discharge Machining (DEM) - Definitions, Processes, Application*; 1975;



ANEXOS

ANEXO I

Publicaciones derivadas de la Tesis

Publicaciones en revistas

A continuación, se listan los artículos revidados de la investigación llevada a cabo durante la Tesis.

Indexación	Año	Cita
SJR (Q4)	**2023**	Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Sánchez-Morales, C.J.; Marrero-Alemán, M.D.; Martinez, J.M.V. Metrological Assessment of Microtextured EDM Electrodes Generated by Additive Manufacturing and Electroforming. *Key Engineering Materials* **2023**, *960*, 47–56, doi:10.4028/p-aqE0Xb.
JCR (Q1)	**2025**	Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Vázquez-Martínez, J.M.; Marrero-Alemán, M.D. Electroforming-Based Micro-Texturing: Advancements for Surface Engineering in EDM. *Heliyon* **2025**, *11*, e42439, doi:10.1016/j.heliyon.2025.e42439.
JCR (Q1)	**2025**	Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Salguero-Gómez, J.; Sánchez-Morales, C.J. Improved Design of Electroforming Equipment for the Manufacture of Sinker Electrical Discharge Machining Electrodes with Microtextured Surfaces. *Materials* **2025**, *18*, 1972, doi:10.3390/ma18091972.

Publicaciones complementarias

Estas publicaciones han derivado de información presente en la Tesis.

Indexación	Año	Cita
JCR (Q1)	**2024**	Sánchez-Morales, C.J.; Mirza-Rosca, J.; Lozano-Medina, J.C.; Hernandez-Pérez, M. Additive Manufacturing of Highly Detailed Copper Shells by AMSME Process. *Microscopy and Microanalysis* **2024**, *30*, ozae044.130, doi:10.1093/mam/ozae044.130.
SJR (Q4)	**2025**	González-Suárez, P.; Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M. Textured Surfaces Development with Parametric Design for Product Customization. In Proceedings of the Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing V; Manchado del Val, C., Miralbes Buil, R., Peris Fajarnés, G., Moncho Santonja, M., Rizzi, C., Roucoules, L., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, 2025; pp. 105–118.

Heliyon 11 (2025) e42439

Contents lists available at ScienceDirect

Heliyon

journal homepage: www.cell.com/heliyon

Research article

Electroforming-based micro-texturing: Advancements for surface engineering in EDM

Mariana Hernández-Pérez [a,*], Pedro M. Hernández-Castellano [a], Juan M. Vázquez-Martínez [b], María D. Marrero-Alemán [a]

[a] University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, Spain
[b] University of Cádiz, Cádiz, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Mask Stereolitography (MSLA)
Microtexturing
Electroforming
Surface microtopography
SEDM

ABSTRACT

In the domain of surface engineering, certain additive manufacturing technologies have established themselves as efficient and sustainable solutions. Mask stereolithography (MSLA) has gained prominence, especially when combined with the electroforming process for the production of microtextured copper electrodes. These electrodes are of particular interest in die sinking EDM (SEDM) applications, where high precision in geometry and microtextures is required, and alternative manufacturing technologies often struggle to meet these demands. This study presents the development of microtextured electrodes for sinking EDM processes (SEDM), fabricated by mask stereolithography (MSLA) and copper electroforming. The process starts with the design of textured 3D models using CAD software, followed by their fabrication with MSLA, using high-resolution photosensitive resins. Subsequently, the parts are metallized by sputtering to give them electrical conductivity and, finally, they are subjected to an electroforming process in an electrolytic bath to generate the copper shells. Finally, a metrological characterization was carried out at each stage of the process, from CAD design to the final part obtained by EDM, evaluating textures in low and high relief. The results demonstrate high replicability in the transfer of microtextures to electroformed shells. However, some dimensional variations are observed, primarily due to the inherent limitations of the resolution of MSLA technology. For biomimetic textures, such as those inspired by shark skin, excellent lateral fidelity was observed, while low-relief geometric textures presented greater variations due to the accumulation of photosensitive resin in the first layers of the texturing. Post-processing, particularly thorough cleaning using advanced techniques such as ultrasonic cleaning, proved crucial in minimizing dimensional errors and improving final accuracy. These findings provide a solid foundation for the development of future research aimed at optimizing the accuracy of electrode texturing for EDM applications, addressing a critical need in the field of functional surface microfabrication.

1. Introduction

Over the last century, advances in surface engineering have resulted from a broad understanding of how functional properties are

* Corresponding author.
E-mail addresses: mariana.hernandez@ulpgc.es (M. Hernández-Pérez), pedro.hernandez@ulpgc.es (P.M. Hernández-Castellano), juanmanuel.vazquez@uca.es (J.M. Vázquez-Martínez), mariadolores.marrero@ulpgc.es (M.D. Marrero-Alemán).

https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42439
Received 17 December 2024; Received in revised form 1 February 2025; Accepted 1 February 2025
Available online 4 February 2025
2405-8440/© 2025 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

influenced by surface properties. All surfaces possess textures and structures, some of which are explicitly engineered, while others are inherent in the nature of the materials or the forming processes to which they have been subjected [1]. Surface texture control has become increasingly important in modern engineering, especially in applications where precision and functional performance of surfaces are critical. In addition to the aesthetic benefits it can provide, texturing imparts functional properties to surfaces that optimize the behavior of devices and components in various industrial environments [2]. As these textures are miniaturized to the micro- and nanometer scale, they become even more relevant as they decisively influence key properties such as friction, adhesion, hydrophobicity and light scattering, fundamental aspects in sectors that require high precision [3]. As these textures are miniaturized to the micro- and nanometer scale, they become even more relevant as they decisively influence key properties such as friction, adhesion, hydrophobicity and light scattering, fundamental aspects in sectors that require high precision [4,5].

In the context of sinking EDM (SEDM) applications, surface textures designed for electrodes span a size range of typically 10–50 μm when fabricated by conventional methods such as chemical etching or micromachining. While these methods are widely used, they have significant limitations, such as high operational costs, generation of hazardous waste, and lack of flexibility to create complex patterns [6,7]. Conversely, emerging technologies such as mask stereolithography (MSLA) present a compelling alternative by enabling the fabrication of surface textures in the 20–200 μm range, offering enhanced versatility and reduced environmental impact. However, these technologies face inherent limitations, such as resolution restricted by the pixel size of the equipment (20–50 μm) and distortions caused by the accumulation of liquid resin in the initial layers [8].

Surface metrology has evolved to address these challenges, moving from a traditional focus on linear profiles to full surface area characterization [7,8]. This paradigm shift, which includes both stochastic and structured surfaces, has allowed for a better understanding of how surface topography influences device performance [9,10].

Among the methods that can be used to create textures, additive manufacturing (AM), specifically mask stereolithography (MSLA), has gained popularity for its ability to produce complex textured surfaces with extremely high levels of detail. However, the quality of the micro-textures produced is dependent on the precision of the equipment and the quality of the materials used. Limitations in display resolution and the need for rigorous post-processing pose significant challenges to achieving highly accurate functional surfaces [11]. An example of this is the use of ultrasonic cleaning techniques to remove resin residues that would limit the functionality of the textures. In this context, electroforming is emerging as an effective solution for the precise replication of complex geometries and surface textures. Electroforming is an electrolytic process used to produce metal parts of reduced thickness by controlled deposition of metal onto a model or pattern [12]. It is an essential process in several industrial applications that require high fidelity of detail, such as the manufacture of precision tools and micro-components [13]. The process starts with the preparation of a model part on which metal is deposited on its active surfaces, which must be electrically conductive to achieve metal deposition [14]. Once the required thickness is reached, the metal layer has its own integrity and is separated from the model part to obtain the final electroform [13,15,16].

Previous studies have explored the combination of MSLA and electroforming for the manufacture of tools for die sinking EDM (SEDM) and concluded that this combined process is feasible. High-precision textured electrodes can be obtained at low cost, with reasonable manufacturing time, and with a significant reduction in toxic waste generation compared to other traditional texturing methods. The main objective of this study is to enhance the reproducibility of electroforming micrometric-level textures generated by the MSLA process. The study is divided into two distinct phases. In the first phase, a synthetic description of a previous study is made to serve as a reference for the results and to present the main conclusions that guided the actions described in the second phase. In the second phase, the improvement of microtexture replicability through the implementation of complete cleaning protocols in MSLA

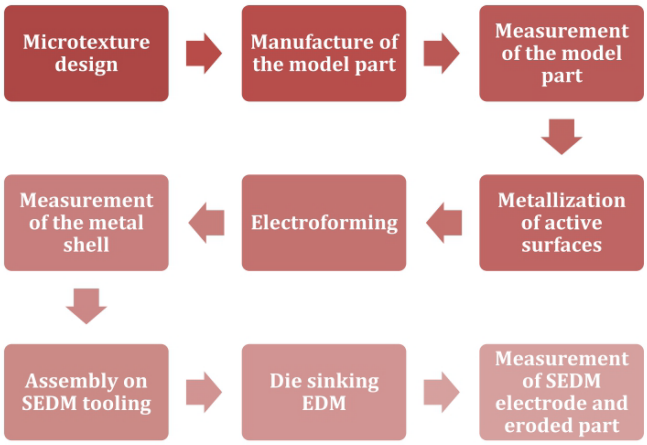


Fig. 1. Flow required for the production of electroformed SEDM electrodes.

technology is studied.

2. Materials y methods

2.1. Methodology for the development of electroformed SEDM electrodes

The SEDM electrode manufacturing process (see Fig. 1) begins with the design of model parts with textured surfaces, which are adjusted to align with the functional requirements and process capabilities. The model part is then manufactured using MSLA, with the appropriate operating parameters for the equipment and resin being set in advance. This technology requires post-processing for cleaning and curing. Once the plastic model part is obtained, it is necessary to metallize some of its surfaces in order to allow the passage of the electric current that produces the metal deposition in the electroforming process. To this end, the sputtering process is employed, enabling the deposition of a layer of a few nanometers on the active surfaces without affecting the geometry of the textures.

Once the model part is connected to the power supply and positioned correctly with the recirculation system, it can be introduced into the electrolytic bath. Once the program has been initiated, the electroforming process can begin. The power supply will then regulate the current and voltage parameters throughout the deposition stages. Once the total time established in the deposition program has elapsed, the process is concluded and the model part with the copper shell is removed from the bath. Prior to separating the shell from the model part, it is essential to reinforce it by filling the back side with an epoxy resin. This will prevent deformation during the separation process and facilitate assembly in the tooling designed for EDM. The equipment used in the two study phases of this project is outlined below.

2.2. Equipment and materials

2.2.1. Design of the model part

To carry out the first phase study it was necessary to generate the electroforms. To conduct the initial phase of the study, it was essential to create the electroforms. Accordingly, the requisite model parts were designed using the Fusion360 program with micrometric textures applied directly to the functional surface, enabling precise modeling of the desired patterns. Similarly, as illustrated in Fig. 2, a variety of micro textures were developed, which can be classified into three main groups: aesthetic, geometric, and biomimetic patterns. During the study, some textures were redesigned and parameterized to enhance replicability and functionality of the final pieces. This involved adjusting parameters such as maximum depth, pattern frequency, and texture orientation.

Fig. 1 illustrates the complete design of the model part, showcasing the active surfaces and the flat face where texturing is generated. The lower section presents a range of geometric patterns that can be incorporated into the central region of the model part.

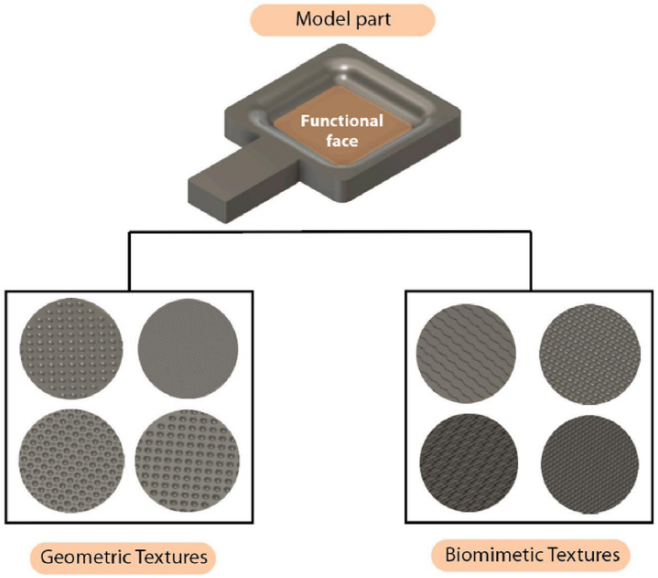


Fig. 2. Design of the model piece where the different textures will be applied.

To carry out the different studies that will be shown below, the textures of the geometric pattern of hemispheres and the biomimetic pattern of shark skin were selected. The former is a low relief texture and the latter is a high relief texture in order to evaluate if this aspect has an influence on the reproduction of textures at this scale. The selected textures and their main dimensions are shown in Fig. 3.

The texture composed of low relief hemispheres (Fig. 3a) may be suitable for a wide range of industrial applications, such as lubricant retention or reducing the contact area between components, among others [17]. In this texturing (Fig. 3a), composed of an 8 × 8 matrix and another 7 × 7 interleaved matrix, the value "a" represents the diameter of the hemisphere; "b" represents the distance between centers in the horizontal; "c" represents the distance between centers in the vertical; and "d" represents the depth or radius of the hemisphere. On the other hand, the second bio-inspired texture in over relief (Fig. 3b), was designed with an attempt to achieve a hydrophobic property on the surfaces. In this second texturing (Fig. 3b) with an 18 × 10 matrix and another interleaved matrix of 17 × 9, the value "a" represents the length of the scale; "b" represents the distance between the lateral ends in the horizontal; 'c' represents the distance between the lateral ends in the vertical and "d" represents the height of the scale.

2.2.2. Manufacturing and post-processing of model parts

For the manufacturing of the pieces, the first study used the Wanhao Duplicator 7 MSLA equipment, which offers a screen resolution of approximately 47 μm and allows working with a layer height of 50 μm. The material used was a commercial photosensitive resin of the same brand as the equipment, Wanhao 3D Printing Resin Clear, chosen for its transparency, which allowed the observation of the metal shell generation process in its early stages. For the second study, a more powerful MSLA machine, the Phrozen Mini 8K, was used, offering a screen resolution of 22 μm per pixel and layer heights of up to 10 μm, which represents a significant improvement in the level of detail of the geometric patterns that can be fabricated. The material used was Phrozen Aqua Red-Clay 8K photosensitive resin from the same manufacturer. The parameters used in each case are shown in Table 1, varying only the essential parameters required by the change in resin in order to make the comparison as reliable as possible.

In the first study, a manual cleaning protocol, as detailed in Table 2, was performed using only one curing station. In the second study, the post-processing of the parts was also significantly improved using new equipment. Isopropyl alcohol washing was enhanced by the use of Phrozen's Vortex Agitation Wash Station, complemented by Phrozen's Ultra-Sonic Cleaner ultrasonic cleaning equipment, which removed almost all resin residue from the textured surface. Drying and curing was enhanced with Phrozen's Cure Kit station, which completed the resin polymerization process. The cleaning protocols used in both studies, shown in Table 2, are detailed below to explore the influence of the different equipment used.

2.2.3. Metallization

The active surfaces were metallized using the Quorum Technologies SC7620 'Mini' sputtering system, which deposits a gold-palladium layer of a few nanometers thickness that does not alter the geometry of the textures. Two 120-s depositions were performed at 18 mA to ensure metallization of the entire textured surface.

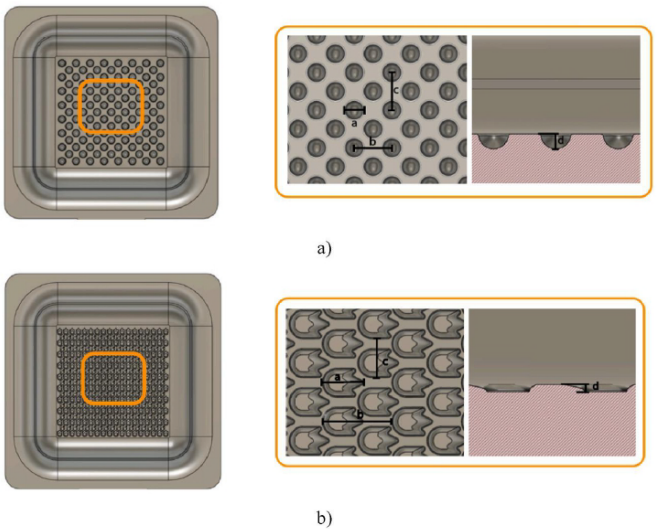


Fig. 3. a) Design and composition of the geometric texture under relief; b) Design and composition of the biomimetic texture on relief.

Table 1
Technical specifications for printing with different equipment.

Parameters	Parameters	Values	
		Wanhao	Phrozen
Basic information	Layer height (μm)	50	50/25
	Retraction speed (mm/min)	150	150
Undercoats	Nº of layers	4	4
	Exposure time(s) (seg)	40	35
	Lifting distance (mm)	6	6
	Lifting speed (mm/min)	60	60
Normal layers	Exposure time(s) (seg)	10	2
	Lifting distance (mm)	6	6
	Lifting speed (mm/min)	60	60
Waiting during printing	Rest time after retracting (seg)	3	3

Table 2
Cleaning protocols employed in the study.

Stages	1	2	3	4	5
Protocols	Pre-separation of the model part	Cleaning with isopropyl alcohol	Ultrasonic cleaning	Drying	Curing
Original Manual Cleaning (MC)	Yes	Manual spraying	No	Pressurized air	2 min
Manual Cleaning (MC)	Yes	Manual spraying	No	Automatic station drying	2 min
Power Assisted Cleaning (AM)	No, it remains on the platform	2 min in washing station	Yes	Pressurized air	2 min

2.2.4. Electroforming

The experimental laboratory equipment used for electroforming was developed specifically for this research project. The main components are shown in Fig. 6. These were defined in detail in the work of Sánchez Morales, C.J [18]. The Bright Copper Plating Bath CU 501 electrolytic copper bath, produced by the Heimerle-Meule company, was used. The power supply used is the Keithley 2460 SourceMeter, which enables the programming of distinct stages with both constant voltage and constant current. Following several trials, a program comprising four stages of increasing intensity was established to achieve a gradual and complete deposition of the geometric details and textures. The total time required for the elaboration of the shells was 240 min, resulting in an average thickness of 0.3 mm.

2.2.5. Metrological characterization

For the metrological characterization studies, the Alicona InfiniteFocusG5+ variable focus microscope available at the Metrology Laboratory of the University of Cadiz, shown in Fig. 4, was used. It allows the measurement of several geometric features in the sub-micron range with a maximum resolution of 10 nm in the vertical direction, which allows the measurement of roughness in the order of 30 nm. The software used to analyze the results obtained is MountainsMap, developed for the analysis of surface microtopography [19].

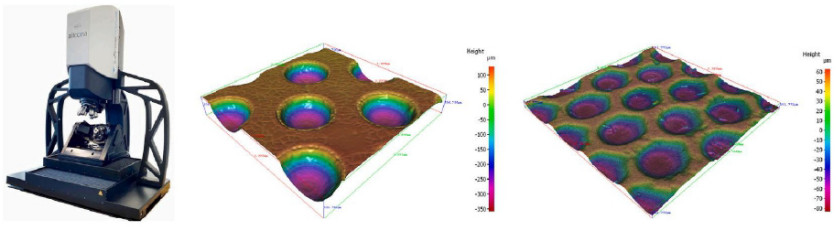


Fig. 4. a) Alicona InfiniteFocusG6 variable focus microscope; b) three-dimensional topography of incoming hemisphere texture; c) three-dimensional topography of shark skin texture.

3. Results

This section details the results of the two studies presented in this paper, highlighting the most relevant aspects.

3.1. Phase 1. study of dimensional deviation in the fabrication of microtextured EDM electrodes

This section summarizes the key findings from the previous work on dimensional deviation analysis at all stages of the electroformed electrode manufacturing process. The main sources of error were identified in the nominal reference dimensions established in the CAD of the model part, shown in Fig. 6a and b, in the fabricated model part, in the electroformed copper shell, and in the final dimensions in the EDM part.In this study, the average values of 10 measurements were calculated for each size, obtained from the information provided by variable focus microscopy. This manual measurement process was carried out using the MountainsMap software, and the standard deviations of the corresponding samples were determined. The results obtained are presented in Tables 3 and 4.

It was concluded that the main source of error is in the manufacturing of the model part, mainly in the parameter "a", which defines the reference dimension of the texture generator element, and the parameter "d", which defines the height of the generator element.

It was concluded that the main source of error is in the fabrication of the model part, due to the resolution of the screen of the device on the one hand, and the overexposure of the liquid resin adhering to the surfaces during the fabrication of the subsequent layers on the other hand. With a pixel size of 47 μm of the MSLA device used, a minimum matrix of 25 × 25 pixels is required to define the circular geometry of the element generating the hemispherical texture. If this regular shape is not well centered in the matrix, significant distortions of the original shape are generated, as shown in Fig. 5. The geometry of the biomimetic texture generator element is more irregular, and the geometric distortion can be proportionally greater in the areas of lower dimensional detail closer to the pixel size.

Regarding the geometric distortion caused by the liquid resin that remains adhered to the solidified surfaces, this resin receives a new light exposure when the new layer is generated, so that part of it solidifies as well. This distortion is influenced by the ease with which the resin moves when the building platform is moved, so that it is more pronounced in geometries that create traps. Low relief microstructures are likely to be more affected by this phenomenon than high relief microstructures (Fig. 6a). During the MSLA fabrication process, the combined effect of these two phenomena occurs, producing an amplification of these geometric distortions. Added to this is the possible lack of repeatability in the horizontal positioning of the construction plate during the up and down movements of the same, influenced by the mechanical solutions of these mechanisms and their state of conservation (Fig. 6b).

Therefore, as can be seen from the results in Tables 1 and 2, the error variance in the fabrication of the copper shell by electroforming and in the fabrication of the EDM part are very small compared to those obtained in the fabrication of the model part. This clearly indicates that the replication capability of both processes is far superior to that of the MSLA process used.

3.2. Phase 2. improvement in the manufacturing of the model parts

Based on the results of the preliminary study, it was identified that the manufacturing stage of the model parts using MSLA was critical to improve the replicability of the proposed process. For this reason, it was decided to acquire a higher performance equipment, the Phrozen Mini 8K complemented with advanced post-processing systems, as indicated in section 2.

With this new equipment, it was decided to keep the same textures described in Phase 1 in order to make a more reliable comparison of the results. We wanted to analyze in detail the influence of the cleaning phase of the model parts prior to curing in order to define a procedure that would allow us to achieve the highest possible level of detail. In order to make a direct comparison with the results obtained in Phase 1, it was decided to first maintain a manual cleaning process as used in that phase and then compare it with the cleaning protocols already described in the Materials section. Also, with this new equipment, we wanted to work with layer heights of 25 μm, half the value used in the first phase, in order to improve the vertical resolution of the textures generated.

The introduction of this process for producing textured model parts of higher quality has made it possible to achieve a higher level of definition in the textures, as can be seen in Figs. 7 and 8, where the surface topography measured by the variable focus microscope is shown.

The point cloud obtained with the variable focus microscope allows to perform measurements with the MountainsMap software, developed for the analysis of the microtopography of 3D surfaces. Tables 5 and 6 show the results of the measurement process of the

Table 3
Metrological characterization of the low relief semisphere texture generation process.

Low relief semisphere texture										
		PHASE 1: Model Part			PHASE 2: Copper Shell			PHASE 3: Eroded Piece		
D [mm]	CAD [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 1 [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 2 [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 3 [mm]
a	**1.2**	1.142	0.038	0,058	1.111	0.014	0,089	1.149	0.020	0,051
b	**2.5**	2.509	0.010	−0,009	2.515	0.015	−0,015	2.518	0.009	−0,018
c	**2.5**	2.513	0.011	−0,013	2.515	0.012	−0,015	2.508	0.017	−0,008
d	**0.6**	0.401	0.014	0,199	0.458	0.021	0,142	0.443	0.004	0,157

D: Dimension; S.D.: Standard Deviation; Av.: Average; Error 1 = CAD – Av.P.M.; Error 2 = CAD – Av.C.C.; Error 3 = CAD – Av.P.E.

Table 4
Metrological characterization of shark skin textures generation process.

Shark skin texture										
		PHASE 1: Model Part			PHASE 2: Copper Shell			PHASE 3: Eroded Piece		
D [mm]	CAD [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 1 [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 2 [mm]	Av. [mm]	S.D. [mm]	Error 3 [mm]
a	**1.21**	1042	0,031	0,168	1056	0,029	0,154	1065	0,032	0,145
b	**2.00**	2047	0,021	−0,047	2051	0,016	−0,051	2040	0,014	−0,040
c	**1.10**	1136	0,020	−0,036	1119	0,037	−0,019	1117	0,027	−0,017
d	**0.15**	0,128	0,005	0,022	0,139	0,005	0,011	0,131	0,004	0,019

D: Dimension; S.D.: Standard Deviation; Av.: Average; Error 1 = CAD – Av.P.M.; Error 2 = CAD – Av.C.C.; Error 3 = CAD – Av.P.E.

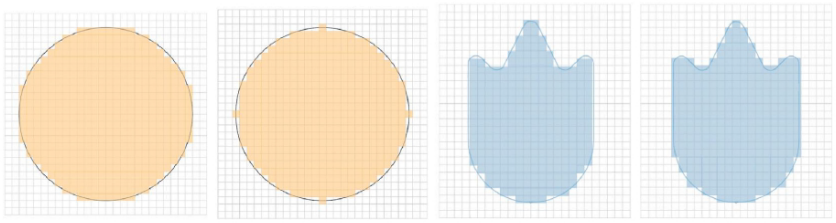


Fig. 5. Representation of dimension distortion attributed to the 3D printer screen resolution.

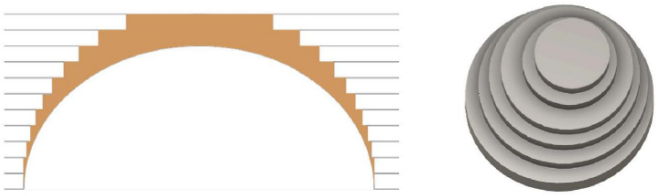


Fig. 6. a) Resin entrapment in incoming geometry; b) Error generated by the construction plate.

parameters defining the textures, "a", "b", "c" and "d", for the 4 cases of analysis mentioned. The same procedure was used to obtain the mean and the standard deviation of a sample of 10 measurements. For the first three values, the measurement is constrained within a box and for the "d" value, the study of the peaks/valleys present in the software is used. It is observed that the errors are drastically reduced when the assisted cleaning is applied, and a significant error reduction is also observed when the accuracy of the MSLA equipment is improved by maintaining a manual cleaning procedure.

In the case of the texture of the hemispheres in low relief, no significant differences were observed when a manual cleaning process

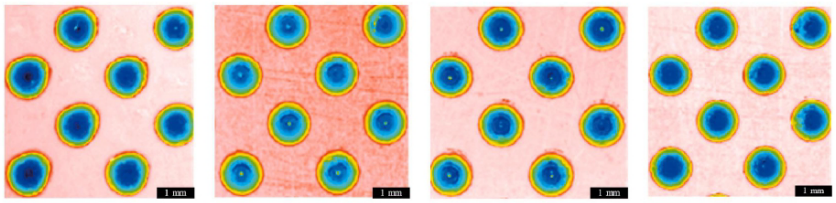


Fig. 7. Texture resolution of hemispheres as a function of cleaning protocol, layer height and equipment resolution.

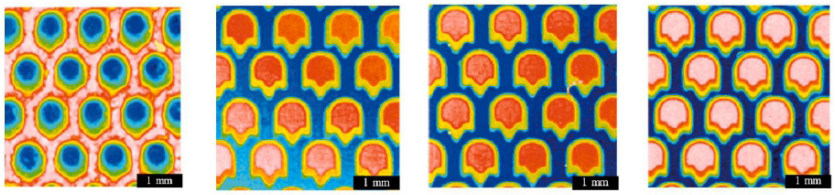


Fig. 8. Shark skin texture resolution as a function of cleaning protocol, layer height and equipment resolution.

Table 5
Metrological characterization of the low relief semisphere texture cleaning process.

Low relief semisphere texture												
D	CAD	MC_50_original			MC_50			AC_50			AC_25		
		Av	S.D.	Error 1	Av	S.D.	Error 2	Av	S.D.	Error 3	Av	S.D.	Error 4
a	**1200**	1142	0,038	0,058	1136	0,016	0,064	1163	0,015	0,037	1170	0,016	0,030
b	**2500**	2509	0,01	0,009	2518	0,022	0,018	2501	0,003	0,001	2503	0,005	0,003
c	**2500**	2513	0,011	0,013	2512	0,020	0,012	2506	0,005	0,006	2506	0,005	0,006
d	**0,600**	0,401	0,014	0,199	0,468	0,016	0,132	0,601	0,003	0,001	0,586	0,008	0,014

D: Dimension; S.D.: Standard Deviation; Av.: Average; Error 1 = CAD – Av.O. (50 μm).; Error 2 = CAD – Av.M.C. (50 μm); Error 3 = CAD – Av.C.C. (50 μm).; Error 4 = CAD – Av.C.C. (25 μm).

Table 6
Metrological characterization of shark skin textures cleaning process.

Shark skin texture												
D	CAD	MC_50_original			MC_50			AC_50			AC_25		
		Av	S.D.	Error 1	Av	S.D.	Error 2	Av	S.D.	Error 3	Av	S.D.	Error 4
a	**1160**	1042	0,031	0,168	1151	0,017	0,009	1154	0,008	0,006	1164	0,010	0,004
b	**2060**	2047	0,021	0,047	2064	0,024	0,004	2064	0,010	0,004	2058	0,010	0,002
c	**1100**	1136	0,02	0,036	1100	0,006	0,000	1100	0,000	0,000	1100	0,000	0,000
d	**0,150**	0,128	0,005	0,022	0,141	0,007	0,009	0,153	0,002	0,003	0,149	0,004	0,001

D: Dimension; S.D.: Standard Deviation; Av.: Average; Error 1 = CAD – Av.O. (50 μm).; Error 2 = CAD – Av.M.C. (50 μm); Error 3 = CAD – Av.C.C. (50 μm).; Error 4 = CAD – Av.C.C. (25 μm).

was applied, but very significant differences were observed when the assisted cleaning process was applied. However, for the biomimetic texture in high relief, the errors in all phase 2 textures are much lower than the phase 1 reference texture. This is possibly due to the greater ease of resin movement in these over-relief textures, where the chances of entrapment are much lower.

Contrary to what happens with the sharkskin texture, the error in the "f" dimension in the cleaning protocol for layer heights of 25 μm, although lower than in the manual cleaning protocols, still maintains a relatively high value with respect to the other dimensions (around 15 μm) in the hemisphere texture. This behavior could be related to the curved geometry of the texture, where the identification of the measuring points is more complex.

In addition, a similar situation, although to a lesser extent, is observed in dimension "a", where the error in AC_50 and AC_25 is practically half of that in the manual cleaning protocol. This can be explained by the longer curvature of the spheres, which could cause difficulties in the accurate detection of the end line for the measurements. The algorithms used for edge detection could have limitations when faced with curved surfaces, increasing the possibility of errors in the dimensional calculation.

For the shark skin texture, the implementation of the new equipment made a significant difference, significantly reducing the errors for the different dimensions analyzed. In addition, by applying more thorough cleaning methods and reducing the layer height, the errors decreased significantly, reaching minimal differences compared to the CAD model, with variations of only 4 μm.

In conclusion, the study has shown a significant improvement in the resolution and geometric accuracy of the evaluated textures between Phase 1 and Phase 2, which is reflected in the reduction of the average dimensional error in all analyzed parameters. For the hemispherical textures, the average error of the "a" dimension was reduced from 0.058 mm in Phase 1 (MC_50_original) to 0.030 mm in Phase 2 (AC_25), an improvement of 48.3 %. The "d" dimension showed the greatest improvement, going from an error of 0.199 mm in Phase 1 to 0.014 mm in Phase 2, a reduction of 92.9 %. Similarly, in the shark skin texture, dimension "a" showed a reduction in error from 0.168 mm (MC_50_original) to 0.004 mm (AC_25), an improvement of 97.6 %. Finally, dimension "d" experienced a reduction in error from 0.022 mm to 0.001 mm between the two phases, achieving a reduction of 95.5 %. These results underline the effectiveness

of the improvements implemented in the technology and process protocols.

4. Discussion

This previous study also analyzed the dimensional variation of the copper shell after the EDM process under finishing conditions with a very low VDI. The aim was to evaluate the wear experienced by the electrode, obtaining variations in the order of a few microns, observing that the most significant variations were due to the adhesion of particles of the eroded material or to possible deformations due to the temperatures reached during the EDM process.

The results obtained are in agreement with the study of Acharya et al. which confirms that electroformed copper electrodes have a high potential for application in EDM processes under finishing conditions, where controlled wear is sought to achieve high precision [20]. This is what is sought in the functional texturing of surfaces by providing those geometric elements that achieve certain properties.

After analyzing the results presented in this work, it can be concluded that the reproducibility of the microtextures studied has improved significantly. In Phase 1, it was found that the main limitation was the manufacturing process of the model parts by MSLA. Likewise, a visual inspection was carried out with the Olympus BX51 fluorescence microscope, which showed a very high capacity of replication in the electroforming process, regardless of the type of texture (Fig. 9). This confirms that the choice of the sputtering process for plating the active surfaces of the model parts does not cause any significant geometric distortion of the microtextures.

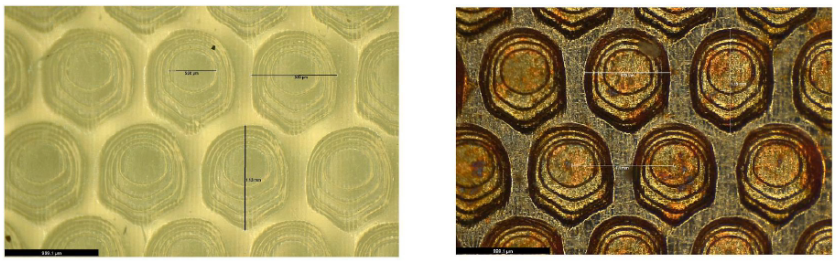
Post-processing, specifically the cleaning phase prior to curing, has a very significant impact on the dimensional accuracy of parts manufactured using technologies such as MSLA, especially when geometric details in the micrometer range are to be generated. This aspect has been highlighted by several previous studies, such as Trieu et al. who analyzed the post-processing of stereolithography parts and observed that electrolytic cleaning had a direct effect on the consistency of the layer thickness, resulting in more accurate parts with less deformation [21]. Similarly, Chen et al. investigated post-processing in 3D printing to improve the accuracy of ceramic membranes and concluded that thorough cleaning is critical to minimize dimensional errors associated with residual resin buildup [22].

The use of high-resolution MSLA equipment makes it possible to reduce the size of the texture-generating elements. The Phrozen Mini 8K equipment would make it possible to obtain textures with the same level of detail as those obtained with the Wanhao Duplicator 7 equipment used in Phase 1, but with a dimension almost 5 times smaller. If we add to this the use of much more efficient assisted cleaning systems, such as those used in Phase 2 of this work, the same textures can be obtained with a parameter “a" of the generator element around 250 μm. This would also imply a much larger file size needed for additive manufacturing, as the mesh would be much more refined.

For this reason, we have proposed a geometric simplification of the elements generating the textures, adapting them to the construction capabilities of the available MSLA equipment. In the geometries proposed in this study, we have thought of modeling the hemisphere by successive extrusion cuts of discs of variable diameter and height equal to the thickness of the layer to be used in the manufacturing process. In the case of the sharkskin texture, it would be modeled by superimposing two-dimensional contours with the thickness of the layer height (Fig. 10). At these scales, the manufacturing process itself creates edge rounding that smooth the geometries without the need to introduce these features into the modeling. This strategy allows for a significant reduction in the weight of the digital files without losing the ability to define the geometries in detail.

To achieve more realistic biomimetic textures, a parameterization of the geometry of the generating elements has also been implemented to apply variable orientation and distortion factors in three dimensions. In this way it is possible to generate more organic textures, as in the example of the shark skin, with scales of different sizes and orientations, as shown in (Fig. 10a), for which the Grasshopper module of the Rhinoceros application was used.

In addition, preliminary tests have been conducted with bio-inspired shark skin textures applied by erosion to aluminum sheets to evaluate their functional properties. The results have shown significant hydrophobic behavior, reaching contact angles above 100°, reinforcing the potential of these textures in applications where water resistance is critical. Moreover, this value is improved by



a) Model part analysis *b) Electroform analysis*

Fig. 9. Texture analysis of incoming hemispheres in resin model part and in copper shell.

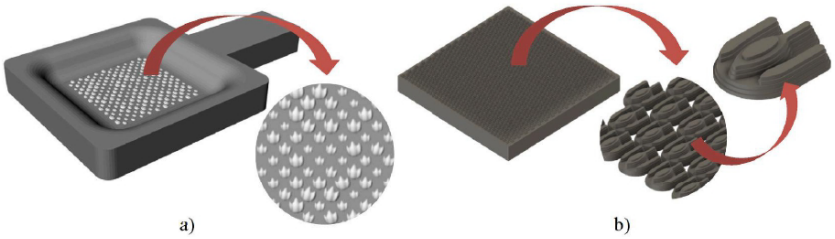


Fig. 10. Optimization of shark skin texture by parameterization. a) Form parameterization; b) Slicer of the scale (700 × 500 × 225mm).

reducing the size of the flakes. In subsequent projects, we plan to enhance this behavior by implementing a strategy to minimize the size of the microtextures.

Concurrently, we are developing a method to improve the electroforming process. This method will analyze the impact of various operative parameters on the uniformity of the thickness of the metallic deposition of copper. The objective is to produce electrodes capable of functioning under finishing conditions with more challenging EDM parameters.

5. Conclusions

This work demonstrates the great potential of the use of copper electrodes for spark erosion (SEDM), developed from a combined process of electroforming and mask steoreolithography additive manufacturing (MSLA) technology. It is an efficient and economical alternative for the production of tools for surface texturing. These electrodes enable the creation of micron-scale surface textures with complex geometries that are difficult or impossible to achieve using conventional processes. In addition, the manufacturing times of these tools can be reduced, making them an attractive option compared to alternative processes.

It has been possible to limit and quantify the dimensional deviations in the manufacturing process and to achieve a high reproducibility of the textures by electroforming. This allows these dimensional variations to be taken into account in the early stages of designing the geometric patterns of the electrodes. A higher level of detail is achieved in the functional texturing of surfaces that provide improved properties.

It has been found that the major source of dimensional error in the process is the MSLA fabrication phase of the model parts required for the electroforming process. The introduction of high-resolution equipment and more efficient post-processing systems has improved the ability to replicate geometric microstructures. In particular, the study has shown that the cleaning phase of the resin residues on the surface of the model parts is critical to achieve geometric details at the micrometer level.

CRediT authorship contribution statement

Mariana Hernández-Pérez: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Software, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Pedro M. Hernández-Castellano:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Formal analysis, Conceptualization. **Juan M. Vázquez-Martínez:** Writing – review & editing, Software, Resources, Investigation, Data curation. **María D. Marrero-Alemán:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Methodology, Conceptualization.

Data availability statement

Data included in article/supp. material/referenced in article.

Additional information

No additional information is available for this paper.

Funding statement

Work co-financed by the Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información de la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo y por el Fondo Social Europeo (FSE) Programa Operativo Integrado de Canarias 2014–2020, Eje 3 Tema Prioritario 74 (85 %).

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

[1] C.J. Evans, J.B. Bryan, Structured', 'textured' or 'engineered' surfaces, CIRP Annal. 48 (2) (Jan. 1999) 541–556, https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63233-8.

[2] O. Bilek, J. Ondrik, P. Janik, T. Kautsky, Microtexturing for enhanced machining: evaluating tool performance in Laser-processed cutting inserts, Manufact. Technol. 24 (2) (Apr. 2024) 173–182, https://doi.org/10.21062/mft.2024.038.

[3] D.S. Wiersma, The physics and applications of random lasers, Nat. Phys. 4 (5) (May 2008) 359–367, https://doi.org/10.1038/nphys971.

[4] A.A.G. Bruzzone, H.L. Costa, P.M. Lonardo, D.A. Lucca, Advances in engineered surfaces for functional performance, CIRP Annal. 57 (2) (Jan. 2008) 750–769, https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003.

[5] N. Moronuki, Tokyo Metropolitan University, Functional texture design and texturing processes, Int. J. Autom. Technol. 10 (1) (Jan. 2016) 4–15, https://doi.org/10.20965/ijat.2016.p0004.

[6] F.-T. Weng, Fabrication of microelectrodes for EDM machining by a combined etching process, J. Micromech. Microeng. 14 (Mar. 2004) N1, https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/5/N01.

[7] K.M.T. Ahmmed, C. Grambow, A.-M. Kietzig, Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining, vol. 5, 2014, https://doi.org/10.3390/mi5041219.

[8] A. Darulis, "The Complete Resin 3D Printing Settings Guide for Beginners," AmeraLabs. Accessed: January. 28, 2025. [Online]. Available: https://ameralabs.com/blog/the-complete-resin-3d-printing-settings-guide-for-beginners/.

[9] R. Leach, H. Haitjema, R. Su, A. Thompson, Metrological characteristics for the calibration of surface topography measuring instruments: a review, Meas. Sci. Technol. 32 (3) (Dec. 2020) 032001, https://doi.org/10.1088/1361-6501/abb54f.

[10] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R.K. Leach, J.S. Taylor, Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review, Precis. Eng. 46 (Oct. 2016) 34–47, https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001.

[11] Z. Xing, H. Zhou, W. Liu, J. Nie, Y. Chen, W. Li, Efficient cleaning of ceramic green bodies with complex architectures fabricated by stereolithography-based additive manufacturing via high viscoelastic paste, Addit. Manuf. 55 (Jul. 2022) 102809, https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102809.

[12] J.A. McGeough, M.C. Leu, K.P. Rajurkar, A.K.M. De Silva, Q. Liu, Electroforming process and application to micro/macro manufacturing, CIRP Annal. 50 (2) (Jan. 2001) 499–514, https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62990-4.

[13] H.G. Knol, C.J. Kruithof, C.J.M.V. Rijn, W. Nijdam, Electroforming method, electroforming mandrel and electroformed product. https://patents.google.com/patent/EP0894157A1/en, Feb. 03, 1999. (Accessed 6 October 2024).

[14] W.G. Herbet, T. Nozaki, A. Onishi, Electroforming apparatus and process. https://patents.google.com/patent/US4781799A/en, 1988. (Accessed 6 October 2024).

[15] P.W. Buckley, D.J. Coyle, M.J. Davis, R. Edwards, K.P. Zarnoch, Electroform, methods of making electroforms, and products made from electroforms. https://patents.google.com/patent/WO2007064804A1/en, Jun. 07, 2007. (Accessed 6 October 2024).

[16] D.G. DuPree, Electroforming an endless flexible seamless xerographic belt. https://patents.google.com/patent/US3954568A/en, May 04, 1976. (Accessed 6 October 2024).

[17] J.D.J. Reséndiz-Pérez, Enhancing Tribological Properties of Metallic Sliding Surfaces through Micro Multi-Texturing Techniques, University of Calgary, Canada, 2019. Doctoral Thesis, https://prism.ucalgary.ca/handle/1880/110625. (Accessed 8 October 2024).

[18] C.J. Sánchez Morales, Desarrollo de un equipo de Micro-Electroconformado. Estudio experimental de aplicación a la fabricación de herramientas para el texturizado de superficies estructuradas, Doctoral Thesis, ULPGC, Spain, https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/111011, 2021. (Accessed 5 September 2024).

[19] B. Alicona, "InfiniteFocus G6. Fast measurements for smooth surfaces & offline CAD planning.," Bruker Alicona. Accessed: June. 9, 2022. [Online]. Available: https://www.alicona.com/en/products/infinitefocus/.

[20] S.D. Mohanty, S.S. Mahapatra, R.C. Mohanty, J. Mohapatra, S.K. Khuntia, S. Nayak, Innovative methods of EDM electrode manufacturing: a review, Curr. Advan. Mech. Eng. (2021) 939–948, https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_87.

[21] N.H. Trieu, Electroplating of stereolithography printed part for sinker electrical discharge machining electrode fabricating. BachelorThesis, Vietnamese-German University, Germany, 2023 [Online]. Available: https://epub.vgu.edu.vn/handle/dlibvgu/1816. (Accessed 1 October 2024).

[22] X. Chen, Q. Cao, T. Chen, D. Wang, Y. Fan, W. Xing, 3D printing for precision construction of ceramic membranes: current status, challenges, and prospects, Advan. Membran. 3 (Jan. 2023) 100068, https://doi.org/10.1016/j.advmem.2023.100068.

materials

MDPI

Article

Improved Design of Electroforming Equipment for the Manufacture of Sinker Electrical Discharge Machining Electrodes with Microtextured Surfaces

Mariana Hernández-Pérez [1,*], Pedro M. Hernández-Castellano [1], Jorge Salguero-Gómez [2] and Carlos J. Sánchez-Morales [1]

[1] Integrated and Advanced Manufacturing Research Group, University of Las Palmas de Gran Canaria, Canary Island, 35001 Las Palmas, Spain; pedro.hernandez@ulgpc.es (P.M.H.-C.); carlos.sanchez@ulpgc.es (C.J.S.-M.)
[2] Materials and Manufacturing Engineering and Technology Research Group, University of Cádiz, 11519 Puerto Real, Spain; jorge.salguero@uca.es
* Correspondence: mariana.hernandez@ulpgc.es

Abstract: The development of microtextures has had a transformative impact on surface design in engineering, leading to substantial advancements in the performance, efficiency, and functionality of components and tools. This study presents an innovative methodology for fabricating SEDM electrodes. The methodology combines additive manufacturing by mask stereolithography with an optimized electroforming process to obtain high-precision copper shells. A key aspect of the study involved redesigning the electroforming equipment, enabling the independent examination of critical variables such as anode–cathode distance and electrolyte recirculation. This approach allowed precise analysis of their impact on metal deposition. This redesign enabled the assessment of the impact of electrolyte recirculation on the quality of the shells obtained. The findings indicate that continuous recirculation at 60% power effectively reduced thickness deviation by up to 32.5% compared to the worst-case scenario, achieving average thicknesses within the functional zone of approximately 110 µm. In contrast, the absence of flow or excessive turbulence did not generate defects such as unfilled zones or non-uniform thicknesses. The shells obtained were validated as functional tools in SEDM, demonstrating their viability for the generation of textures with high geometric fidelity. This approach optimizes the manufacturing of textured electrodes and opens new opportunities for their application in advanced industrial processes, providing a more efficient and sustainable alternative to conventional methods.

Keywords: micro-electroforming; microtexturing surfaces; SEDM; stereolithography by mask (MSLA)

check for updates

Academic Editor: Reza Teimouri

Received: 21 March 2025
Revised: 14 April 2025
Accepted: 22 April 2025
Published: 26 April 2025

Citation: Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Salguero-Gómez, J.; Sánchez-Morales, C.J. Improved Design of Electroforming Equipment for the Manufacture of Sinker Electrical Discharge Machining Electrodes with Microtextured Surfaces. *Materials* **2025**, *18*, 1972. https://doi.org/10.3390/ma18091972

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The optimization of surfaces through functional texturing has become a priority objective in engineering due to its direct impact on the efficiency, lifetime, and performance of industrial components. These improvements are essential in sectors such as the aerospace and automotive industries, where the efficiency and durability of parts directly influence performance and operating costs [1].

The design of textured surfaces has been significantly influenced by natural phenomena, such as the superhydrophobicity observed in lotus leaves or the adhesion mechanisms of certain reptiles. These natural microtextures have been studied to optimize various surface properties [2,3]. These biomimetic strategies have been implemented in the development of geometric patterns that allow, for example, the formation of lubricating

microdeposits and the reduction in stress concentrations in the contact zone, thus minimizing wear and improving the operating performance of the systems [4].

Studies have shown that modifying surface topography by texturing techniques can significantly reduce friction and improve wear resistance by promoting homogeneous load distribution and thermal dissipation [5]. Depending on the material and the desired effect, there are several methods for surface texturing, such as subtractive and additive methods. However, the fabrication of these textures faces technical, economic, and environmental challenges that demand innovative solutions.

Among the subtractive processes, traditional techniques such as milling, laser engraving, and EDM stand out because they allow the generation of precise patterns in a wide range of materials [6,7]. However, they have significant limitations. Mechanical milling, for instance, leads to high operating costs due to tool wear and the time required for complex geometries [8]. Lasers, while offering versatility, require substantial energy and generate thermal waste that can compromise the integrity of the material, leading to increased surface roughness and potential performance issues [9]. Sinking EDM (SEDM) involves a significant consumption of graphite or tungsten electrodes, which are costly and challenging to recycle [10]. These processes often generate metallic waste and polluting emissions, which can compromise long-term sustainability [11]. In light of these challenges, there is a growing interest in developing more economical and sustainable processes that enable the precise fabrication of textured surfaces. In this regard, additive manufacturing has emerged as a promising technology. One such example is mask stereolithography (MSLA) technology, which allows the creation of models with high resolution and geometric complexity, facilitating the design of micro- and nanostructured surfaces [12]. Integrating these methods with electrochemical processes, such as electroforming, has opened new perspectives in the fabrication of electrodes and molds with functional texturing [13,14].

Electroforming is a method for producing free-form solid objects by means of electrolytic deposition on a cathode. This process forms a thin piece of material that replicates the geometry of the original substrate with high precision [15]. This metallic layer is then removed, resulting in the coating itself becoming the final product.

The use of copper in the fabrication of electrodes for electroforming processes offers significant advantages in terms of sustainability and performance compared to materials such as the aforementioned graphite used for SEDM. Copper's exceptional electrical and thermal conductivity facilitates more efficient energy transfer during the SEDM process. Additionally, its high density and mechanical strength contribute to reduced electrode wear, prolonging the lifespan of the electrodes and decreasing the frequency of replacements [16].

The SEDM technique and its microscale variant have proven to be key tools for the fabrication of complex geometries without direct mechanical contact, which reduces stress generation and consequent material deformation [17].

Additive manufacturing has demonstrated significant potential in the production of structures with complex geometries and high fidelity, which is essential for the fabrication of tools with special requirements, including SEDM electrodes [18]. However, scientific literature lacks information regarding the production of textured SEDM tools by MSLA and electroforming, particularly concerning critical parameters such as the anode–cathode distance and the impact of recirculation on the quality and homogeneity of the deposition. The absence of systematic studies that address the interaction between these factors in laboratory equipment specifically designed for this purpose represents a significant opportunity for advancing the technique. In this context, the present study details the redesign of laboratory equipment, which allowed the performance of several analyses, such as the effect of recirculation on obtaining copper shells suitable for application as tools in SEDM. The study also presents

preliminary findings from using one of these shells as a finishing tool; this has contributed to the identification of key parameters for optimizing this technique.

2. Materials and Methods

The present methodology is structured in several phases, as illustrated in Figure 1. These phases range from the generation of the initial texturing to the inspection of the eroded part, passing through intermediate phases, such as the electroforming process, which is the central stage of the study. The overall success of the procedure depends on the ability to produce a functional textured tool in both the preliminary and final phases.

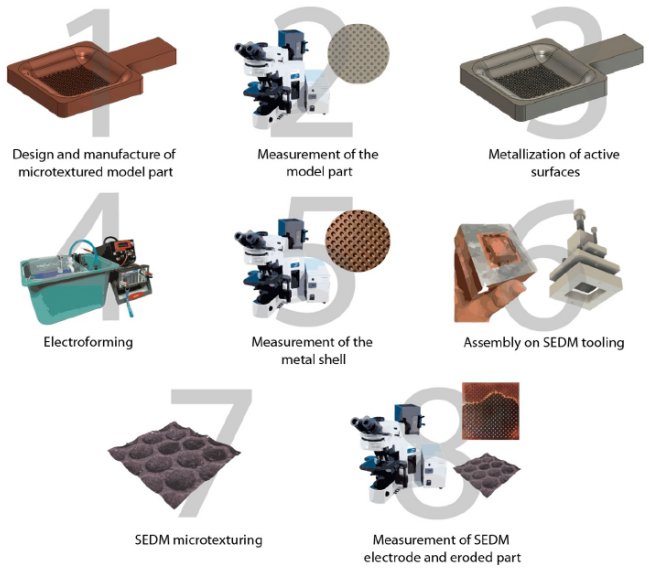


Figure 1. Flow required for the production of electroformed SEDM electrodes.

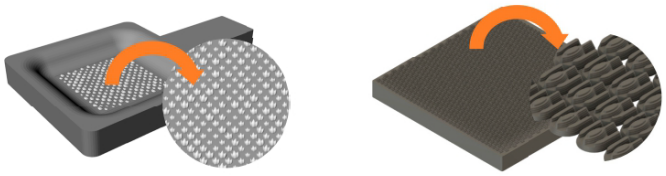
The strategy for obtaining the electrodes is based on methodologies used in previous studies (see Sánchez et al. [19]). The different phases of the process are described briefly below.

2.1. Design and Fabrication of Functional Models

The SEDM electrode fabrication process commences with the design of model parts incorporating textured surfaces, which are adjusted to the functional requirements and the capabilities of the processes involved. For this purpose, computer-aided design tools (Fusion360 v.2.0.19941) were used to allow the direct incorporation of micrometer-scale textures on the functional surface. This approach ensured precise reproduction of the desired patterns. As illustrated in Figure 2, various microtextures were designed and grouped into three main categories: aesthetic, geometric, and biomimetic patterns. During the course of the study, some of these textures were optimized through adjustments to critical parameters, such as maximum depth, repetition frequency, and pattern orientation, to improve the replicability and functionality of the final parts.

The model part is then fabricated using the stereolithography technique, which establishes the appropriate operating parameters for the equipment and the resin. The equipment used (Phrozen Mini 8K, Phrozen Technology Co. Ltd., Hsinchu, Taiwan) offered

a resolution of 22 microns per pixel and layer heights of up to 10 microns, enhancing the level of detail in the geometric patterns. Following this, a rigorous post-processing protocol was implemented, involving a centrifugal alcohol cleaning step, a 10 min ultrasonic cleaning step, a compressed air drying step, and finally a curing step in a dedicated station. The equipment utilized in this process is illustrated in Figure 3.



(**a**) (**b**)

Figure 2. Example of microtextures: (**a**) parameterized sharkskin texture; (**b**) optimization of sharkskin texture by reducing its size and increasing the matrix.



(**a**) (**b**) (**c**) (**d**)

Figure 3. Equipment used to manufacture the model part: (**a**) Phrozen Mini 8K; (**b**) Phrozen Washing Station; (**c**) Phrozen Ultra-Sonic Cleaner; (**d**) Phrozen Dry and Cure Kit.

2.2. *Sputtering*

After obtaining the resin model part, the functional surfaces were metallized to enable the flow of electric current that favors the metallic deposition during the electroforming process. This step was carried out using the sputtering process, which deposits an ultra-thin layer, of the order of a few nanometers, on the active areas without altering the geometry of the textures. The sputtering coating equipment SC7620 'Mini' from Quorum Technologies (Laughton, UK) was used for this purpose, applying a layer of gold–palladium alloy with a minimum thickness. To ensure homogeneous coverage, two depositions of 120 s each were carried out, using a current intensity of 18 mA, which ensured complete metallization of the textured surface (see Figure 4).



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 4. Sputtering: (**a**) SC7620 Mini Sputter Coater; (**b**) sputtering process; (**c**) metallized model part.

2.3. Electroforming

Once plating is complete, the model part is ready to be immersed in the electrolytic bath for the initiation of the electroforming process, which follows the steps illustrated in Figure 5.

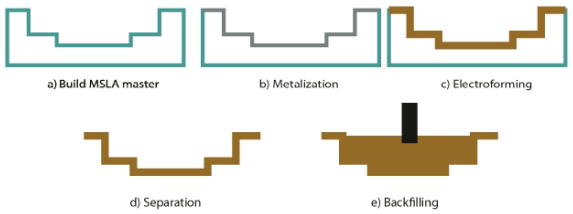


Figure 5. Electroforming process for SEDM tooling generation.

Based on prior research, a proprietary equipment design was developed and constructed, as illustrated in Figure 6. The system's fundamental components include a power supply, a specific support for the model parts, a mechanism for stirring the electrolytic bath, an automated device for controlling the stirring (DCAB), and a monitoring system that continuously records the intensity and voltage parameters.

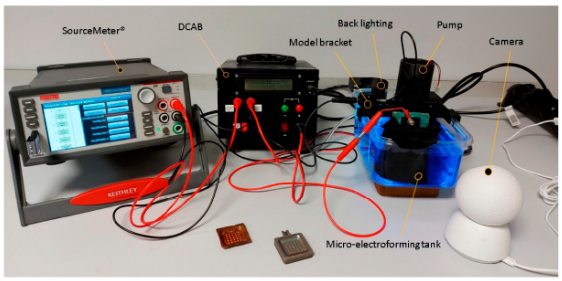


Figure 6. Initial electroforming equipment. Image obtained from [19].

The operation of the process is initiated by executing a sequential program that establishes various deposition stages. During the process, the power supply monitors the electrical parameters. At the end of the total programmed time, the process is interrupted and the model part, now coated with a copper shell, is removed.

However, during the experimental development, critical variables were identified that merit individualized study. These include the effect of electrolyte recirculation and the distance between the anode and the cathode. These parameters directly affect the thickness and uniformity of the copper deposit. To address these issues, the starting equipment was redesigned. This redesign involved implementing a two-compartment electrolyte division and incorporating a particle filter. This allows regular and scheduled bath renewals and bath renovation to avoid stratification effects (see Figure 7).

The smaller upper tank, equipped with a nozzle for evacuation, holds one liter. The electrolyte is continuously recirculated by a pump to the filter. Once purified, the bath returns to the upper tank through the orifices integrated in the agitation system. This configuration allows the electrolyte quality to be maintained for extended periods of time, favoring more uniform deposition. Regarding operating parameters, the pump commences operation at 50% power and continues up to 100%. For the different studies, three power

levels were used: moderate (60% with a flow of 12.6 L/h), medium (70% with a flow of 13.6 L/h), and high (90% with a flow of 15.0 L/h).



Figure 7. Redesigned electroforming equipment.

The redesign was extended to the agitation system and the cathode clamping device, which were developed using MSLA technology. Figure 7 illustrates not only the new equipment but also the location and design of these components in the new equipment configuration. In addition, a specialized support has been engineered to facilitate the attachment of both the cathode and the agitation mechanism in a versatile manner, which is essential for the planned tests (see Figure 8).

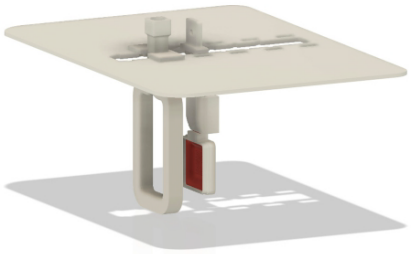


Figure 8. Support for cathode placement and bath agitation element.

Conversely, an intelligent switch was incorporated into the DCAB, thereby optimizing the automation of the process. This programmable device allows users to define schedules for activating and deactivating the pump switch, enabling tests to be conducted without operator supervision. Therefore, two recirculation regimes were studied: continuous, with the pump running continuously, and intermittent, where a cycle of 10 min of active flow followed by 5 min of rest was used. While these parameters are adapted to the experimental system and the electrolyte used, the approach is adaptable to other systems by means of proportional adjustment of the volume, viscosity of the electrolyte, and tank geometry.

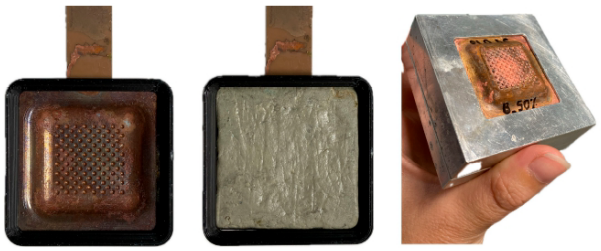
The new system incorporates a planning of electroforming stages, in which a constant amperage is established and progressively increased during the process, culminating in a final intensity of 1 A (see Table 1). The initial stage is extended to ensure the formation of a homogeneous base layer, which serves as a foundation for subsequent deposits, thus guaranteeing complete coverage, especially in areas with low-relief textures that present greater challenges in filling the coating.

Table 1. Deposition program used.

Stages	Intensity	Time
1	100 mA	1 h
2	250 mA	30 min
3	500 mA	1 h
4	750 mA	1 h
5	1 A	1 h

2.4. Use of the Shells as Texturized Tools for SEDM

Once the shells have been obtained with the appropriate thickness for conversion into tools, they are conditioned according to a specific protocol that guarantees their structural integrity and functionality. Prior to separation of the shell from the model part, the back of the shell is reinforced by applying an epoxy putty. This reinforcement is crucial to prevent deformation during separation and to facilitate subsequent assembly in the tool holder designed for EDM. Figure 9 illustrates each stage of the process in detail.



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 9. Copper shell reinforcement: (**a**) removal of the copper-plated model part; (**b**) filling with epoxy putty; (**c**) insertion of the shell into the tool holder.

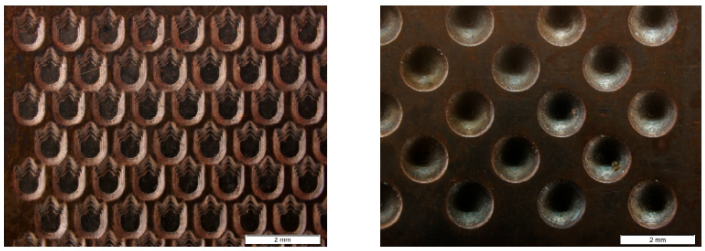
2.5. Validation Method

To validate the electroformed shells, a geometrical analysis of the textures, mass, and thickness distribution was performed.

Mass determination was carried out using an analytical balance (Mettler-Toledo AB204-S, Mettler-Toledo LLC, Columbus, OH, USA), which provided accurate and reliable measurements.

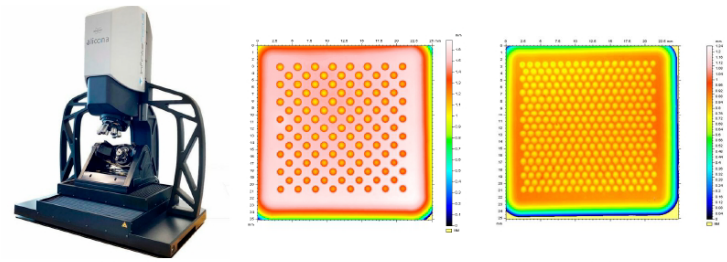
To evaluate the fidelity in the replication of textural details, a microscopic inspection of the shells was performed. Initially, an electronic measuring microscope (Olympus BX51, Olympus Corporation, Tokyo, Japan) with a magnification of 20× was used, which made it possible to obtain a preliminary view of the main textured surfaces to be studied (see Figure 10).

Subsequently, an exhaustive analysis was carried out using the high-precision Alicona InfiniteFocusG5+ variable-focus 3D optical microscope (Berlin, Germany), an instrument capable of measuring geometric features at micrometer and submicrometer scales. It has a vertical resolution of up to 10 nm and a capacity to measure roughness as small as 0.03 µm [20]. This equipment enabled the acquisition of point clouds, which, when analyzed with the MountainsMap v7.4 software (Digital Surf, France), facilitated the quantification of the microtopography of textured surfaces, as illustrated in Figure 11.



(**a**) (**b**)

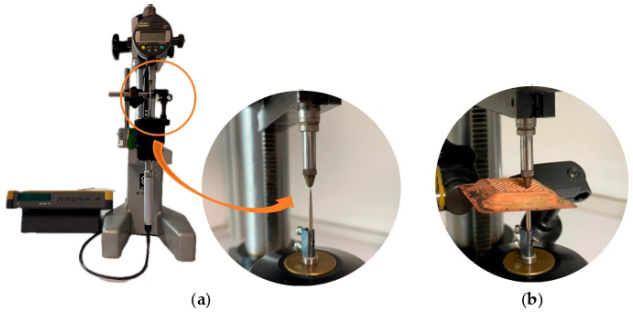
Figure 10. Visual inspection of shells with different microtexture designs: (**a**) texture on shark skin relief; (**b**) texture on hemisphere relief.



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 11. Visual inspection of shells by microscopy through MountainsMap: (**a**) Alicona InfiniteFocusG5+ equipment; (**b**) texture under relief; (**c**) texture over relief.

To determine the thickness of the shells, measurements were taken at multiple points using a mechanical comparator (Mitutoyo ID-C112B, Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Kanagawa Prefecture, Japan) mounted on a calibrated test bench. This equipment, accompanied by a calibration certificate Nº 862, issued by the Metrology and Calibration Service of the University of Las Palmas de Gran Canaria, ensured the accuracy of the measurements. Figure 12 shows the entire measuring system in service conditions.



(**a**) (**b**)

Figure 12. Thickness measurement of copper shells: (**a**) enlargement of the stylus used for measurement; (**b**) example of shell measurement.

3. Results

The implementation of the new electroforming equipment enables more precise control of the variables involved in the process, allowing specific studies to focus on parameters of interest and discard those that are not relevant.

The double tank design exhibited enhanced stability during tests, as the dividing lid between the two containers acted as a barrier, protecting the electrolyte medium from the environment. This effect was reinforced by the built-in filter, which prevented the accumulation of particles and, consequently, avoided possible distortions in the experimental results. The results of a study on the effect of the intensity of recirculation on the quality of the copper shells obtained are presented below.

3.1. Analysis of the Impact of Pump Power on Recirculation

In complementary studies, the influence of the distance between the anode and the cathode was studied with the aim of determining the distance that optimizes the obtaining of coatings with greater thickness and homogeneous distribution. The results showed that, for this particular type of equipment, a distance of about 60 mm was the most favorable, since a significant increase in the mass of the coating was observed (see Figure 13).

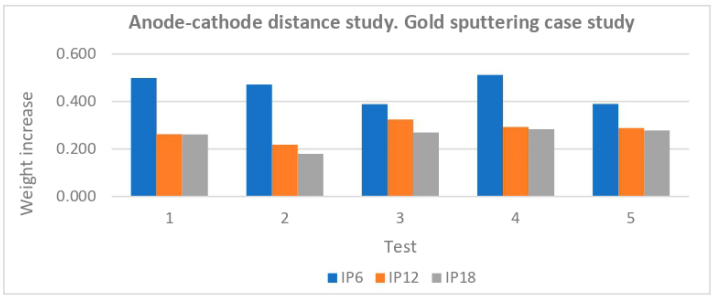


Figure 13. Anode–cathode distance study, where IP refers to the weight increase for the different distances of 60, 120, and 180 mm.

With the optimum distance between the anode and cathode set at 60 mm, the impact of electrolytic bath recirculation on the thickness distribution in the obtained shells was analyzed. To this end, a range of power levels (60%, 75%, and 90%) were evaluated under both continuous and intermittent modes. Additionally, a control group without recirculation was included for reference, as outlined in Table 2.

Table 2. Experiment design to analyze the influence of bath agitation.

Experiment	Repetition	Pump Power	Recirculation Type
1	3	60%	Continuous
2	3	75%	Continuous
3	3	90%	Continuous
4	3	60%	Intermittent
5	3	75%	Intermittent
6	3	90%	Intermittent
7	3	0%	Null

Each experiment was performed three times, resulting in 21 trials. The model part used was the incoming hemisphere texture, as shown in Figure 4c. The resulting copper shells were very homogeneous, as they all averaged 3.2 g in mass. However, although the mass appeared

to be the same, there were significant differences in the uniformity of the thickness of the different shells. Systematic measurements were made at 64 points per shell (eight columns by eight rows), and the results were organized into heat maps (see Figure 14).



Figure 14. Distribution of points for taking measurements of electroformed shells.

Figures 15–18 illustrate the results of seven of the tests performed in one of the experimental groups, with color increasing with increasing shell thickness.

Continuous pump recirculation 60%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	286	275	258	225	226	228	238	226
F2	201	261	178	192	198	197	210	212
F3	201	241	127	124	173	139	171	209
F4	211	165	113	153	104	128	188	212
F5	215	198	94	128	107	121	176	217
F6	219	203	101	100	98	88	183	272
F7	246	218	185	173	210	191	244	272
F8	275	267	274	261	244	269	276	324

Intermittent recirculation of pump 60%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	281	297	326	276	281	284	316	314
F2	251	224	240	234	250	233	217	239
F3	282	199	103	77	86	149	222	245
F4	290	208	101	91	92	91	231	260
F5	276	196	94	80	89	83	243	291
F6	303	199	98	88	90	87	202	363
F7	351	272	238	223	234	210	243	363
F8	404	355	370	276	329	389	409	397

Figure 15. Thickness distribution for continuous and intermittent recirculation at 60% power.

Continuous pump recirculation 75%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	333	276	260	272	284	277	361	303
F2	299	223	194	207	207	190	212	238
F3	234	211	118	130	148	113	165	229
F4	214	205	109	117	140	141	178	231
F5	227	188	105	118	102	95	194	252
F6	250	206	95	89	82	96	234	306
F7	275	235	206	203	227	215	230	306
F8	316	300	303	304	319	332	292	372

Intermittent recirculation of pump 75%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	369	295	336	248	320	373	378	375
F2	336	242	229	249	252	254	240	373
F3	315	201	71	62	80	70	190	363
F4	343	237	73	68	76	74	160	360
F5	317	261	82	79	78	84	185	383
F6	345	239	69	61	69	71	192	352
F7	381	287	228	246	249	248	256	352
F8	365	346	327	323	322	371	399	392

Figure 16. Thickness distribution for continuous and intermittent recirculation at 75% power.

Continuous pump recirculation 90%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	337	291	291	251	266	275	272	284
F2	315	253	255	261	255	202	226	246
F3	291	240	77	117	101	89	227	192
F4	273	249	72	114	77	79	222	199
F5	251	172	97	90	109	82	235	226
F6	288	175	71	72	75	63	206	256
F7	314	211	183	207	222	212	232	256
F8	391	339	345	364	373	376	380	409

Intermittent recirculation of pump 90%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	319	327	295	218	219	290	303	310
F2	321	247	237	227	217	118	219	327
F3	277	207	133	176	175	149	206	335
F4	267	195	168	161	164	202	213	321
F5	299	212	68	124	122	113	242	329
F6	352	220	65	56	56	146	255	36
F7	377	238	210	224	234	232	282	396
F8	475	428	447	403	409	401	418	429

Figure 17. Thickness distribution for continuous and intermittent recirculation at 90% power.

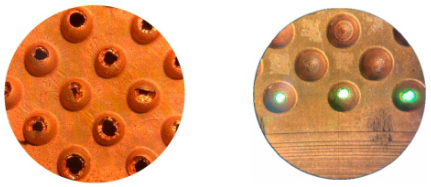
The data demonstrate that, under 60% power and continuous recirculation, optimal distribution is achieved in terms of uniformity and functionality. In contrast, the intermittent mode at the same power resulted in more pronounced spatial heterogeneity, particularly with the appearance of the edge effect.

Without recirculation								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	324	260	278	236	243	233	250	304
F2	320	259	259	221	221	252	262	287
F3	274	256	171	112	138	138	220	265
F4	289	254	205	234	234	168	225	247
F5	273	243	246	162	216	273	218	256
F6	338	302	214	228	248	130	231	291
F7	391	302	251	270	282	260	274	310
F8	458	400	405	396	382	399	378	440

Figure 18. Thickness distribution for test without recirculation.

As the power was increased to 75%, a general trend of increasing thickness was observed, although accompanied by greater variability, particularly under the intermittent regime, where peripheral regions gained thickness at the expense of a significant loss in the center of the shell. This pattern was particularly pronounced at 90% power, with central zones exhibiting thicknesses below 70 µm at certain points. These conditions were associated with a partial loss of refilling in low-relief areas; so, this power regime was considered the upper operational limit of our equipment.

In the test conducted without recirculation, although a higher average thickness was achieved, the distribution was irregular, and multiple defects were observed in the center of the part, which is consistent with incomplete filling. Examples of these deficiencies are shown in Figure 19.



(**a**) (**b**)

Figure 19. Copper shell defects: (**a**) incomplete filling of a large number of cavities; (**b**) incomplete filling of the lower part of the functional zone of the electrode.

As Figure 20 illustrates, the average thickness deviation for each test indicates that the continuous recirculation regime at 60% power exhibited optimal performance.

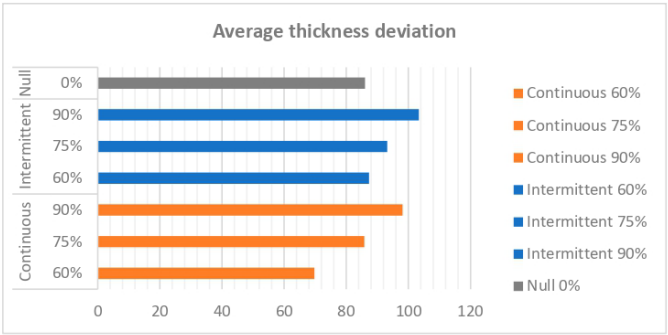
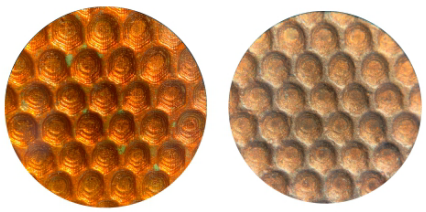


Figure 20. Average shell thickness deviation.

3.2. Electrode Wear Study

On the basis of the tests carried out, another concrete with a shark's skin texture was produced on a relief, using continuous recirculation at minimum power, and the dimensional variations of the shell were studied after the application of the EDM process, with the aim of quantifying the wear induced.

From this initial test, it could be observed that the variations suffered in the microtexture dimensions were of the order of a few microns, since the EDM process was carried out in finishing conditions, using very low VDI values to minimize tool deterioration (see Figure 21).



(**a**) (**b**)

Figure 21. Sharkskin texture on relief: (**a**) electroformed shell; (**b**) eroded shell.

Only the first stage of erosion was analyzed, a stage in which the surface irregularities remaining from the manufacture of these tools tend to diminish. This phenomenon is explained by the initial concentration of electrical discharges on the protrusions, which induces the rounding of the sharp edges. Once the electrode surface is smoothed, the current distribution becomes more uniform in subsequent operations, progressively reducing wear.

4. Discussion

The results obtained in this study are consistent with previous research that has investigated the influence of electrode spacing on electroforming processes. For example, Permadi et al. found that a spacing of 50 mm is optimal to obtain coatings with high adhesion and uniformity [21]. Similarly, Ortega's work points out that the combination of electrode spacing and orientation directly influences the homogeneity of the deposit, with an improvement in uniformity in the central region when the separation between the anode and cathode is reduced [22]. In addition, Yang et al. [23] showed that adjusting the distance between these electrodes, as well as their surface areas, can significantly improve the uniformity of the deposit thickness. This adjustment is particularly important in applications where high geometric accuracy is required over large areas. These results highlight the importance of finding a balance between process efficiency and coating quality by adapting the experimental setup to the material properties and system conditions [24]. In addition, the shortest distance of the developed equipment gave the best results; this result is in agreement with the conclusions of the aforementioned authors.

In addition, the influence of the electrolyte flow on the electroforming process has been documented in the literature. Sun and Wang, through theoretical models, demonstrated that the flow field modifies the ionic concentration distribution and the morphology of the deposit, an aspect that is particularly relevant for microstructures with different aspect ratios [25]. Likewise, McGeough and Rasmussen [26] analyzed the optimal conditions for obtaining uniform thickness coatings on complex surfaces, highlighting the importance of continuous electrolyte recirculation to preserve the chemical composition and reduce defects during deposition. This is in agreement with the results obtained in the tests,

where the coatings obtained with continuous recirculation and low power showed a lower standard deviation and therefore a higher thickness homogeneity.

On the other hand, computational studies carried out by Chalupa et al. suggest that a precise control of the geometry of the recirculation nozzles and the optimization of the exit angles favor the achievement of a laminar flow, which contributes to improving the homogeneity of the coating and minimizing irregularities in the deposition process [27]. This is in agreement with the redesigns carried out in the electroforming equipment, since a high intensity of recirculation generates a turbulent flow that is unfavorable for metal deposition.

Finally, according to the conclusions of Yarlagadda et al., the copper electrodes obtained by electroforming have suitable characteristics for their application in EDM processes. However, their use in roughing operations is not recommended due to the limitations inherent in their morphology and mechanical properties [10].

5. Conclusions

This study demonstrates that the integration of low-cost additive manufacturing techniques with copper electroforming processes enables the efficient and economical production of microtextured electrodes for SEDM. These tools are fully functional and capable of producing micron-level surface textures in complex geometries that would be difficult to achieve with traditional machining technologies. In addition, the combination of these technologies allows production times to be reduced compared to conventional methods.

By modifying the experimental equipment, it was possible to isolate and control several critical process variables. Tests carried out with different electrolyte recirculation strategies have shown that controlled flow is essential to achieve homogeneity in the thickness of the deposited layer. In particular, it was found that intermittent recirculation with moderate pumping power (60%) improves material distribution and avoids defects such as edge stratification and the formation of zones of lower deposition. Conversely, excessive recirculation (90%) in both recirculation regimes has been observed to generate turbulence, thereby compromising the uniformity of the deposit. This underscores the critical importance of the meticulous regulation of this parameter to ensure process stability.

A preliminary analysis of the initial wear of the electrodes after a spark erosion test showed the need for more detailed studies, including a larger number of tests to evaluate the wear progression in successive spark erosion processes under different operating conditions. This will make it possible to determine the service life of this type of electrode according to the required accuracy of the textures, as well as the required minimum thickness of the electroformed case according to the specific application and the expected service life of the electrodes.

Author Contributions: M.H.-P.: conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, data curation, writing—original draft, funding acquisition; P.M.H.-C.: conceptualization, validation, resources, writing—review and editing, supervision, project administration; J.S.-G.: software, resources, visualization; C.J.S.-M.: visualization, writing—review and editing, supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Work co-financed by the Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información de la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo y por el Fondo Social Europeo (FSE) Programa Operativo Integrado de Canarias 2014–2020, Eje 3 Tema Prioritario 74 (85%). This research was funded by the Spanish Government (MINECO/AEI/FEDER, UE), grant number [DPI2017-84935-R].

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: The authors are grateful to the Metrology and Calibration Service of the University of Las Palmas de Gran Canaria (SMC) for the availability of its laboratories and equipment for this research. Special mention is due to Jose Ignacio Rodríguez Jorge, because his contribution to the electronic development of DCAB and his experience with measurement systems have been essential to the progress of this work. We thank the Engineering and Technology of Materials and Manufacturing of the University of Cádiz (UCA) group for their technical support in the SEDM experiments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

MSLA	Masked Stereolithography
SEDM	Sink Electro-Discharge Machining
DCAB	Bath agitation control device

References

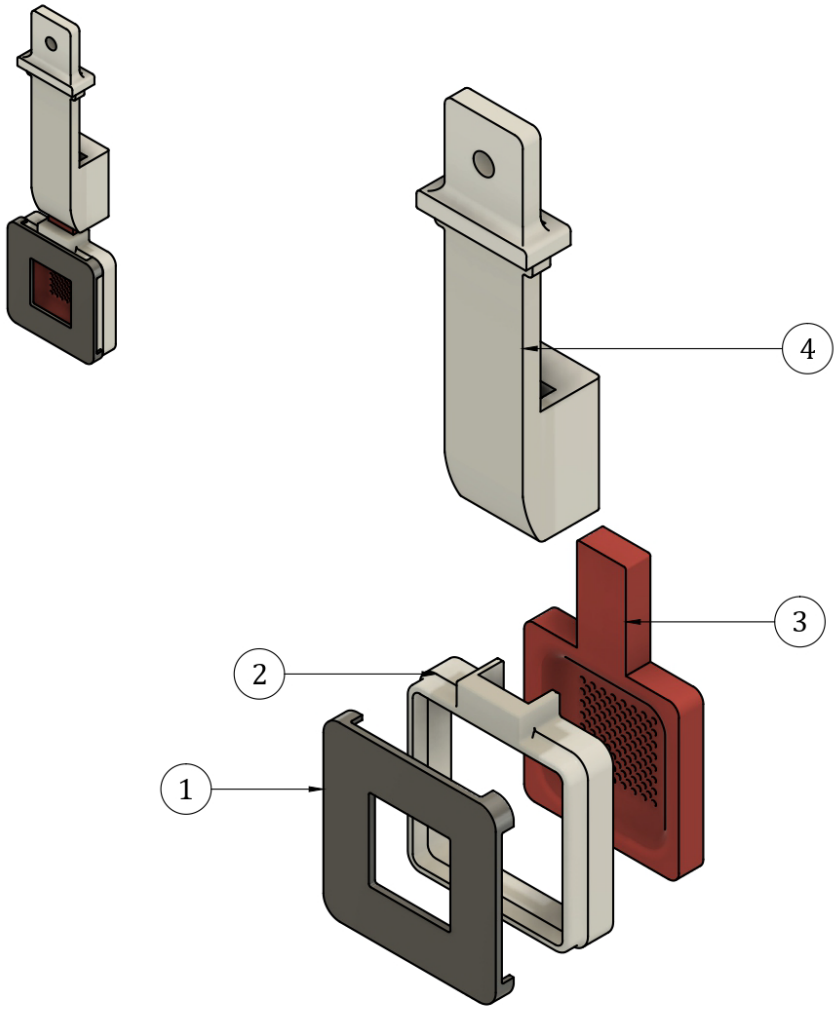
1. Szada-Borzyszkowska, M.; Kacalak, W.; Szada-Borzyszkowski, W.; Borkowski, P.J.; Laskowska, D.; Szafraniec, F. Topography of Textured Surfaces Using an Abrasive-Water Jet Technology. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **2024**, *24*, 226. [CrossRef]
2. Cheng, Z.; Du, M.; Lai, H.; Zhang, N.; Sun, K. From Petal Effect to Lotus Effect: A Facile Solution Immersion Process for the Fabrication of Super-Hydrophobic Surfaces with Controlled Adhesion. *Nanoscale* **2013**, *5*, 2776–2783. [CrossRef] [PubMed]
3. Nosonovsky, M.; Bhushan, B. Multiscale Friction Mechanisms and Hierarchical Surfaces in Nano- and Bio-Tribology. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **2007**, *58*, 162–193. [CrossRef]
4. Gachot, C.; Rosenkranz, A.; Hsu, S.M.; Costa, H.L. A Critical Assessment of Surface Texturing for Friction and Wear Improvement. *Wear* **2017**, *372–373*, 21–41. [CrossRef]
5. Nasir, F.F.M.; Ghani, J.A.; Zamri, W.F.H.W.; Kasim, M.S. State-of-the-Art Surface Texturing and Methods for Tribological Performance. *World Rev. Sci. Technol. Sustain. Dev.* **2019**, *15*, 330. [CrossRef]
6. Jithin, S.; Shetye, S.S.; Rodrigues, J.J.; Mhetre, K.S.; Mastud, S.A.; Joshi, S.S. Analysis of Electrical Discharge Texturing Using Different Electrode Materials. *Adv. Mater. Process. Technol.* **2018**, *4*, 466–479. [CrossRef]
7. Ali, M.; Banu, A. Electrical Discharge Machining (EDM): A Review. *Int. J. Eng. Mater. Manuf.* **2016**, *1*, 3–10. [CrossRef]
8. García-Martínez, E.; Miguel, V.; Mancebo, Á.; Martínez-Martínez, A. Determination of Cost-Effective Machining Strategies for Rough Pocket Milling of Aluminum by Computer-Aided Manufacturing. *Adv. Sci. Technol.* **2023**, *132*, 176–183. [CrossRef]
9. Hazzan, K.E.; Pacella, M.; See, T.L. Laser Processing of Hard and Ultra-Hard Materials for Micro-Machining and Surface Engineering Applications. *Micromachines* **2021**, *12*, 895. [CrossRef]
10. Yarlagadda, P.K.D.V.; Christodoulou, P.; Subramanian, V.S. Feasibility Studies on the Production of Electro-Discharge Machining Electrodes with Rapid Prototyping and the Electroforming Process. *J. Mater. Process. Technol.* **1999**, *89–90*, 231–237. [CrossRef]
11. Álvarez, J. Estado del arte de las aplicaciones de texturizado y últimas tecnologías. *Interempresas*. 21 November 2016. Available online: https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/165091-Estado-del-arte-de-las-aplicaciones-de-texturizado-y-ultimas-tecnologias.html (accessed on 11 March 2025).
12. Pérez, M.; Carou, D.; Rubio, E.M.; Teti, R. Current Advances in Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* **2020**, *88*, 439–444. [CrossRef]
13. Hernández-Castellano, P.M.; Benítez-Vega, A.N.; Díaz-Padilla, N.; Ortega-García, F.; Socorro-Perdomo, P.; Marrero-Alemán, M.D.; Salguero, J. Design and Manufacture of Structured Surfaces by Electroforming. *Procedia Manuf.* **2017**, *13*, 402–409. [CrossRef]
14. Hernández-Pérez, M.; Hernández-Castellano, P.M.; Sánchez-Morales, C.J.; Marrero-Alemán, M.D.; Martinez, J.M.V. Metrological Assessment of Microtextured EDM Electrodes Generated by Additive Manufacturing and Electroforming. *Key Eng. Mater.* **2023**, *960*, 47–56. [CrossRef]
15. Muhye, A. Galvanoplastia: Procesos, Aplicaciones y Ejemplos. *Lifeder*. Available online: https://www.lifeder.com/galvanoplastia/ (accessed on 10 January 2021).
16. Akgün, M. Performance Analysis of Electrode Materials in Electro Discharge Machining of Monel K-500. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* **2022**, *10*, 035026. [CrossRef]
17. Li, Z.; Bai, J.; Tang, J. Micro-EDM Method to Fabricate Three-Dimensional Surface Textures Used as SERS-Active Substrate. *Appl. Surf. Sci.* **2018**, *458*, 810–818. [CrossRef]

18. Hsu, C.Y.; Chen, D.Y.; Lai, M.Y.; Tzou, G.J. EDM Electrode Manufacturing Using RP Combining Electroless Plating with Electroforming. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2008**, *38*, 915–924. [CrossRef]
19. Sánchez, C.J.; Hernández, P.M.; Martínez, M.D.; Marrero, M.D.; Salguero, J. Combined Manufacturing Process of Copper Electrodes for Micro Texturing Applications (AMSME). *Materials* **2021**, *14*, 2497. [CrossRef]
20. Alicona, B. InfiniteFocus G6. Fast Measurements for Smooth Surfaces & Offline CAD Planning. Available online: https://www.alicona.com/en/products/infinitefocus/ (accessed on 9 June 2022).
21. Permadi, B.; Asroni, A.; Budiyanto, E. Proses elektroplating nikel dengan variasi jarak anoda katoda dan tegangan listrik pada baja ST-41. *Turbo J. Program Studi Tek. Mesin* **2020**, *8*, 226–230. [CrossRef]
22. García, O. Efecto de diferentes parámetros sobre la calidad de las electroformas de níquel Desarrollo y validación de dispositivo para mejorar la uniformidad de espesor. Doctoral Dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2014.
23. Yang, G.; Deng, D.; Zhang, Y.; Zhu, Q.; Cai, J. Numerical Optimization of Electrodeposition Thickness Uniformity with Respect to the Layout of Anode and Cathode. *Electrocatalysis* **2021**, *12*, 478–488. [CrossRef]
24. Aisyah, I.S.; Susilo, R.R.; Murjito, M. The Effect of Distance Variation on Electroplating Process of Decorative Nickel-Chrome on the Microstructure, Thickness and Weight of Plating on A36 Steel. *AIP Conf. Proc.* **2022**, *2453*, 020013. [CrossRef]
25. Sun, H.; Wang, X. Numerical Simulation of Nickel Electroforming Process Influenced by Flow Field. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xi'an, China, 7–11 April 2015; pp. 502–506.
26. McGeough, J.A.; Rasmussen, H. Analysis of Electroforming with Direct Current. *J. Mech. Eng. Sci.* **1977**, *19*, 163–166. [CrossRef]
27. Chalupa, A.; Warner, J.; Martin, J. Computational Study of Chemical Uniformity Impacts on Electrodeposition. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **2024**, *37*, 238–243. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ANEXO II

Planos

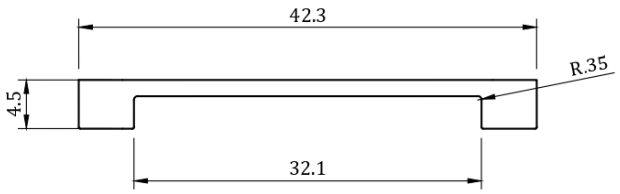


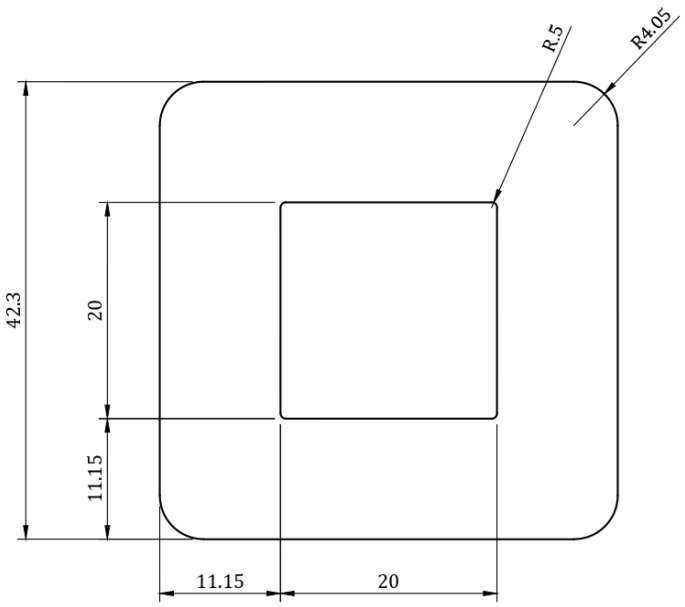
ID	Descripción	Cantidad	Material	Plano nº
4	Sujeción pieza modelo	1	Resina	6
3	Pieza modelo	1	Resina	4-5
2	Protector cátodo	1	Resina	3
1	Pantalla protectora	1	Resina	2

Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación

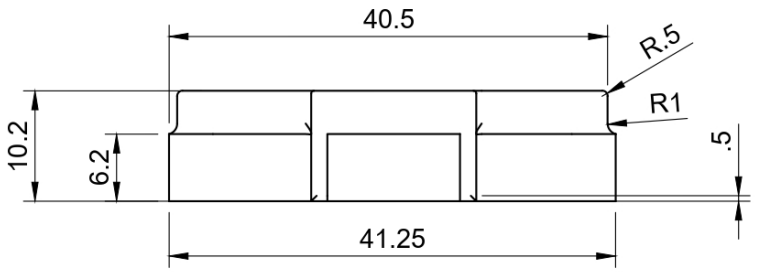
CONJUNTO DEL CÁTODO

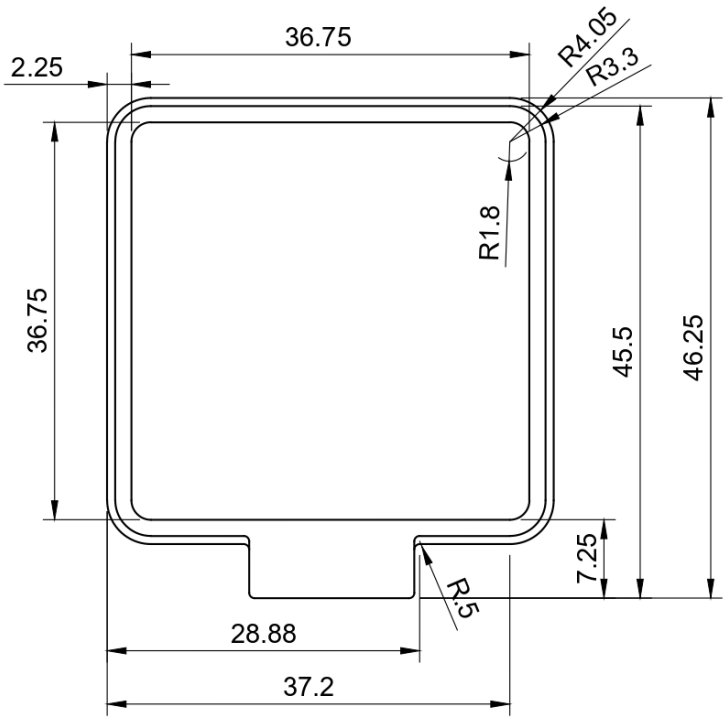
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Conjunto		Plano nº: 1	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:21:10 +01'00'



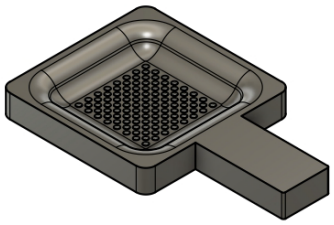


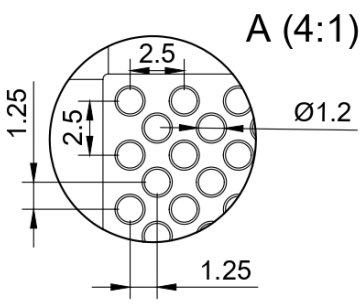
Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación — Componentes empleados en el cátodo			
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Pantalla protectora	Tolerancias generales	Plano nº: 2	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:21:28 +01'00'

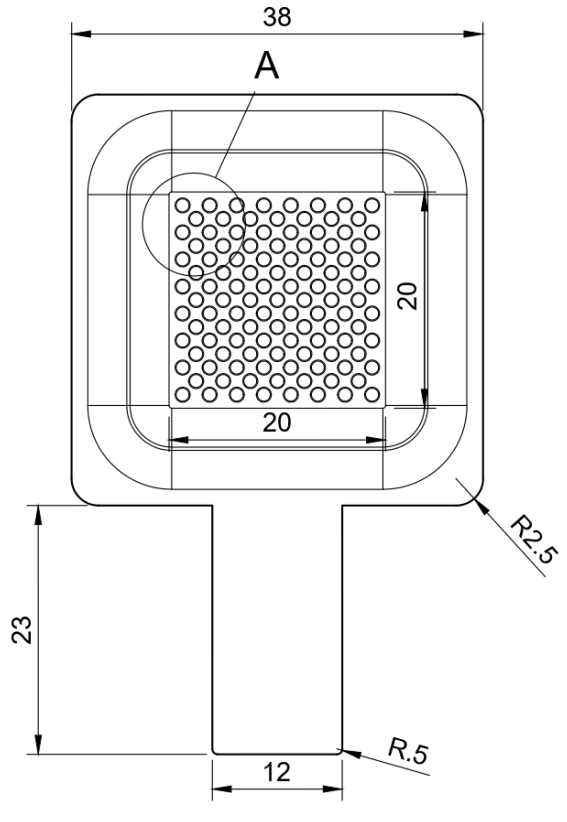


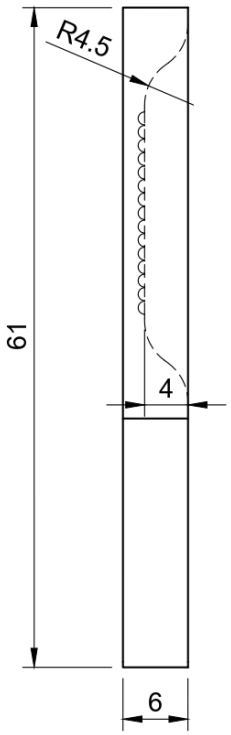


Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación — Componentes empleados en el cátodo			
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Protector cátodo	Tolerancias generales	Plano nº: 3	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H — Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:21:42 +01'00'

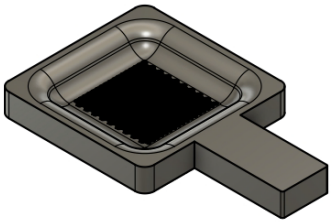


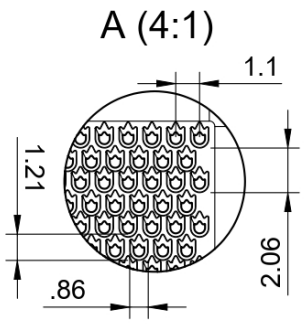


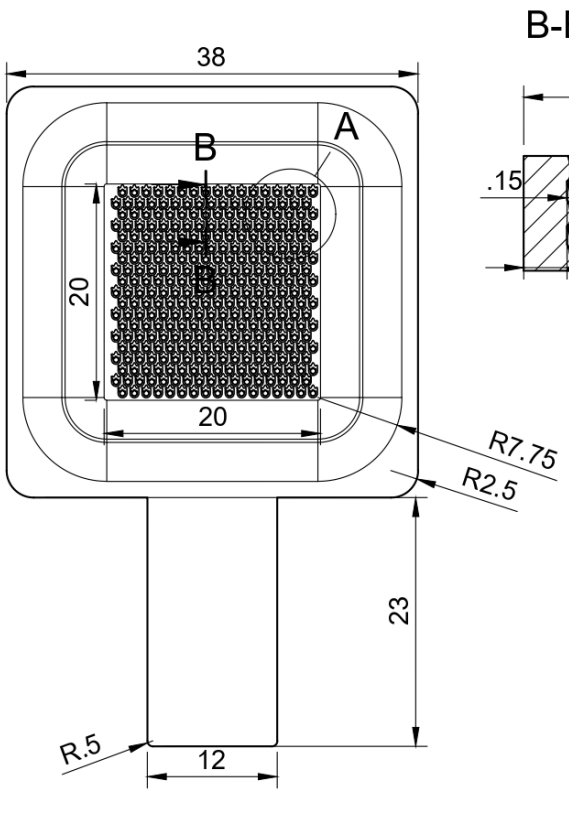




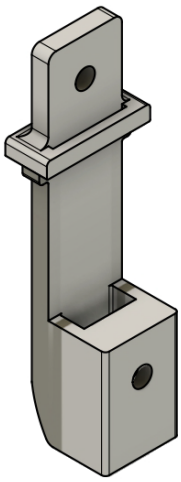
Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación	Componentes empleados en el cátodo		
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Pieza modelo con textura de semiesferas entrantes	Tolerancias generales	Plano nº: 4	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:21:59 +01'00'

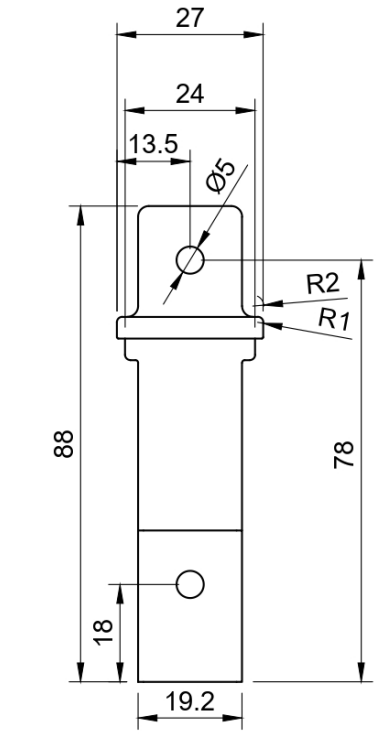


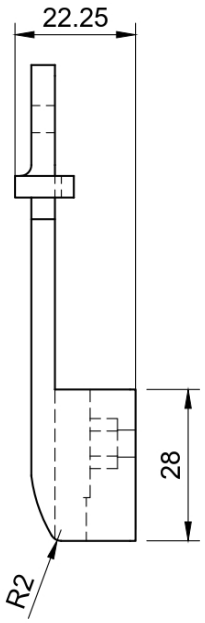


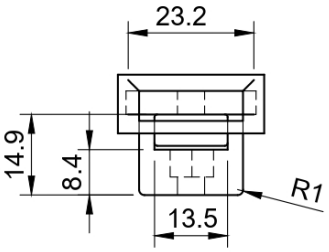


Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación — Componentes empleados en el cátodo			
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Pieza modelo con textura de piel de tiburón	Tolerancias generales	Plano nº: 5	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H — Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:22:12 +01'00'

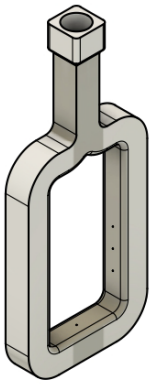


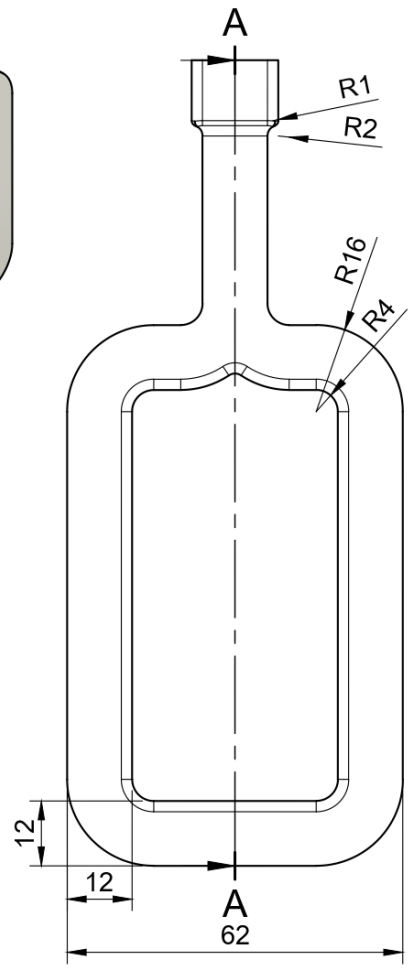


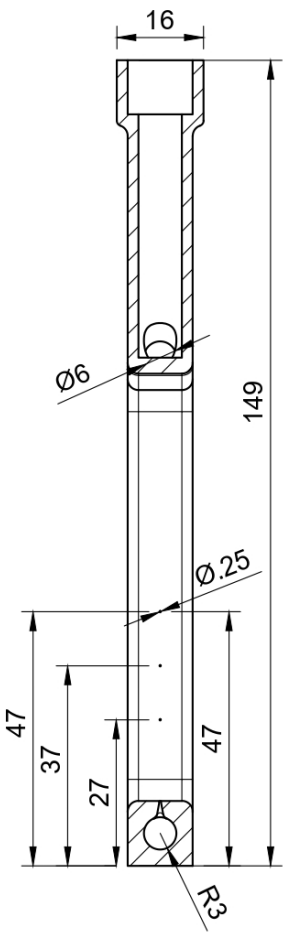




Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación — Componentes empleados en el cátodo			
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Sujeción pieza modelo	Tolerancias generales	Plano nº: 6	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H — Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.12 12:22:32 +01'00'







Doctorado en Ingenierías Química, Mecánica y de Fabricación — Componente empleado para renovar el baño			
Autor: Mariana Hernández Pérez	Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Elemento para recirculación	Tolerancias generales	Plano nº: 7	HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H — Firmado digitalmente por HERNANDEZ PEREZ MARIANA - 42420551H Fecha: 2025.05.14 10:19:19 +01'00'

ANEXO III

Resultados e información complementaria

Programa de deposición empleado para generar las cáscaras

El código generado para el programa definitivo de deposición se presenta a continuación:

```
“ --Auto created configuration script

--Fri May 20 16:19:00 2022

--Model: 2460

--Firmware Version: 1.6.7c

reset()

-- create buffer

buffer1 = buffer.make(30000, buffer.STYLE_STANDARD)

buffer2 = buffer.make(30000, buffer.STYLE_STANDARD)

buffer3 = buffer.make(30000, buffer.STYLE_STANDARD)

buffer4 = buffer.make(30000, buffer.STYLE_STANDARD)

buffer5 = buffer.make(30000, buffer.STYLE_STANDARD)

-- set up SMU

smu.measure.configlist.set("measurelist1", 1, smu.FUNC_DC_VOLTAGE, smu.ATTR_MEAS_NPLC,
    1.000000e+01, smu.ATTR_MEAS_RANGE, 1.000000e+01)

smu.measure.configlist.set("measurelist2", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_MEAS_NPLC,
    1.000000e+01, smu.ATTR_MEAS_RANGE, 2.000000e+00)

smu.source.configlist.set("100mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    24.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 1.000000e-01)

smu.source.configlist.set("250mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    24.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 2.500000e-01)

smu.source.configlist.set("500mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    24.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 5.000000e-01)

smu.source.configlist.set("750mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    24.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 7.500000e-01)

smu.source.configlist.set("1000mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    24.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 10.000000e-01)


-- inactive functions

smu.measure.configlist.set("active", 1, smu.FUNC_DC_VOLTAGE, smu.ATTR_MEAS_NPLC,
    1.000000e+01, smu.ATTR_MEAS_RANGE, 2.000000e+00)

smu.source.configlist.set("active", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT, smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL,
    7.000000e-01, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 1.500000e+00)
```

```
-- active measure function
smu.measure.func = smu.FUNC_DC_VOLTAGE
-- active source function
smu.source.func = smu.FUNC_DC_CURRENT
smu.measure.autorange = smu.ON
smu.source.autorange = smu.ON
smu.source.vlimit.level = 4.000000e00
-- smu.source.autodelay = smu.OFF
smu.source.level = 1.000000e-01
-- sweeps
-- set up TRIGGER MODEL
trigger.model.load("Empty")
trigger.model.setblock(1, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "100mA", 1, "measurelist1", 1)
trigger.model.setblock(2, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "100mA", "measurelist1")
trigger.model.setblock(3, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)
trigger.model.setblock(4, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(5, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)
trigger.model.setblock(6, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(7, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 0)
trigger.model.setblock(8, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(9, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)
trigger.model.setblock(10, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(11, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "250mA", 1, "measurelist1", 1)
trigger.model.setblock(12, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "250mA", "measurelist1")
trigger.model.setblock(13, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)
trigger.model.setblock(14, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(15, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)
trigger.model.setblock(16, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(17, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 0)
trigger.model.setblock(18, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(19, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)
trigger.model.setblock(20, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
```

trigger.model.setblock(21, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "500mA", 1, "measurelist1", 1)

trigger.model.setblock(22, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "500mA", "measurelist1")

trigger.model.setblock(23, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)

trigger.model.setblock(24, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(25, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(26, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(27, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 0)

trigger.model.setblock(28, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(29, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(30, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(31, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "750mA", 1, "measurelist1", 1)

trigger.model.setblock(32, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "750mA", "measurelist1")

trigger.model.setblock(33, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)

trigger.model.setblock(34, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(35, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(36, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(37, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 0)

trigger.model.setblock(38, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(39, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(40, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(41, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "1000mA", 1, "measurelist1", 1)

trigger.model.setblock(42, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "1000mA", "measurelist1")

trigger.model.setblock(43, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)

trigger.model.setblock(44, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer5, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(45, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(46, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer5, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(47, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 0)

trigger.model.setblock(48, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer5, trigger.COUNT_INFINITE)

trigger.model.setblock(49, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 1800)

trigger.model.setblock(50, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer5, trigger.COUNT_STOP)

trigger.model.setblock(51, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.OFF)"

SEMIESFERAS BAJO RELIEVE SIN PANTALLA

Sin pantalla semiesferas bajo relieve (1)

Desviación
112,190

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	374	346	286	290	284	279	343	427
F2	348	218	166	184	195	193	207	304
F3	264	191	114	114	101	110	216	315
F4	240	186	122	116	114	106	188	246
F5	248	193	0	127	109	114	181	213
F6	259	193	0	109	122	0	176	396
F7	306	207	199	201	227	194	215	396
F8	420	394	362	394	407	415	345	468

Sin pantalla semiesferas bajo relieve (2)

Desviación
66,632

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	280	259	224	199	212	218	238	301
F2	283	195	170	161	160	169	182	246
F3	246	199	105	102	102	106	159	243
F4	239	189	112	110	97	110	161	231
F5	261	174	98	104	108	102	173	272
F6	271	166	153	105	119	106	201	271
F7	282	213	166	162	169	186	213	271
F8	308	288	282	283	269	278	288	292

Sin pantalla semiesferas bajo relieve (3)

Desviación
97,124

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	315	331	326	339	351	348	357	327
F2	330	261	212	202	216	216	229	322
F3	312	267	135	141	111	120	198	310
F4	325	219	124	113	119	120	202	306
F5	346	228	174	123	107	130	226	322
F6	352	231	131	139	119	135	209	354
F7	395	294	246	235	235	242	280	354
F8	424	407	404	388	387	395	378	412

Con pantalla semiesferas bajo relieve (1)

Desviación
34,116

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	159	166	222	227	225	211	210	179
F2	177	225	226	235	235	212	195	194
F3	179	227	148	163	158	145	233	217
F4	225	243	185	182	173	158	249	225
F5	233	248	191	190	173	146	255	221
F6	218	237	154	171	157	150	245	187
F7	179	240	224	235	243	241	223	187
F8	167	187	221	265	275	239	180	166

Con pantalla semiesferas bajo relieve (2)

Desviación
39,664

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1								
F2	205	234	197	180	165	156	204	203
F3	261	226	155	166	150	131	226	229
F4	258	227	164	139	141	137	235	266
F5	264	217	145	130	144	143	221	250
F6	238	185	178	116	145	139	217	213
F7	225	191	196	188	214	180	200	213
F8	232	221	238	224	222	224	192	199

Con pantalla semiesferas bajo relieve (3)

Desviación
48,310

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	171	174	170	194	212	203	231	183
F2	211	259	259	262	247	242	250	191
F3	240	268	115	138	153	126	276	228
F4	270	274	137	151	145	147	262	264
F5	270	274	178	207	221	168	254	289
F6	249	271	181	179	168	162	254	252
F7	233	267	252	252	263	275	283	252
F8	211	249	258	296	299	237	189	196

Con pantalla semiesferas sobre relieve (1)

Desviación		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
36,861	F1	199	208	231	245	256	235	224	216
	F2	194	217	212	239	238	223	210	219
	F3	217	246	255	292	299	248	217	230
	F4	226	238	292	317	324	305	240	269
	F5	268	244	297	324	326	311	233	256
	F6	236	229	239	300	312	277	220	202
	F7	194	229	221	225	224	201	229	202
	F8	189	209	223	267	275	247	220	214

Con pantalla semiesferas sobre relieve (2)

Desviación		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
49,613	F1	150	125	116	128	131	124	223	143
	F2	223	262	247	242	268	253	265	221
	F3	273	237	237	278	276	229	280	230
	F4	285	256	268	321	317	270	276	252
	F5	279	228	266	330	321	277	282	258
	F6	227	232	220	277	269	268	245	297
	F7	204	254	225	228	239	232	241	297
	F8	193	206	240	298	284	225	227	185

Con pantalla semiesferas sobre relieve (3)

Desviación		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
45,134	F1	233	219	170	183	218	173	219	170
	F2	202	220	231	248	247	215	254	156
	F3	233	237	245	282	276	238	232	190
	F4	258	236	284	318	334	299	262	240
	F5	266	241	286	358	353	294	255	244
	F6	254	225	240	296	295	249	232	175
	F7	214	213	244	225	226	250	234	175
	F8	232	220	273	303	330	270	164	185

Con pantalla piel de tiburón (1)

Desviación
32,412

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	294	290	291	290	290	268	217	205
F2	262	215	221	241	230	250	237	189
F3	276	219	221	250	263	238	250	202
F4	274	238	266	317	300	249	267	257
F5	277	239	250	310	306	249	235	245
F6	240	239	241	286	266	219	245	183
F7	208	235	225	217	219	238	230	183
F8	195	203	226	233	248	223	237	180

Con pantalla piel de tiburón (2)

Desviación
48,286

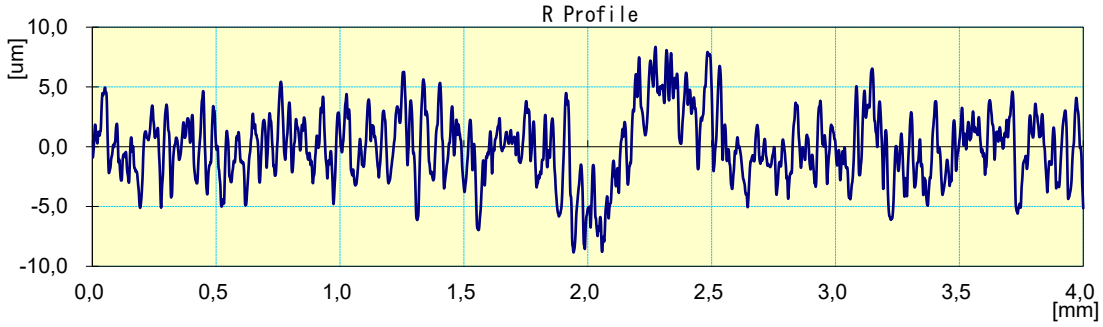
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	160	147	155	173	221	207	268	182
F2	181	191	224	277	309	237	228	184
F3	212	245	271	330	322	250	195	235
F4	242	268	292	326	333	261	250	272
F5	262	283	282	320	327	271	278	272
F6	260	267	273	318	321	339	235	201
F7	221	239	270	281	246	225	209	201
F8	216	258	261	303	307	255	209	193

Con pantalla piel de tiburón (3)

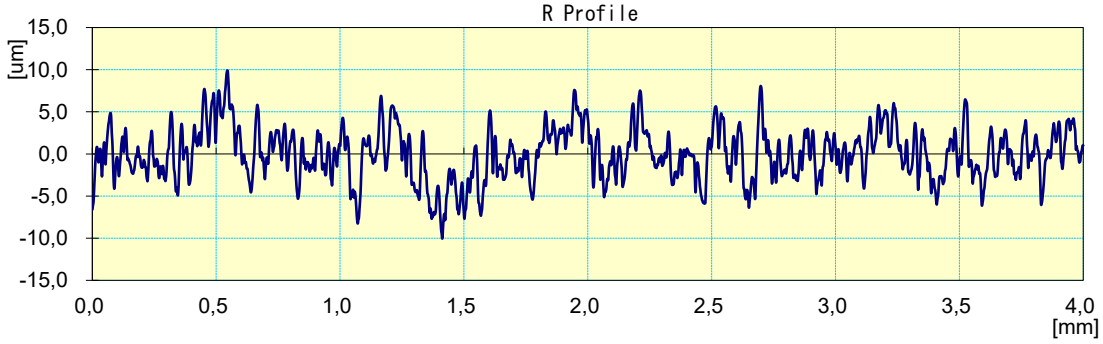
Desviación
29,129

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
F1	186	211	192	205	210	210	216	189
F2	188	215	200	213	208	208	212	189
F3	220	243	218	241	241	241	234	226
F4	240	243	241	286	281	281	259	266
F5	241	216	246	301	288	288	269	266
F6	228	230	207	249	264	264	253	208
F7	218	221	223	229	219	219	214	208
F8	223	229	238	311	250	250	220	200

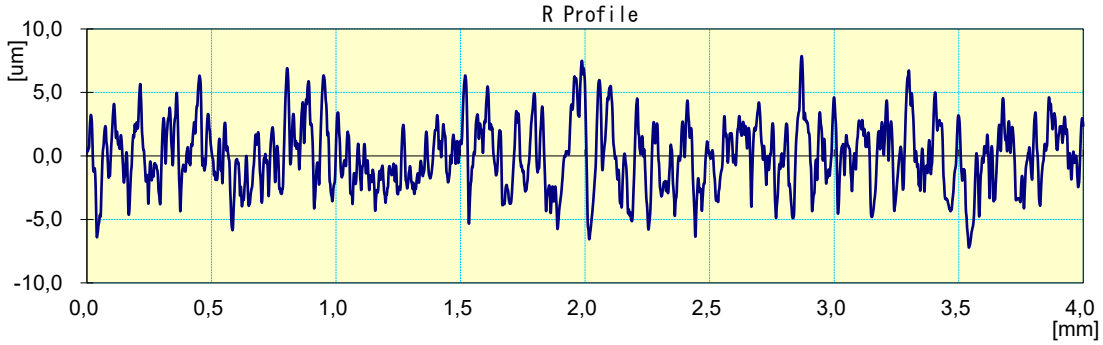
Electrodo macizo



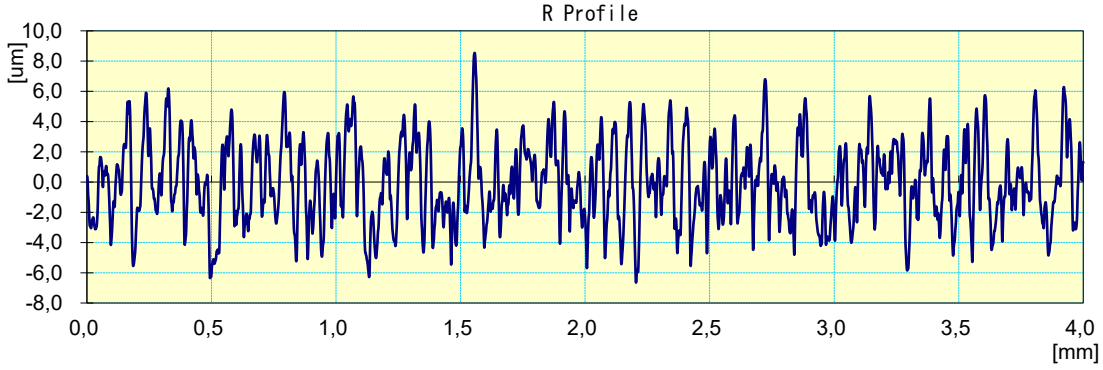
Electrodo de semiesferas entrantes



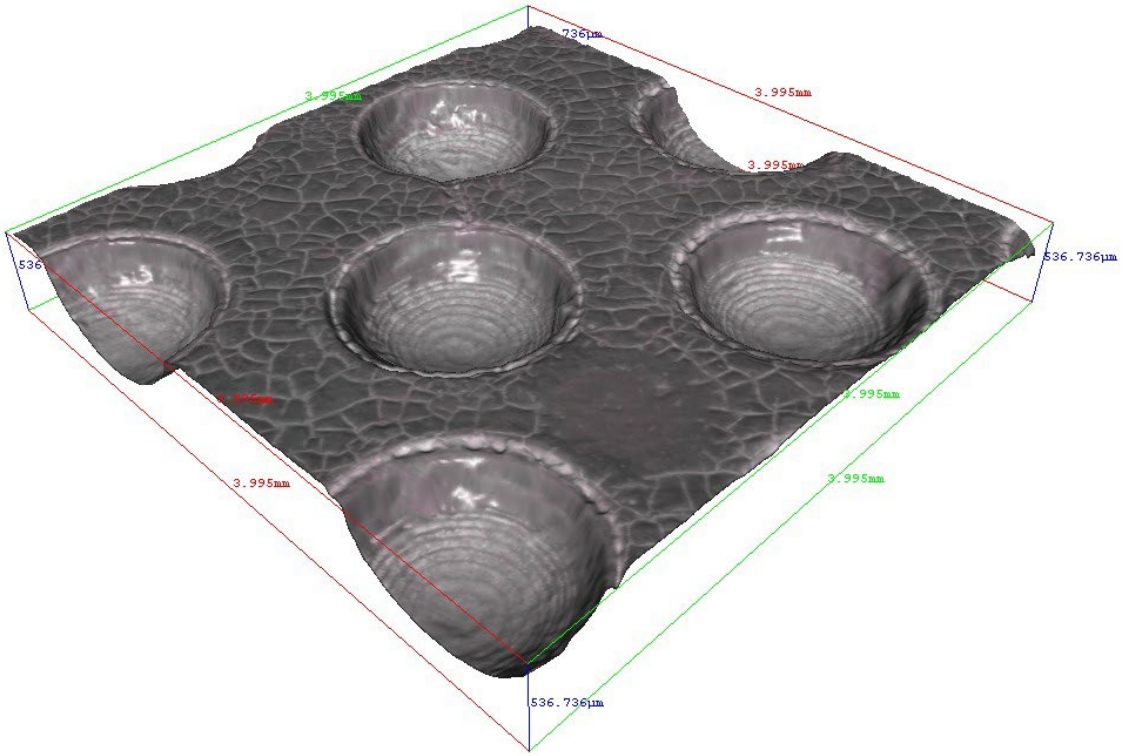
Electrodo de piel de tiburón



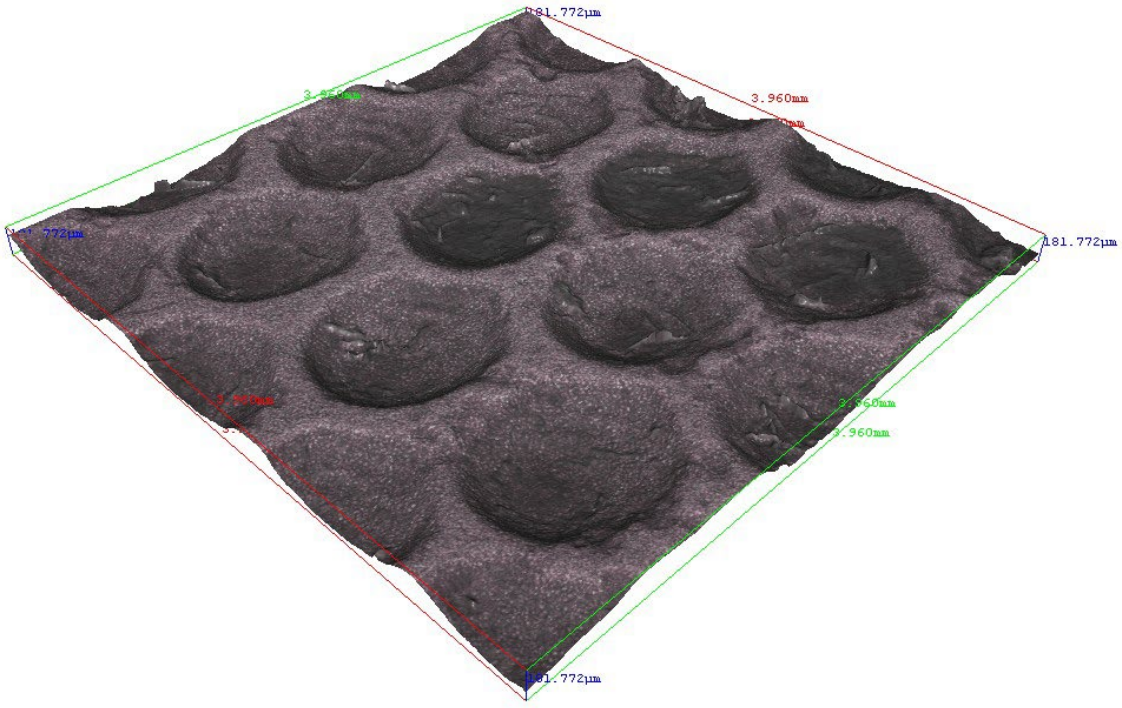
Electrodo de semiesferas salientes



SEMIESFERAS BAJO RELIEVE



PIEL DE TIBURÓN SOBRE RELIEVE



ANEXO IV

Certificados de calibración de equipos empleados

ENAC
CALIBRACIÓN
Nº 59/LC065

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration

Número *Number* 862

Página *Page* 1 de *of* 2 páginas *pages*

SERVICIO DE METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico-Tecnológico,
Planta Sótano, Campus de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria
Tel. 928-45-28-94 - Fax.928-45-86-68
smc@ulpgc.es - www.gi.ulpgc.es/smc/

SMC

OBJETO *Item*	COMPARADOR MECANICO
MARCA *Mark*	MITUTOYO
MODELO *Model*	ID-C112B
IDENTIFICACION *Identification*	49082 Código cliente DC03100
SOLICITANTE *Applicant*	SMC-LMD Edificio Central del Parque Científico Tecnológico Planta Sótano 35017 Campus de Tafira
FECHA/S DE CALIBRACIÓN *Date/s of calibration*	07/02/2008

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatory/ies

SMC
SERVICIO DE METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN
ULPGC

Fecha de emisión 12/02/2008
Date of issue

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.
ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de certificados de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de Internacional Laboratorios Accreditation Cooperation (ILAC).
This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurements capability of the laboratory and it's traceability to national standards.
ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the internacional Laboratorios AccreditationCooperation (ILAC).

MQ041.3

ULPGC
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número **DC08007/15**
Number

SERVICIO DE METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico-Tecnológico
Planta Sótano, Campus de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria
Tel. 928 452 894 – Fax. 928 458 686
smc@ulpgc.es – www.smc.ulpgc.es

OBJETO Item	Banco de verificación de comparadores
MARCA *Mark*	SYLVAC
MODELO *Model*	Unidad: M2b Captador: P25
IDENTIFICACIÓN Identification	Unidad:00462 Captador: 7886 CODIGO DC08007
SOLICITANTE *Applicant*	Servicio de Metrología y Calibración Universidad de Las Palmas de Gran Canaria Edificio Central del Parque Científico Tecnológico Planta Sótano, Campus de Tafira Baja 35017 Las Palmas
FECHA/S DE CALIBRACIÓN Date/s of calibration	03/06/2024

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatoy/es

MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A

Firmado digitalmente por MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A
Fecha: 2024.06.05 14:15:28 +01'00'

Fecha de emisión 05/06/2024
Date of issue

Este certificado no podrá ser reproducido total ni parcialmente sin la aprobación por escrito del SMC.
La validez de los resultados se entiende en el momento y condiciones en que fueron realizadas las mediciones.
La medición está realizada con los patrones indicados, estando trazados a patrones nacionales e internacionales.
Las incertidumbres expresadas en este certificado han sido estimadas de acuerdo con lo establecido en el documento EA-4/02.

L

ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria

CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número **DI02222/03**
Number

SERVICIO DE METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico-Tecnológico
Planta Sótano, Campus de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria
Tel. 928 452 894 – Fax. 928 458 686
smc@ulpgc.es – www.smc.ulpgc.es

OBJETO Item	Microscopio de medición
MARCA *Mark*	OLIMPUS
MODELO *Model*	U-25LBD
IDENTIFICACIÓN Identification	1C55423 Código DI02222
SOLICITANTE *Applicant*	Fabricación Integrada Parque Científico-Tecnológico Planta Sótano - Campus de Tafira Baja 35017 - Las Palmas
FECHA/S DE CALIBRACIÓN Date/s of calibration	29/04/2025

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatoy/es

MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A
Firmado digitalmente por MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A
Fecha: 2025.05.08 08:37:26 +01'00'

Fecha de emisión 05/05/2025
Date of issue

Este certificado no podrá ser reproducido total ni parcialmente sin la aprobación por escrito del SMC.
La validez de los resultados se entiende en el momento y condiciones en que fueron realizadas las mediciones.
La medición está realizada con los patrones indicados, estando trazados a patrones nacionales e internacionales.
Las incertidumbres expresadas en este certificado han sido estimadas de acuerdo con lo establecido en el documento EA-4/02.

LI

ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria

CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número **MA02109/16**
Number

SERVICIO DE METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico-Tecnológico
Planta Sótano, Campus de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria
Tel. 928 452 894 – Fax. 928 458 686
smc@ulpgc.es – www.smc.ulpgc.es

OBJETO Item	Báscula de Precisión
MARCA *Mark*	METTLER
MODELO *Model*	BL224
IDENTIFICACIÓN Identification	0-1000-5100 Código MA02109
SOLICITANTE *Applicant*	Servicio de Metrología y Calibración Laboratorio de Masa Edificio Central del Parque Científico Tecnológico Planta Sótano 35017 Campus de Tafira Las Palmas de Gran Canaria
FECHA/S DE CALIBRACIÓN Date/s of calibration	01/04/2025

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatoy/es

MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A

Firmado digitalmente por MARRERO ALEMAN MARIA DOLORES - 42854937A
Fecha: 2025.04.07 23:03:28 +01'00'

Fecha de emisión 01/04/2025
Date of issue

Este certificado no podrá ser reproducido total ni parcialmente sin la aprobación por escrito del SMC.
La validez de los resultados se entiende en el momento y condiciones en que fueron realizadas las mediciones.
La medición está realizada con los patrones indicados, estando trazados a patrones nacionales e internacionales.
Las incertidumbres expresadas en este certificado han sido estimadas de acuerdo con lo establecido en el documento EA-4/02.