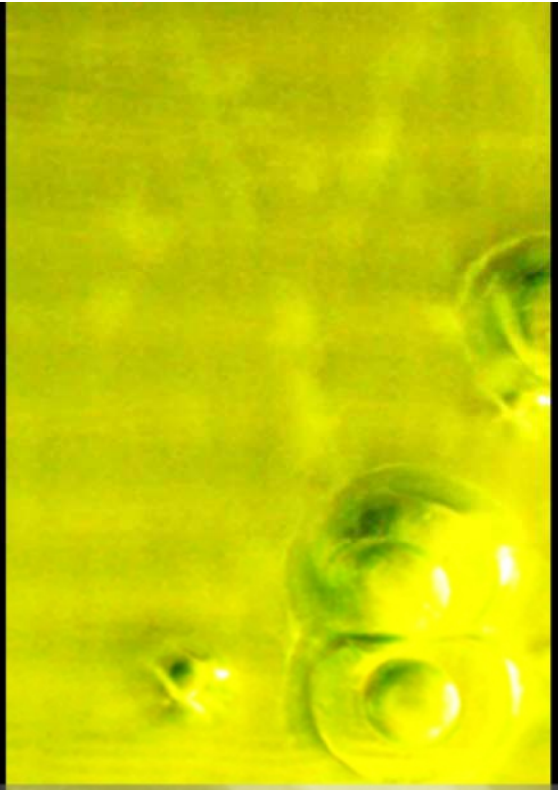
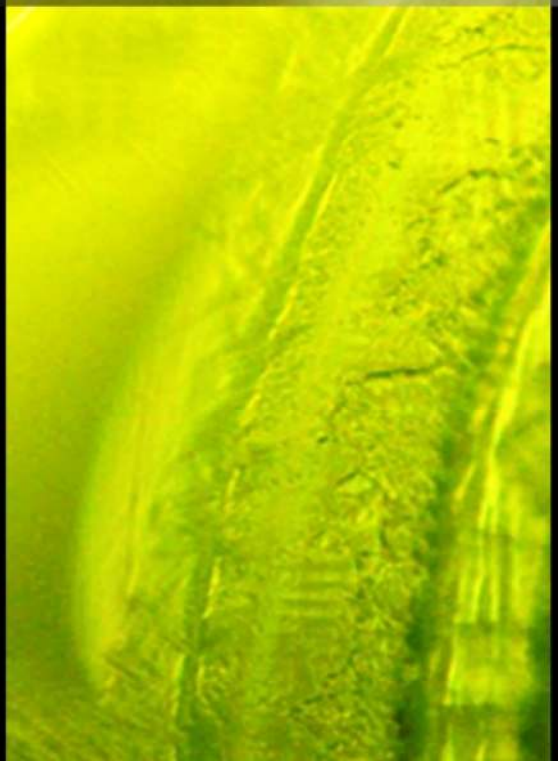
ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria

DOCTORADO EN INGENIERÍAS QUÍMICA, MECÁNICA Y DE FABRICACIÓN



TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO.
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE APLICACIÓN A LA FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES ESTRUCTURADAS.



CARLOS J. SÁNCHEZ MORALES
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
MAYO DE 2021

ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍAS QUIMICA, MECANICA Y DE FABRICACIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE UN EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO.
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE APLICACIÓN A LA FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES ESTRUCTURADAS.**

Tesis doctoral presentada por **Carlos Jesús Sánchez Morales**

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

El director **El doctorando**

Las Palmas de Gran Canaria, a 25 de mayo de 2021

A los que ya no están, pero seguro hubiesen querido estar, y yo hubiese querido que estuvieran. Pepe Morales, Inocencia Ramos y Mario Pons, esta Tesis Doctoral es también de ellos.

A mi mujer Nieves y a mi hija Gara, las dos luces que alumbran mi camino. El tiempo lejos de ellas no volverá.

Al guerrero. Porque nadie nace guerrero. Porque eliges ser uno cuando te niegas a permanecer sentado, cuando te niegas a dar marcha atrás, cuando te levantas después de ser derribado. Eliges ser uno porque si no eres tú, ¿quién?

AGRADECIMIENTOS

"Si vuelas solo irás más rápido, si vuelas acompañado llegarás más lejos".

Epitafio de Mario Pons (4 de julio de 2018)

Mi profundo agradecimiento a todos aquellos y aquellas que han contribuido al desarrollo de este trabajo.

A mi director de Tesis Pedro Hernández. Por su apuesta a pesar de las dificultades implícitas a mi situación. Por poner a mi disposición todo el equipamiento necesario para el desarrollo de este trabajo, proponerme para una línea de investigación eminentemente experimental y por ser el guía en este camino hacia el crecimiento académico. Gracias Pedro.

Al Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (SMC) por la disponibilidad de sus laboratorios y equipos para el desarrollo de esta investigación. Gracias Pedro Socorro.

A José Ignacio Rodríguez Jorge. Su contribución en el desarrollo electrónico del DCAB y su experiencia con los sistemas de medición han sido fundamentales para el progreso de este trabajo. Su apoyo, su colaboración y compañerismo durante toda la fase experimental ha sido inestimable. Gracias Pepe.

A María Dolores Martínez Rivero por su inestimable colaboración en la realización de los modelos funcionales y la preparación y evolución de los experimentos. De alumna a compañera. Todas sus horas de dedicación y esfuerzo han sido la cimentación de esta tesis. Gracias Loli.

Al grupo de Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la Universidad de Cádiz (UCA) por su apoyo técnico con los experimentos SEDM. En especial al Doctor Jorge Salguero por su especial implicación en la consecución de resultados. Gracias Jorge.

A Nieves por inundar e invadir de creatividad mi mundo y este trabajo. De la indiferencia a la excelencia, todo cambia cuando llega su talento. Gracias Amor.

A todos aquellos que han hecho crecer mi intelecto y mi persona. Son los artífices de lo que soy. A todos los que de una forma u otra me han acompañado en este camino, familiares, amigos y compañeros de trabajo que han formado parte de un entorno favorable para seguir empujando hasta la meta. Cada "¿Cuánto falta?", cada "¿Cómo lo llevas?" formaran parte, para siempre, de esta historia.

Las líneas finales no podrían ser para otros que para los míos. Mis padres, Francisco y Juana Delia, ellos empezaron todo y nunca lo dejaron. Mi hermana Goretti y mi hermano Ione, mis compañeros en el viaje que me ha forjado como persona. Mi madrina Toni, siempre preocupada, siempre presumiendo, siempre deseando lo mejor desde el inicio de los inicios en aquel balcón. Gracias a todos desde las lágrimas que surgen del corazón.

RESUMEN

Modificar la superficie de un material de forma intencionada puede alterar sus propiedades y su comportamiento ante determinados fenómenos físicos. Cuando esto se hace de forma ordenada, con la ayuda de una matriz o un patrón, se denomina texturizar o aplicar una textura. Cuando el texturizado se realiza con el objetivo de mejorar alguna o algunas de las propiedades de ese material, el texturizado cumple una función determinada, nos encontramos entonces ante el texturizado funcional.

Los avances tecnológicos y los nuevos campos de investigación necesitan de piezas cada vez más pequeñas y de mayor rendimiento, lo que llevan al límite, las capacidades técnicas de máquinas y herramientas cuando se trabaja a escalas submilimétricas.

La electroerosión es uno de los procesos que ofrece mejores resultados a esa escala. Para desarrollar su cometido necesita de una herramienta (electrodo), que es la encargada de generar la textura deseada sobre la superficie del material. Esta herramienta contendrá el patrón con la geometría diseñada.

Para conformar esta herramienta, en los casos en que la geometría es compleja, ya sea por la forma o por los detalles, son pocos los procesos que pueden realizarla. El proceso de electroconformado es uno de los que mejores resultados ofrece.

Las hipótesis de partida de esta Tesis Doctoral se basan en la necesidad de combinar técnicas de fabricación avanzadas, para conseguir herramientas de alta calidad en forma, geometría y dimensiones, y su posterior uso en el texturizado funcional de superficies, mediante el proceso de electroerosión. Además, para facilitar la accesibilidad a estas tecnologías, esa fabricación debe realizarse mediante un equipo diseñado y desarrollado a tal fin, en base a las tecnologías disponibles y con costes contenidos.

En este trabajo se ha abordado el estudio de compatibilidad entre diferentes tecnologías de fabricación, el diseño de un equipo capaz de combinarlas, un estudio experimental de sus capacidades, así como la fabricación y posterior ensayo de electrodos con geometrías funcionales para el texturizado de superficies a escala micrométrica.

En base a lo anterior se ha desarrollado un proceso de fabricación combinado, al que se ha denominado AMSME, que se ha aprovechado de las capacidades individuales de cada uno de los procesos que lo forman. Esta metodología propuesta ha demostrado un gran potencial en la conformación de superficies funcionales para su uso como electrodo para procesos de electroerosión y su futura aplicación a nivel industrial.

ABSTRACT

Intentionally modifying material´s surface can alter its properties and behavior of certain physical phenomena. When this is done in an orderly manner, with an array or pattern, it is called texturing. When texturing is done with the aim of improving some of the properties of that material, the textured one is called functional texture as it fulfills a certain function.

Technological advances and new research fields require constantly smaller parts with high-performance reaching the technical capacities of machines, which already work at submillimeter scales.

EDM is one of the processes that offers best results on that scale. It needs a tool (electrode) to carry out the task. This tool is responsible for generating the desired texture on the material surface and contain the pattern with the designed geometry.

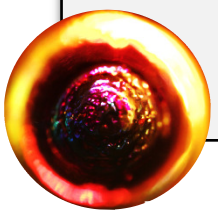
There are few processes that can manufacture the tool when the geometry is complex. The electroforming process is one of the best choices.

The starting hypotheses of this investigation are based on the need to combine advanced manufacturing techniques. It is important to achieve high quality tools via the EDM process regarding shape, geometry, dimensions, and the subsequent use in functional texture of surfaces. In addition, the manufacturing must be carried out by an equipment designed and developed for this purpose. It should be based on available and low-cost technologies to facilitate accessibility to these technologies.

This work carried out the study of compatibility between different manufacturing technologies, the design of an equipment capable of combining them, an experimental study of their abilities, as well as the manufacture and electrodes´ testing with functional geometries for micrometric scale surface´s texturing.

Based on the above, a combined manufacturing process has been developed. It has been called AMSME and the individual capacities of each of the processes that comprise it has been used to its fullest. This proposed methodology has shown great potential in functional surfaces manufacturing in its use as an electrode for EDM, and its future application at an industrial level.

CONTENIDOS



CAPÍTULO 01| **Introducción**

1.1. MOTIVACIÓN.....01| 1

1.2. OBJETIVOS.....01| 1

1.3. CONTENIDO Y ESTRUCTURA DE ESTE TRABAJO. .....01| 8

CAPÍTULO 02| **Antecedentes**

2.1. PREFACIO. .....02| 1

2.1.1. TRIBOLOGÍA Y SUPERFICIES ESTRUCTURADAS. .....**02|** 1

2.1.2. MICRO FABRICACIÓN.....**02|** 5

2.1.3. FABRICACIÓN ADITIVA.....**02|** 6

2.1.4. ELECTROEROSIÓN (EDM).....**02|** 8

2.1.5. SPUTTERING.....**02|** 12

2.1.6. ELECTROCONFORMADO. .....**02|** 15

2.1.7. PRINCIPIOS DEL ELECTROCONFORMADO.....**02|** 20

2.1.7.1. Etapas del electroconformado. ..... 02| 21

2.1.7.2. Densidad de corriente. ..... 02| 23

2.1.7.3. Velocidad de deposición. ..... 02| 24

2.1.7.4. Espesor de la deposición. ..... 02| 24

2.1.7.5. Poder de deposición. ..... 02| 26

2.1.7.6. Poder de nivelación. ..... 02| 27

2.1.7.7. Control y mejora de los parámetros operativos del proceso. ..... 02| 27

2.1.7.7.1. Densidad y tipos de corriente. ..... 02| 27

2.1.7.7.2. Temperatura. ..... 02| 29

2.1.7.7.3. Composición del baño electrolítico. ..... 02| 30

2.1.7.7.4. Control del pH. ..... 02| 30

2.1.7.7.5. Aditivos. ..... 02| 31

2.1.7.7.6. Agitación y filtración del baño. ..... 02| 31

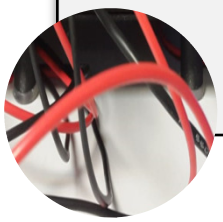
2.1.7.7.7. Influencia del tamaño y forma de la pieza. ..... 02| 32

2.1.7.7.8. Pantallas o escudos aislantes. ..... 02| 33

2.2. ESTADO DE LA TÉCNICA. ..... 02| 34

2.2.1. TÉCNICAS DE ELECTROCONFORMADO ..... 02| 35

2.2.2. FABRICACIÓN ADITIVA Y MICRO FABRICACIÓN ..... 02| 38



CAPÍTULO 03| **Descripción del equipo desarrollado**

3.1. INTRODUCCIÓN. ..... **03|** 1

3.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO. ..... **03|** 1

3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ELECTRO CONFORMADO. ..... **03|** 2

3.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN. ..... **03|** 3

3.3.1.1 Descripción del equipo. ..... **03|** 5

3.3.2. DISPOSITIVO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE AGITACIÓN DEL BAÑO (DCAB). ..... **03|** 11

3.3.2.1. Descripción del equipo. ..... **03|** 11

3.3.2.2. Componentes. ..... **03|** 13

3.3.2.3. Funcionamiento. ..... **03|** 21

3.3.2.4. Aplicación de los modos de trabajo a los experimentos. ..... **03|** 25

3.3.3. PUENTE DE SUJECIÓN. ..... **03|** 27

3.3.3.1. Descripción. ..... **03|** 27

3.3.3.2. Componentes. ..... **03|** 28

3.3.3.2.1. Estructura soporte. ..... **03|** 28

3.3.3.2.2. Mecha. ..... **03|** 30

3.3.3.2.3. Anillo de desplazamiento. ..... **03|** 33

3.3.3.2.4. Bulón de bloqueo. ..... **03|** 34

3.3.3.2.5. Sistema de fijación del modelo funcional. .....**03|** 36

3.3.3.2.6. Conector banana hembra. .....**03|** 37

3.3.3.2.7. Funcionamiento. .....**03|** 38

3.3.4. RETROILUMINACIÓN. .....**03|** 40

3.3.4.1. Descripción. .....**03|** 40

3.3.4.2. Funcionamiento. .....**03|** 40

3.3.5. SISTEMA DE AGITACIÓN DEL BAÑO. .....**03|** 42

3.3.5.1. Descripción del equipo. .....**03|** 42

3.3.5.2. Caracterización de la bomba. .....**03|** 44

3.3.5.3. Componentes accesorios. .....**03|** 49

3.3.5.3.1. Carcasa .....**03|** 49

3.3.5.3.2. Colector. .....**03|** 53

3.3.5.4. Funcionamiento del sistema de impulsión. .....**03|** 57

3.3.6. TANQUE DE MICRO-ELECTROCONFORMADO. .....**03|** 59

3.3.6.1. Descripción. .....**03|** 59

3.3.6.2. Caracterización. .....**03|** 60

3.3.7. FIJACIÓN DEL ÁNODO. .....**03|** 63

3.3.8. MÁSCARA PROTECTORA PARA EL MODELO FUNCIONAL. .....**03|** 66

3.3.9. CÁMARA DE VIGILANCIA. .....**03|** 70

3.3.9.1. Descripción del equipo. .....**03|** 70

3.3.9.2. Funcionamiento. .....**03|** 72

3.4. CONCLUSIONES. .....03| 74

CAPÍTULO 04| **Procedimiento de ensayo**

4.1. INTRODUCCIÓN ..... 04| 1

4.2. FASE 1: FABRICACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL ..... 04| 1

4.2.1. EVOLUCIÓN DEL MODELO FUNCIONAL..... **04|** 10

4.3. FASE 2: METALIZADO. ..... 04| 17

4.3.1. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO. ..... **04|** 23

4.3.1.1. Identificación del equipo. ..... **04|** 23

4.3.1.2. Identificación del panel frontal del SC7620. ..... **04|** 24

4.3.1.3. Operativa del procedimiento de metalizado. ..... **04|** 26

3.3.1.1. Pesaje del modelo funcional. ..... **04|** 34

4.4. FASE 3: ELECTROCONFORMADO..... 04| 36

4.4.1. ENMASCARADO DEL MODELO FUNCIONAL. ..... **04|** 36

4.4.2. PREPARACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ALIMENTACIÓN Y MEDIDA. ..... **04|** 38

4.4.3. PREPARACIÓN DEL DCAB..... **04|** 41

4.4.4. PREPARACIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA. ..... **04|** 41

4.4.5. PREPARACIÓN DE CONEXIONES Y ULTIMAS COMPROBACIONES. ..... **04|** 42

4.4.6. DESCARGA DE DATOS. ..... **04|** 43

4.5. FASE 4. INSPECCIÓN Y MEDICIÓN ..... 04| 48

4.5.1. INSPECCIÓN ..... **04|** 48

4.5.2. MEDICIÓN. ..... **04|** 51

4.6. CONCLUSIONES ..... 04| 59

CAPÍTULO 05| **Aplicación experimental del equipo desarrollado**

5.1. INTRODUCCIÓN. ..... 05| 1

5.2. CONDICIONES DE ENSAYO..... 05| 2

5.3. TIPOLOGÍAS DE ENSAYO ..... 05| 3

5.3.1. ENSAYO TIPO 1. ..... **05|** 4

5.3.1.1. Descripción. ..... **05|** 4

5.3.1.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 1. ..... **05|** 8

5.3.1.3. Conclusiones del ensayo tipo 1. ..... **05|** 14

5.3.2. ENSAYO TIPO 2. ..... **05|** 14

5.3.2.1. Descripción. ..... **05|** 14

5.3.2.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2. ..... **05|** 15

5.3.2.3. Ensayo 2.2.h. ..... **05|** 20

5.3.2.4. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2.2.h. ..... **05|** 21

5.3.2.5. Ensayo 2.3. ..... **05|** 23

5.3.2.6. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2.3. ..... **05|** 24

5.3.2.7. Conclusiones del ensayo tipo 2. ..... **05|** 27

5.3.3. ENSAYO TIPO 3. ..... 05| 28

5.3.3.1. Descripción. ..... 05| 28

5.3.3.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 3. ..... 05| 29

5.3.3.3. Conclusiones del ensayo tipo 3. ..... 05| 32

5.3.4. ENSAYO TIPO 4. ..... 05| 33

5.3.4.1. Descripción. ..... 05| 33

5.3.4.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 4. ..... 05| 35

5.3.4.3. Conclusiones del ensayo tipo 4. ..... 05| 38

5.4. FABRICACIÓN DE HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICES ESTRUCTURADAS. ..... 05| 39

5.4.1. INTRODUCCIÓN. ..... 05| 39

5.4.1.1. Fabricación del electrodo funcional. ..... 05| 41

5.4.1.2. Fabricación de soporte para el electrodo funcional. ..... 05| 46

5.5 RESULTADO EXPERIMENTAL DEL USO DE LA HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES CON PROCESO EDM . ..... 05| 50

5.5.1. INTRODUCCIÓN. ..... 05| 50

5.5.1.1. Preparación de las probetas. ..... 05| 51

5.5.1.2. Texturizado de las muestras ..... 05| 52

5.5.1.3. Resultados ..... 05| 54

5.5.1.4. Comparativa con electrodo de grafito. ..... 05| 62

5.6. CONCLUSIONES ..... 05| 62

CAPÍTULO 06| **Conclusiones y trabajos futuros**

6.1. CONCLUSIONES. ..... **06|** 1

6.1.1. COMBINACIÓN DE DIFERENTES PROCESOS DE FABRICACIÓN. ..... **06|** 1

6.1.2. DISEÑO Y DESARROLLO DE EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO. ..... **06|** 2

6.1.3. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DE EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO. **06|** 4

6.1.4. FABRICACIÓN DE LOS MODELOS FUNCIONALES. ..... **06|** 5

6.1.5. FABRICACIÓN DE HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES ESTRUCTURADAS..... **06|** 6

6.1.6. MEDICIÓN DE LAS PIEZAS OBTENIDAS. ..... **06|** 6

6.1.7. DIFERENTES RESULTADOS APORTADOS POR LOS ENSAYOS. ..... **06|** 7

6.2. TRABAJOS FUTUROS. ..... **06|** 8

B.1. BIBLIOGRAFÍA..... **B|** 1

ANEXO I| **Exposición de resultados de los experimentos**

I.1. INTRODUCCIÓN. ..... **I|** 1

I.2. IMÁGENES DE LAS ELECTROFORMAS. ..... **I|** 2

I.3. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS ELECTROFORMAS EN LA CARA NO FUNCIONAL.|| 6

I.4. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS ELECTROFORMAS EN LA CARA FUNCIONAL.....|| 13

I.5. MAPAS DE ESPESORES 3D. .....|| 19

I.6. GRÁFICAS DE DISTRIBUCIÓN SUPERFICIAL DE ESPESORES.....|| 25

I.7. GRÁFICAS DE ESPESOR EN FONDOS DE LAS CAVIDADES SEMIESFÉRICAS. .....|| 27

I.8. EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE DEPOSICIÓN EN SECUENCIA DE IMÁGENES CAPTADAS POR EL SISTEMA DE VIGILANCIA PARA LA PIEZA. .....|| 28

I.9. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS CÁSCARAS DURANTE EL PROCESO EDM. .....|| 29

I.10. DETALLES AL MICROSCOPIO DE LAS PROBETAS ELECTRO EROSIONADAS. .....|| 34

ANEXO II|**Códigos fuente de programación**

II.1. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO KEITHKEY 2460 SOURCEMETER® PARA EL ENSAYO TIPO 2. ..... III| 1

II.2. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL DCAB PROGRAMADO EN EL ARDUINO NANO. ..... III| 2

PLANOS|

P.2.	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL - Alojamiento……..	**P|** 2
P.3.	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL - Placa de apriete……	**P|** 3
P.4.	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL - Separador……	**P|** 4
P.5.	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL - Mecha……	**P|** 5
P.6.	PUENTE SUJECCIÓN - Conjunto……	**P|** 6
P.7.	PUENTE SUJECCIÓN - Estructura soporte……	**P|** 7
P.8.	PUENTE SUJECCIÓN - Mecha……	**P|** 8
P.9.	PUENTE SUJECCIÓN – Anillo de desplazamiento……	**P|** 9
P.10.	PUENTE SUJECCIÓN – Bulón de bloqueo……	**P|** 10
P.11.	SISTEMA DE AGITACIÓN – Carcasa de la bomba……	**P|** 11
P.12.	SISTEMA DE AGITACIÓN – Colector……	**P|** 12
P.13.	COMPONENTES – Fijación del ánodo……..	**P|** 13
P.14.	MODELO FUNCIONAL – Protector……..	**P|** 14
P.15.	MODELO FUNCIONAL – Modelo Evo4……..	**P|** 15
P.16.	UTIL DE MEDICIÓN – Conector……..	**P|** 16

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2. ANTECEDENTES.

Fig. 2.1. Representación del proceso de fotopolimerización en tanque SLA / DLP.....**02|** 7

Fig. 2.2. Ilustración esquemática del proceso EDM .....**02|** 9

Fig. 2.3. Electrodo EDM. (a) Ubicación en condiciones de servicio. (b) Detalle de la geometría funcional.....**02|** 10

Fig. 2.4. Ilustración esquemática del proceso de deposición por pulverización catódica....**02|** 13

Fig. 2.5. Ilustración esquemática del proceso de electroconformado.....**02|** 17

Fig. 2.6. Crecimientos de una deposición de litio sobre electrodo de cobre .....**02|** 22

Fig. 2.7. Crecimientos de tipo nucleado y arborescente de cobre .....**02|** 22

Fig. 2.8. Efecto de throwing power en una pieza electrodepositada de cobre. .....**02|** 26

Fig. 2.9. Imágenes de la investigación de Zhao et al. (2019).....**02|** 36

Fig. 2.10. Imágenes de la investigación de Nishikawa et al. (2019).....**02|** 37

Fig. 2.11. Imágenes de la investigación de Yali et al. (2019).....**02|** 39

Fig. 2.12. Imágenes de la investigación de Matsuzaki et al. (2019) .....**02|** 39

Fig. 2.13. Imágenes de la investigación de Wu et al. (2019).....**02|** 40

Fig. 2.14. Imagen extraída del estudio realizado por Kim et al. (2019).....**02|** 41

Fig. 2.15. imágenes extraídas del estudio realizado por Padhi et al. (2019).....**02|** 42

Fig. 2.16. Imágenes extraídas del estudio realizado por Danade et al. (2019) .....**02|** 42

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO.

Fig. 3.1. Componentes del equipo de micro-electroconformado.....**03|** 4

Fig. 3.2. KEITHLEY 2460 - vista frontal.....**03|** 6

Fig. 3.3. KEITHLEY 2460- Menú de iconos de la pantalla gráfica.....**03| 7**

Fig. 3.4. KEITHLEY 2460 – Ejemplo de diagrama de flujo de programa. .....**03|** 8

Fig. 3.5. KEITHLEY 2460 - Pantalla de medición. .....**03|** 9

Fig. 3.6. KEITHLEY 2460 - Pantalla de representación de datos. .....**03|** 10

Fig. 3.7. KEITHLEY 2460 - Pantalla de lectura de datos. .....**03|** 10

Fig. 3.8. Dispositivo de control automático de agitación del baño electrolítico (DCAB). ....**03|** 11

Fig. 3.9. Componentes del DCAB.....**03|** 12

Fig. 3.10. Fuente de alimentación. (a) Vista general. (b) Vista instalada.....**03|** 13

Fig. 3.11. Puente H- L298N. (a) esquema de conexión. (b) Vista instalado. .....**03|** 15

Fig. 3.12. Fusible de protección.....**03|** 15

Fig. 3.13. Pantalla LCD WH2002A. (a) Vista general. [3] (b) vista instalada. .....**03|** 16

Fig. 3.14. Sensor de intensidad ACS712. (a) esquema de conexión. (b) vista instalado. ....**03|** 17

Fig. 3.15. Arduino nano 3.0 ATMEGA328P [2]. (a) Vista general. (b) Ubicación.....**03|** 19

Fig. 3.16. Componentes para chasis. (a) Conector banana hembra. (b) Pulsador. (c) Conexión DC. (d) Interruptor. (e) Conector IEC C14.....**03|** 20

Fig. 3.17. Imagen del box. .....**03|** 21

Fig. 3.18. Pantalla de visualización del DCAB. Ejemplo de visualización en modo manual. **03|** 22

Fig. 3.19. Pantalla de visualización del DCAB. Programación del valor de consigna. .....**03|** 22

Fig. 3.20. Pantalla de visualización del DCAB. Ejemplo de visualización en modo automático. .....**03|** 23

Fig. 3.21. Curva de regresión para corrección de las lecturas.....**03|** 25

Fig. 3.22. Modelado del puente de sujeción.....**03|** 28

Fig. 3.23. Modelado de la estructura soporte.....**03|** 29

Fig. 3.24. Posición de la estructura soporte sobre la placa de impresión.....**03|** 30

Fig. 3.25. Modelado de la mecha. (a) Vista frontal. (b) Vista planta. (c) Vista trasera.....**03|** 31

Fig. 3.26. Posición de la estructura soporte sobre la placa de impresión. .....**03|** 32

Fig. 3.27. Modelado del anillo de desplazamiento. .....**03|** 33

Fig. 3.28. Posición del anillo de desplazamiento sobre la placa de impresión. .....**03|** 34

Fig. 3.29. Modelado del bulón de bloqueo. .....**03|** 35

Fig. 3.30. Posición del bulón de bloqueo sobre la placa de impresión. .....**03|** 36

Fig. 3.31. Componente para la fijación de la probeta de ensayos. .....**03|** 37

Fig. 3.32. Conector banana hembra para chasis. .....**03|** 38

Fig. 3.33. Puente soporte. (a) Vista frontal. (b) Vista trasera.....**03|** 38

Fig. 3.34. Puente de sujeción en posición de ensayo. .....**03|** 39

Fig. 3.35. Modulo LED - mod. SN1720130415. .....**03|** 40

Fig. 3.36. Tanque de ensayos con retroiluminación activada. .....**03|** 41

Fig. 3.37. Detalle de falta de deposición durante la realización de un ensayo .....**03|** 42

Fig. 3.38. Imagen de la Bomba GAMBRO K2344100S. .....**03|** 43

Fig. 3.39. Máquina de hemodiálisis GAMBRO AK200S. .....**03|** 43

Fig. 3.40. Equipo de ensayo para determinar el caudal de la bomba. .....**03|** 45

Fig. 3.41. Proceso de medición de masa de la descarga de fluido. .....**03|** 46

Fig. 3.42. Etiqueta de calibración del equipo de medición. .....**03|** 47

Fig. 3.43. Curva característica de la bomba en conexión directa.....**03|** 48

Fig. 3.44. Curva característica de la bomba en conexión inversa. .....**03|** 49

Fig. 3.45. Modelado 3D de la carcasa.....**03|** 51

Fig. 3.46. Posición de la carcasa sobre la placa de impresión. .....**03|** 52

Fig. 3.47. Carcasa incorporada en el tanque de ensayos. .....**03|** 52

Fig. 3.48. Problemas de flujo. (a) Turbulencia. (b) Burbujeo en la superficie. ..... **03|** 53

Fig. 3.49. Modelado del colector. .....**03|** 54

Fig. 3.50. Posición del colector sobre la placa de impresión. .....**03|** 55

Fig. 3.51. Acoplamiento entre colector y la bomba. .....**03|** 56

Fig. 3.52. Vista Frontal del colector sumergido en el tanque de ensayos.....**03|** 56

Fig. 3.53. Vista lateral del colector sumergido en el tanque.....**03|** 57

Fig. 3.54. Funcionamiento de la bomba.....**03|** 58

Fig. 3.55. División de escala en el eje horizontal.....**03|** 60

Fig. 3.56. División de escala en eje vertical.....**03|** 61

Fig. 3.57. Relación volumen-altura.....**03|** 62

Fig. 3.58. Pesado del tanque.....**03|** 63

Fig. 3.59. Modelado de la fijación para el ánodo.....**03|** 64

Fig. 3.60. Posición de la fijación sobre la placa de impresión.....**03|** 65

Fig. 3.61. Conjunto ánodo, soporte ánodo, cable de conexión y fijación mecánica.....**03|** 65

Fig. 3.62. Crecimiento no controlado en la parte trasera del modelo funcional.....**03|** 66

Fig. 3.63. Modelado de la máscara protectora del modelo.....**03|** 67

Fig. 3.64. Posición de la máscara sobre la placa de impresión.....**03|** 68

Fig. 3.65. Preparación del modelo funcional con máscara previo a la deposición.....**03|** 69

Fig. 3.66. Resultado de aplicación de la máscara. (a) Pieza funcional con máscara. (b) Pieza finalizada.....**03|** 70

Fig. 3.67. Cámara de vigilancia Mi Home 360° 1080P.....**03|** 71

Fig. 3.68. Imagen real captada por la cámara de vigilancia.....**03|** 73

Fig. 3.69. Pantalla de visualización de la aplicación para smartphone.....**03|** 73

Capítulo 4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

Fig. 4.1. Modelo funcional.....**04|** 2

Fig. 4.2. Máquina de impresión 3D Wanhao Duplicator 7 .....**04|** 4

Fig. 4.3. Posición del modelo funcional sobre la placa de impresión.....**04|** 5

Fig. 4.4. Modelo funcional fabricado. (a) Monocure 3D blanca. (b) Monocure 3D transparente ..... **04|** 6

Fig. 4.5. Modelo funcional. (a) Resultado. (b) detalle de los soportes. ..... **04|** 7

Fig. 4.6. Atrapamientos de resina vistos al microscopio (a) Fondo claro. (b) Fondo oscuro. ..... **04|** 8

Fig. 4.7. Pieza sobre la placa de impresión. Detalle de atrapamientos de resina. ..... **04|** 8

Fig. 4.8. Cámara de curado. ..... **04|** 9

Fig. 4.9. Primer modelo funcional plano. ..... **04|** 11

Fig. 4.10. Modelo funcional Evo 1. (a) Modelado. (b) Pieza fabricada. ..... **04|** 11

Fig. 4.11. Conector ..... **04|** 12

Fig. 4.12. Modelo funcional Evo 1. (a) Modelado. (b) Inserto metálico. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 12

Fig. 4.13. Modelo funcional Evo 2. (a)Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 13

Fig. 4.14. Modelo funcional Evo 3. (a)Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 14

Fig. 4.15. Modelo funcional Evo 4. (a)Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 15

Fig. 4.16. Modelo plano. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 16

Fig. 4.17. Modelo funcional Evo0. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida. ..... **04|** 17

Fig. 4.18. SC7620 Mini Sputter Coater/Glow Discharge System ..... **04|** 18

Fig. 4.19. Modelo funcional en la cámara de descarga ..... **04|** 20

Fig. 4.20. Metalizado. (a) Modelo en cámara de descarga. (b) Resultado para Evo2. ..... **04|** 21

Fig. 4.21. Inspección de la superficie. (a) Antes de metalizar. (b) Después del metalizado. **04|** 22

Fig. 4.22. Vista al microscopio de detalles del metalizado. (a) Aumento x20. (b) Aumento x40 .....**04|** 24

Fig. 4.23. Equipo de metalizado .....**04|** 25

Fig. 4.24. SC7620. Panel de control.....**04|** 26

Fig. 4.25. Manejo del SC7620: encendido del equipo.....**04|** 27

Fig. 4.26. Manejo del SC7620: control del paso de gas.....**04|** 28

Fig. 4.27. Manejo del SC7620: (a) Control VENT. (b) Cámara de pulverización. .....**04|** 28

Fig. 4.28. Manejo del SC7620: colocación del modelo en la cámara de pulverizado. .....**04|** 29

Fig. 4.29. Manejo del SC7620: ubicación de controles de válvulas LEAK y VENT. .....**04|** 29

Fig. 4.30. Manejo del SC7620: ajuste tiempo de operación.....**04|** 29

Fig. 4.31. Manejo del SC7620: generación de vacío.....**04|** 30

Fig. 4.32. Manejo del SC7620: configuración con válvula LEAK abierta..... **04|** 31

Fig. 4.33. Manejo del SC7620: lectura de presión en la cámara al final de la etapa.....**04|** 31

Fig. 4.34. Manejo del SC7620: selección de la corriente de descarga. .....**04|** 32

Fig. 4.35. Manejo del SC7620: inicio del proceso de metalizado.....**04|** 33

Fig. 4.36. Modelo funcional metalizado.....**04|** 34

Fig. 4.37. Pesado del modelo funcional. (a)Antes del metalizado. (b)Después del metalizado. .....**04|** 35

Fig. 4.38. Verificación de conductividad. (a) Alojamiento. (b) fondos. (c) bordes.....**04|** 36

Fig. 4.39. Modelo funcional. (a) Con aislamiento. (b) Con aislamiento + protector.....**04|** 37

Fig. 4.40. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: Menú Scripts.....**04|** 38

Fig. 4.41. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de programación. .....**04|** 39

Fig. 4.42. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: (a) Pantalla principal. (b) Pantalla RUN SCRIPTS.**04|** 41

Fig. 4.43. Preparación y ajuste del sistema de vigilancia. .....**04|** 42

Fig. 4.44. Equipo de micro-elecroconformado en condiciones de servicio. .....**04|** 43

Fig. 4.45. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de gestión de buffers [9]. ..... 04| 44

Fig. 4.46. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: botón para acceso a los buffers..... 04| 45

Fig. 4.47. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de gestión de buffers. ..... 04| 45

Fig. 4.48. Software TestScriptBuilder. Extracto del código de programación..... 04| 46

Fig. 4.49. KEITHLEY 2460 SourceMeter®:(a)Pantalla de gestión de buffers. ..... 04| 47

Fig. 4.50. Inspección visual: (a) Superficie delantera o no funcional. (b) Superficie trasera o funcional. (c) Defecto de falta de deposición. ..... 04| 48

Fig. 4.51. (a) Microscopio de medición (b) Proceso de inspección con útil de alojamiento. 04| 49

Fig. 4.52. Vista del fondo de cavidad semiesférica al microscopio (30x). ..... 04| 49

Fig. 4.53. (a) Microscopio de medición Olympus BX51. (b) Proceso de inspección..... 04| 50

Fig. 4.54. Medición de detalles. (a) Superficie. (b) Fondos. ..... 04| 50

Fig. 4.55. Equipo de medición. ..... 04| 52

Fig. 4.56. (a) Modelado de conector vista superior. (b) Modelado de conector vista inferior. (c) Aguja hipodérmica. ..... 04| 53

Fig. 4.57. (a) Útil de medición. (b) Medición de fondos. ..... 04| 54

Fig. 4.58. Mapa de puntos de medición. (a)Superficie (b)Fondos cavidades semiesféricas. 04| 55

Fig. 4.59. Proceso de medición de espesores. (a)Superficie funcional. (b)Fondos de cavidades ..... 04| 55

Fig. 4.60. Pieza 200727:representación 3D de distribución de espesores en la superficie. 04| 57

Fig. 4.61. Pieza 200727:representación 2D de distribución de espesores en la superficie. 04| 58

Fig. 4.62. Pieza200727: representación de espesores en el fondo de las cavidades..... 04| 58

Fig. 4.63. Pieza 200727 finalizada. ..... 04| 58

Capítulo 5. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL EQUIPO DESARROLLADO

Fig. 5.1. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: lectura de datos en la etapa 1 ..... **05|** 6

Fig. 5.2. Ensayo 1.18 al microscopio. (a) Cavidad 1.1. (b) Cavidad 2.4 ..... **05|** 11

Fig. 5.3. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.1. (b) Ensayo 1.6 ..... **05|** 12

Fig. 5.4. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.9. (b) Ensayo 1.12 ..... **05|** 13

Fig. 5.5. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.18. (b) Ensayo 1.28 ..... **05|** 13

Fig. 5.6. Resultado de la deposición. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2..... **05|** 17

Fig. 5.7. Diferencia de texturas al microscopio x2. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2 ..... **05|** 17

Fig. 5.8. Ensayo 2.2. Burbujeo en zona inferior de la pieza ..... **05|** 18

Fig. 5.9. Pieza sumergida durante el proceso de deposición. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2 ..... **05|** 18

Fig. 5.10. Mapa de espesores 3D. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2 ..... **05|** 19

Fig. 5.11. Distribución superficial de espesores. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2..... **05|** 19

Fig. 5.12. Ensayo 2.2.h. (a) Resultado de la deposición. (b) Desarrollo del ensayo. ..... **05|** 22

Fig. 5.13. Ensayo 2.2.h. (a) Defectos en superficie funcional. (b) textura vista al microscopio. ..... **05|** 22

Fig. 5.14. Ensayo 2.2.h. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores. ..... **05|** 23

Fig. 5.15. Ensayo 2.3 (a) Resultado de la deposición. (b) Desarrollo del ensayo. ..... **05|** 25

Fig. 5.16 Ensayo 2.3. (a) Acabado de la superficie. (b) Textura vista al microscopio..... **05|** 26

Fig. 5.17. Ensayo 2.3. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores. ..... **05|** 27

Fig. 5.18. Ensayo 3.1. Cáscara depositada. (a) Cara frontal. (b) Cara trasera o funcional .. **05|** 31

Fig. 5.19. Ensayo 3.1. Cáscara electro conformada..... **05|** 31

Fig. 5.20. Ensayo 3.1. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores. **05|** 32

Fig. 5.22. Ensayo 4.1. Condiciones del baño durante el experimento. ..... **05|** 32

Fig. 5.23. Ensayo 4.1. Cáscara depositada. (a) Cara frontal. (b) Cara trasera o funcional. . **05|** 34

Fig. 5.24. Ensayo 4.1. Efecto de salto de la barrera de protección. ..... **05|** 36

Fig. 5.25. Ensayo 4.1. Vista de la superficie al microscopio (x2). ..... **05|** 36

Fig. 5.26. Ensayo 4.1. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores. **05|** 37

Fig. 5.27. Ensayo 4.1. Espesores en los fondos de las cavidades. ..... **05|** 37

Fig. 5.28. Plano de portaelectrodos EROWA ER-00922. ..... **05|** 40

Fig. 5.29. Porta electrodos EROWA_ER-009222. (a) Vista de conjunto. (b) Vista inferior... **05|** 40

Fig. 5.30. Molde. (a) Modelado. (b) Pieza fabricada. ..... **05|** 43

Fig. 5.31. Posición del molde diseñado sobre la placa de impresión. ..... **05|** 44

Fig. 5.32. Aplicación práctica del molde. (a) Pieza moldeada. (b) Pieza desmoldeada..... **05|** 45

Fig. 5.33. Cáscara desmoldeada. (a)Cara funcional. (b)Vista del espesor. (c)Cara no funcional. ..... **05|** 45

Fig. 5.34 Cáscara desmoldeada. (a)Cara funcional. (b)Vista del espesor. (c)Cara no funcional. ..... **05|** 45

Fig. 5.35. Despiece del soporte para el electrodo funcional. ..... **05|** 46

Fig. 5.36. Modelado del soporte para el electrodo funcional. ..... **05|** 48

Fig. 5.37. Centro de mecanizado Ibarmia ZVM-1000. ..... **05|** 49

Fig. 5.38. Herramienta para el texturizado de superficies estructuradas finalizada. ..... **05|** 50

Fig. 5.39. Máquina de electroerosión por penetración ONA NX3. ..... **05|** 52

Fig. 5.40. (a) Electrodo y probeta. (b) Cáscara, porta cáscara y porta electrodo. ..... **05|** 53

Fig. 5.41. Proceso de inspección de cáscara con microscopio Nikon SMZ800. ..... **05|** 55

Fig. 5.42. Semiesfera teórica de erosión ..... **05|** 55

Fig. 5.43. Semiesfera 1.1. (a) Antes de erosión. (b) Resultado tras la primera erosión..... **05|** 56

Fig. 5.44. Semiesfera 1 de la cáscara funcional. (a) Ensayo 1. (b) Ensayo 2..... **05|** 57

Fig. 5.45. Resultado de la electroerosión. (a) VD1 0. (b) VDI 27. (c) VDI 40.....**05|** 57

Fig. 5.46. Báscula de precisión Ohaus Pioneer.....**05|** 58

Fig. 5.47. Comparativa de la masa de desgaste .....**05|** 60

Fig. 5.48. Comparación geométrica. (a) VDI 0 (b) VDI 27.....**05|** 61

Fig. 5.49. Textura piramidal. (a) Antes de la erosión. (b) Resultado tras el ensayo 1.....**05|** 63

Fig. 5.50. Textura piramidal. Resultado tras el ensayo 2. .....**05|** 64

Fig. 5.51. Resultado de la electroerosión. (a) VD1 0. (b) VDI 27. .....**05|** 64

Fig. 5.52. Pirámide teórica de erosión.....**05|** 65

LISTA DE TABLAS

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESARROLADO.

Tabla 3-1. Listado de componentes del equipo de micro-electroconformado. ..... **03|** 5

Tabla 3-2. Lecturas durante el proceso de corrección del sensor de intensidad del DCAB. **03|** 24

Tabla 3-3. Características de la bomba conexión directa. ..... **03|** 48

Tabla 3-4. Características de la bomba conexión inversa. ..... **03|** 49

Tabla 3-5 Lecturas resultado del proceso de aforado del tanque ..... **03|** 63

Capítulo 4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

Tabla 4-1. Pieza 200727. Espesores en puntos de la superficie. ..... **04|** 57

Tabla 4-2. Pieza 200727. Espesores en el fondo de las cavidades semiesféricas. ..... **04|** 57

Capítulo 5. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL EQUIPO DESARROLLADO

Tabla 5-1. Ejemplo de ciclo de trabajo. ..... **05|** 5

Tabla 5-2. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (a) ..... **05|** 6

Tabla 5-3. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (b) ..... **05|** 7

Tabla 5-4. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (c) ..... **05|** 8

Tabla 5-5. Resultados obtenidos ensayos tipo 1 ..... **05|** 9

Tabla 5-6. Ensayo 1.18. Espesores en los fondos de las cavidades. ..... **05|** 11

Tabla 5-7. Condiciones operativas para los ensayos tipo 2 ..... **05|** 15

Tabla 5-8. Resultados obtenidos en los ensayos tipo 2. ..... **05|** 16

Tabla 5-9. Condiciones operativas para el ensayo 2.2 h ..... **05|** 20

Tabla 5-10. Resultados obtenidos ensayo 2.2.h ..... **05|** 21

Tabla 5-11. Condiciones operativas para el ensayo 2.3 ..... **05|** 24

Tabla 5-12. Resultados obtenidos ensayo 2.3.....**05|** 25

Tabla 5-13. Condiciones operativas para el ensayo tipo 3.....**05|** 29

Tabla 5-14. Resultados obtenidos en ensayo tipo 3 .....**05|** 30

Tabla 5-15. Condiciones operativas para el ensayo tipo 4.....**05|** 34

Tabla 5-16. Resultados obtenidos en ensayo tipo 4 .....**05|** 35

Tabla 5-17. Parámetros EDM para aluminio mediante electrodo de cobre. ..... **05|** 54

Tabla 5-18. Valores medios de masa (cobre Vs aluminio). .....**05|** 58

Tabla 5-19. Parámetros teóricos de la geometría de erosión.....**05|** 60

Tabla 5-20. Comparativa de masas de desgaste. .....**05|** 60

Tabla 5-21. Parámetros EDM para aluminio con electrodo de grafito. .....**05|** 63

Tabla 5-22. Valores medios de masa (grafito Vs aluminio).....**05|** 65

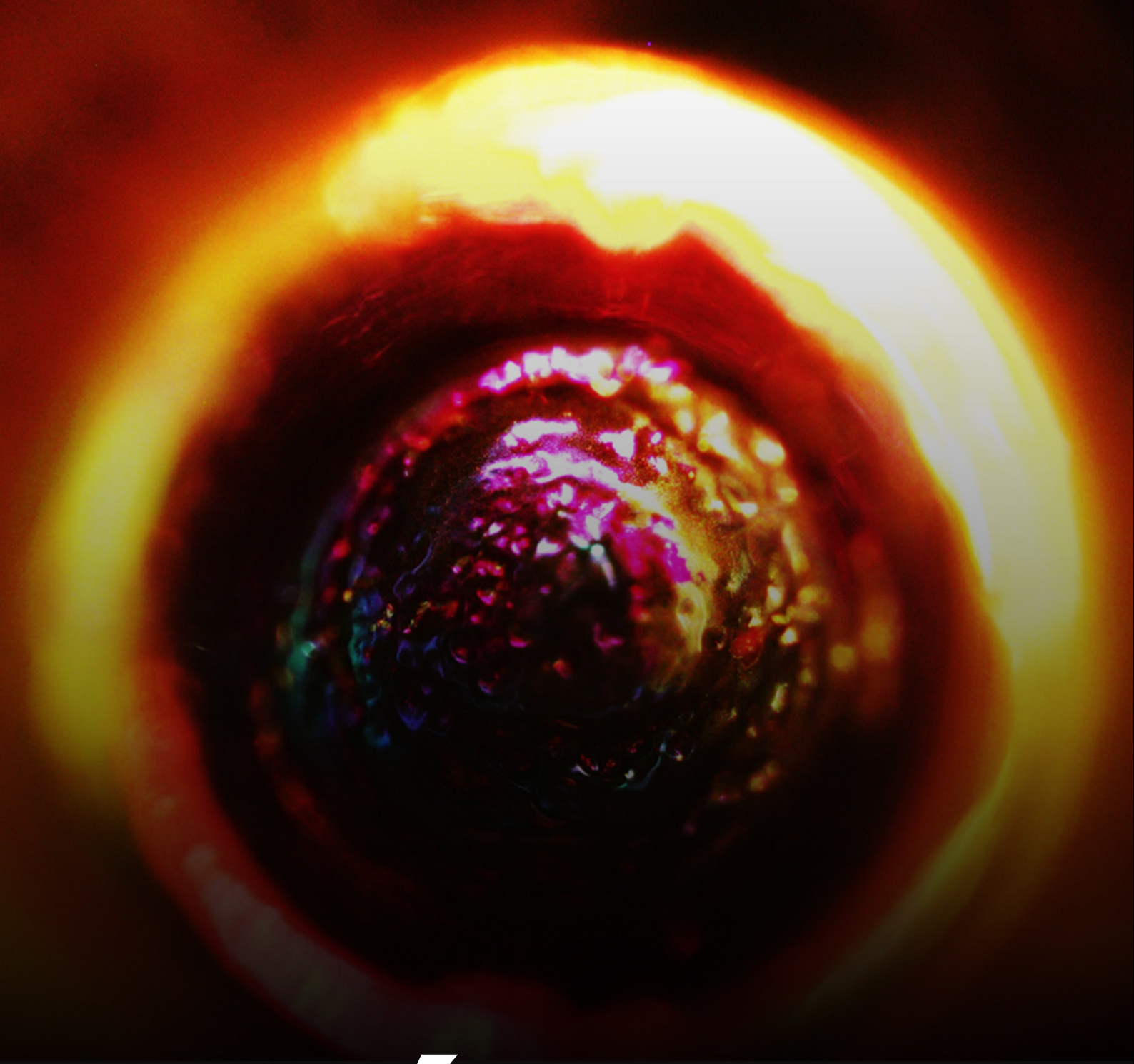
Tabla 5-23. Comparativa de masas de desgaste. .....**05|** 66

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

Å	Unidad de medida: Angstroms
Ag	Símbolo químico: plata
Al	Símbolo químico: aluminio
B_2	Compuesto químico: boruro
CPS	Unidad de medida: Centipoise
Cu	Elemento químico: cobre
Cu-P	Compuesto químico: Ferroníquel (aleación de cobre y fósforo)
DC	Corriente continua
DC	Corriente continua
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly
DLP	Digital Light Procesing
DMD	Digital Micromirror Device
EDM	Electro discharge Manufacturing
EDT	Electrical Discharge Turning
ELP	Electro-less plating
et al.	Abreviatura en Ingles que significa "y otros"
F	Constante de Faraday
FDM	Fused deposition modeling
Fe_2O_3	Compuesto químico: óxido de hierro (III)
FFF	Fused filament fabrication
g	Unidad de medida: gramos
GaN	Compuesto químico: nitruro de galio
Gap	Expresión que se refiere al espacio entre electrodo y pieza de trabajo en proceso EDM
h	Unidad de medida: horas
i	Símbolo de la densidad de corriente eléctrica
IBSD	Ion Beam Sputter Deposition
IGTS	Insulated Gate Bipolar Transistor
Jet-ECM	Jet Electrochemical machinning
KB	Unidad de mediada: Kilobyte
Kg	Unidad de medida: kilogramos
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
LCD	Liquid Crystal Display
LST	Laser surface texturing

mA	Unidad de medida: miliamperios
mA	Unidad de medida: miliamperios
mbar	Unidad de medida: milibar
MEMS	Micro-electromechanical systems
min	Unidad de medida: minutos
ml	Unidad de medida: mililitros
mm	Unidad de medida: milímetros
Mosfet	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
Ni	Símbolo químico: níquel
Ni-Fe	Compuesto químico: Ferroníquel (aleación de hierro)
nm	Unidad de medida: nanómetros
Ø	Símbolo de diámetro
ºC	Unidad de medida: grados centígrados
P	Elemento químico: fósforo
PAE	Photo-assisted electroforming
PCB	Printed Circuit Board
pH	Unidad de medida: índice de acidez o alcalinidad de una solución
PLA	Polylactic acid
PM	Abreviatura de Peso Molecular
PSD	Plasma Sputter Deposition
Pt	Símbolo químico: platino
R_a	Rugosidad media aritmética
RS	Tipo de memoria para computadoras: resistive-switching
SEDM	Sinker electro discharge machining
Si	Símbolo químico: silicio
SiO_2	Compuesto químico: óxido de silicio
SLA	Stereo Lithography Apparatus
SMC	Servicio de Metrología y Calibración
Sn	Símbolo químico: estaño
Ti	Símbolo químico: titanio
TiO_2	Compuesto químico: óxido de titanio
TOFF	Tiempo de apagado en proceso de electroconformado por corriente pulsada
TON	Tiempo de encendido en proceso de electroconformado por corriente pulsada
UCA	Universidad de Cádiz

ULPGC	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
UV	Ultravioleta
V	Unidad de medida: voltios
VAT	Término en inglés que significa tanque o cubeta.
VDC	Voltaje en corriente continua
VDI	Rugosidad: aspereza producida por la chispa en el proceso EDM
W	Símbolo químico: wolframio
WB_2	Compuesto químico: boruro de wolframio o boruro de tungsteno
WC-Co	Compuesto químico: carburo de wolframio o carburo de tungsteno
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining
WO_3	Compuesto químico: óxido de wolframio (IV)
Z	el número de valencia de la sustancia o ion de una solución electrolítica
ZnO	Compuesto químico: óxido de cinc
λuv	Longitud de onda de luz ultravioleta
µm	Unidad de medida: micras
µJ	Unidad de medida: micro julios.
µs	Unidad de medida: microsegundos
3D	Se refiere a la fabricación con movimiento en los tres ejes del espacio



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN.

El grupo de Investigación de Fabricación Integrada y Avanzada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) se encuentra inmersa en un proyecto de investigación coordinado con el grupo de Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la Universidad de Cádiz (UCA) bajo la denominación de "Mejora del Rendimiento Funcional de Superficies mediante la Texturización a Diferentes Escalas" (DPI2017-84935-R).

La texturización funcional consiste en la modificación de la superficie de las piezas aplicando geometrías con un determinado patrón, ya sea bajo relieve o sobre relieve, con el objetivo de mejorar sus propiedades. Se pretende modificar, entre otros, su comportamiento óptico (reflexión, difracción y absorción), su comportamiento tribológico (lubricación, rozamiento y desgaste), o su energía superficial (capilaridad, adhesión e hidrofobia).

A través de este proyecto de investigación, el equipo de la UCA pretende conseguir la mejora de las propiedades superficiales, generando esas características geométricas directamente en el material de las piezas. Para conseguir detalles con un nivel dimensional a escala microscópica, se utilizarán técnicas de mecanizado no convencionales como son la electroerosión por penetración (EDM; Electrical Discharge Machining), el electroconformado o las técnicas láser.

De entre los procesos mencionados, el proceso EDM requiere de una herramienta denominada electrodo, para poder generar dichas estructuras o texturas sobre las superficies de las piezas de trabajo.

Por su parte, el grupo de Investigación de Fabricación Integrada y Avanzada de la ULPGC, asume la tarea de diseño y desarrollo de un tipo concreto de herramienta para el procedimiento EDM. Teniendo en cuenta el nivel de escala de los detalles pretendidos, se ha seleccionado el proceso de conformación mediante electroconformado, para la fabricación de una cáscara de cobre que, montada sobre un útil permita ejercer la función de herramienta o electrodo.

El Electroconformado es un proceso electroquímico que permite la conformación de piezas funcionales o recubrimientos por electrodeposición de un metal sobre un modelo o molde. En el primero de los casos la deposición del metal genera una cáscara que conforma una pieza en sí misma. Los espesores de capa dependen de los parámetros del proceso, obteniéndose alta calidad en la reproducción de detalles para dimensiones que van desde 25 µm hasta 2,5mm.

Posee grandes ventajas en el ámbito de la micro fabricación, por su capacidad para conseguir piezas de geometrías complejas, con reproducción exacta de dimensiones y detalles. Los principales problemas del uso de este proceso de fabricación son la lentitud, la limitación de espesor, la imposibilidad de realizar la deposición sobre modelos no conductores de la electricidad y la necesidad de generar previamente esos modelos, en base a altas prestaciones dimensionales y de forma.

La innovación tecnológica en los procesos de fabricación aditiva ha generado en los últimos años una mejora importante de su control y su accesibilidad desde el punto de vista económico y funcional. Esto permite disponer de su capacidad para cubrir la manufactura de modelos con una excelente reproducción de detalles y un control dimensional estrecho a un menor coste.

La presente Tesis Doctoral surge para abordar esta fase del proyecto de investigación antes mencionado. Pretende servir de soporte, a través del diseño de un equipo de trabajo adecuado

y la definición de sus parámetros de funcionamiento, para aprovechar la combinación de estas dos tecnologías de fabricación. De esta manera, se pretende que se puedan conseguir piezas (cáscaras) con espesores de capa funcionales y detalles a escala micrométrica en condiciones de repetitividad.

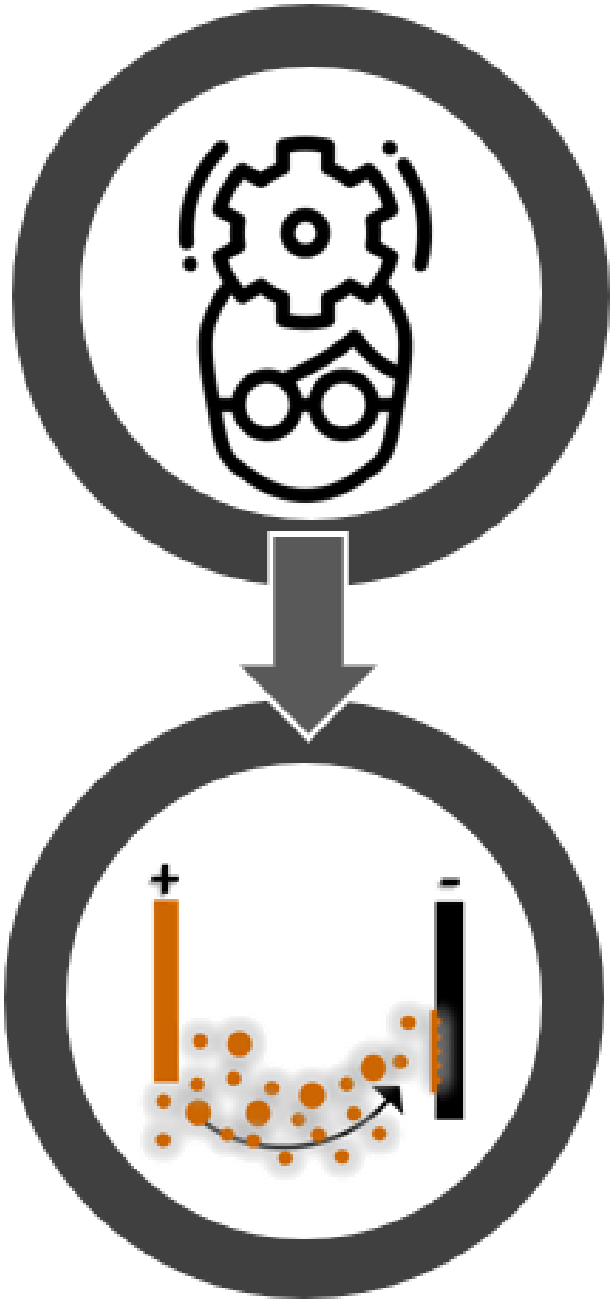
Se continúa así con el camino iniciado, hace más de una década, por el grupo de investigación de Fabricación Integrada y Avanzada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, en el campo del electroconformado.

1.2. OBJETIVOS.

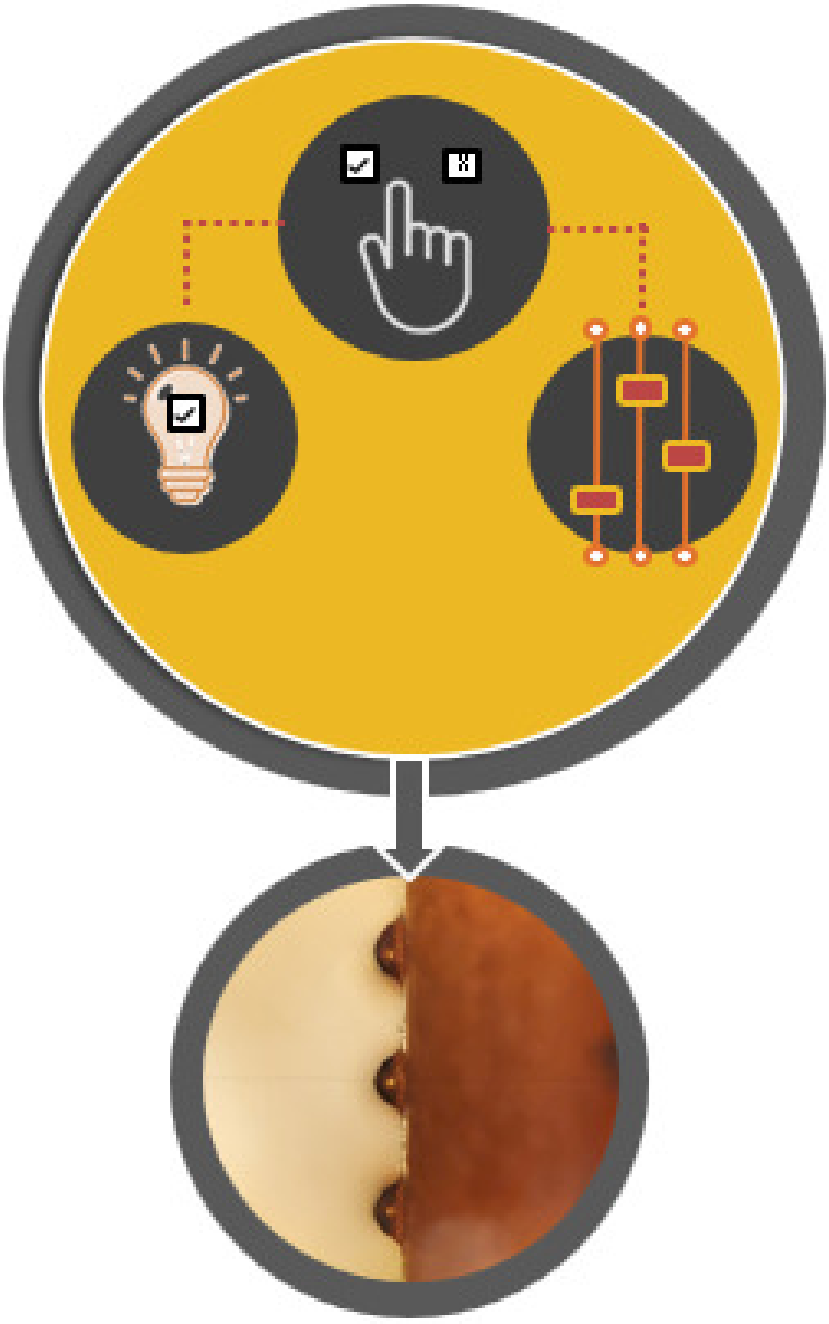
Una vez establecidas las líneas de actuación, el plan de trabajo planteado propone la consecución de los siguientes objetivos:

- Análisis de la compatibilidad entre las tecnologías de fabricación aditiva y electroconformado. Desarrollo de un protocolo de trabajo que permita combinar ambos procesos para la obtención de geometrías micro electroconformadas.

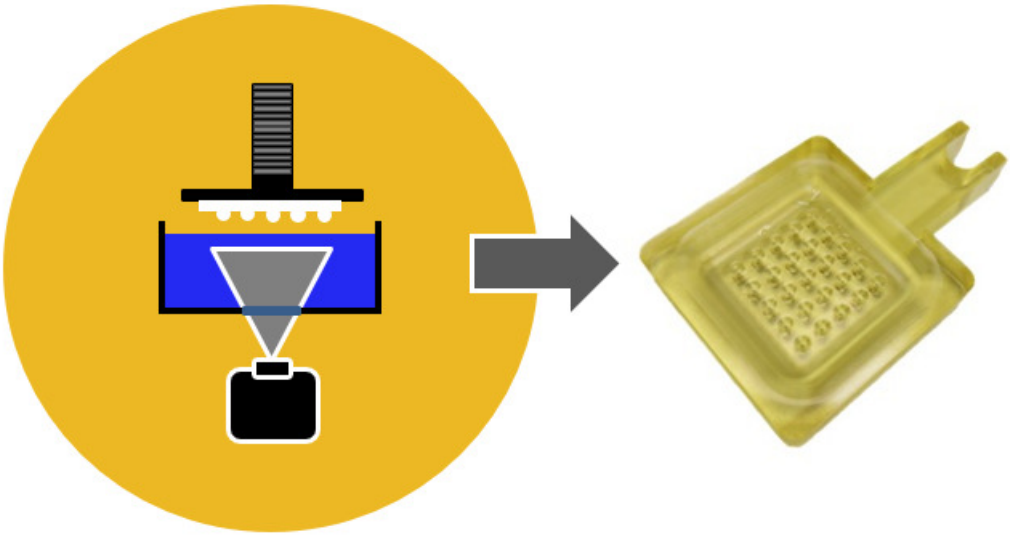
- Desarrollo de un equipo de trabajo para la obtención de dichas piezas. Será necesaria la evaluación del equipamiento disponible, la definición de los componentes esenciales, el diseño y desarrollo del sistema de sujeción de las probetas y de otros elementos que pudieran ser necesarios.



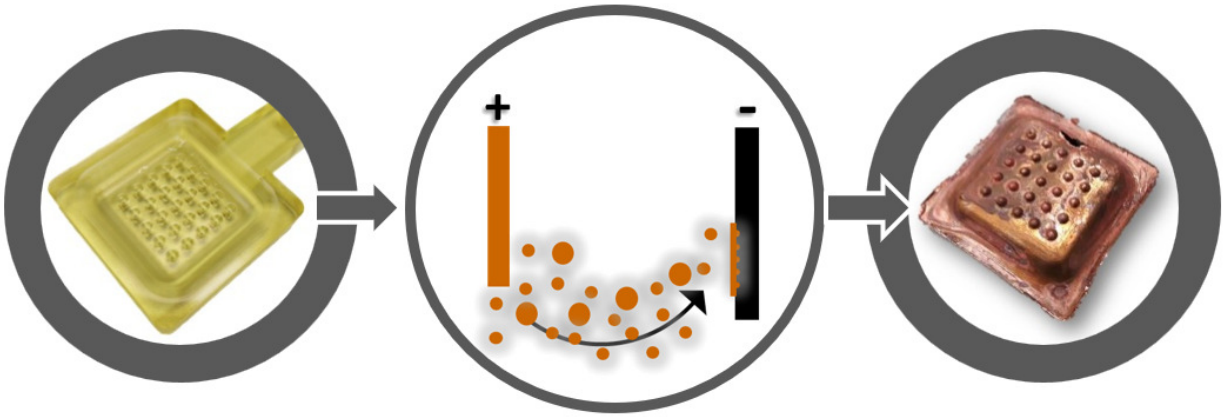
- Aplicación experimental del equipo desarrollado. Realizar ensayos preliminares y llevar a cabo el diseño de experimentos que, en condiciones de repetitividad, consigan piezas funcionales. Estas piezas contendrán geometrías de aplicación específica al texturizado de superficies.



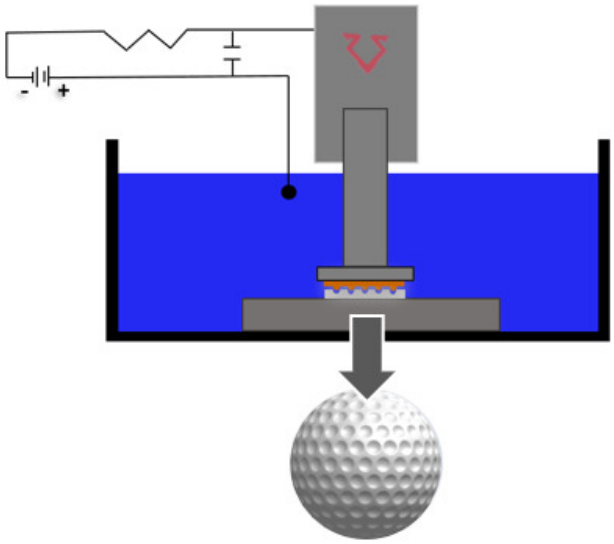
- Conformación y optimización de modelos funcionales mediante proceso de fabricación aditiva.



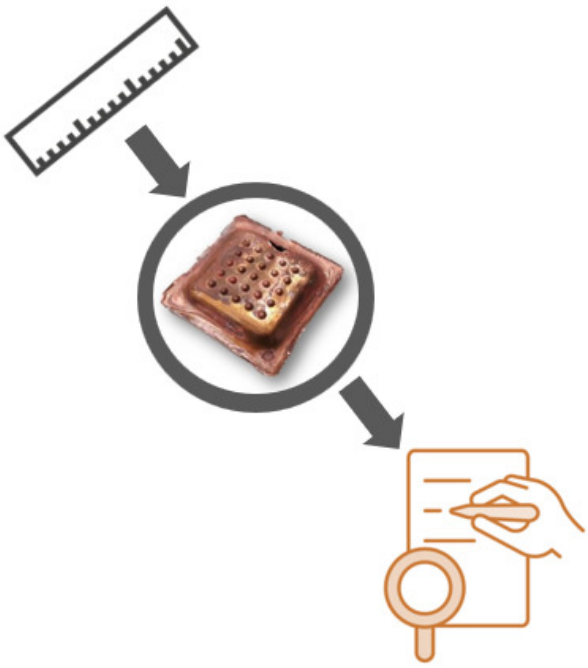
- Conformación de piezas funcionales, a partir de estos modelos, mediante el uso del equipo de electroconformado.



- Fabricación de un prototipo de herramienta para su uso en un proceso de electroerosión, con aplicación directa al texturizado de superficies estructuradas.



- Establecer un proceso de medición de las piezas obtenidas para validar los resultados, principalmente en lo que se refiere a los espesores de capa conseguidos. Caracterizarlo desde el punto de vista Metrológico.



1.3. CONTENIDO Y ESTRUCTURA DE ESTE TRABAJO.

El documento está compuesto de seis capítulos, dos anexos y un apartado de planos, desarrollándose según la siguiente descripción:

- El primer capítulo es el presente donde se introduce la temática de la tesis y los objetivos que se pretenden alcanzar durante su desarrollo.
- El segundo capítulo contiene una exposición de las tecnologías directamente relacionadas con la temática de la tesis. Se llevará a cabo una revisión de los estudios y trabajos existentes, cuyas aportaciones deban tenerse en cuenta durante el desarrollo de este trabajo.
- El tercer capítulo lleva a cabo una descripción del equipo desarrollado como objetivo principal de esta tesis, con una exposición detallada de todos sus componentes, haciendo énfasis en aquellos que han necesitado de un diseño propio.
- El cuarto capítulo hace referencia a la aplicación práctica del equipo desarrollado. Se exponen las técnicas que han sido necesario implementar para la consecución de las piezas funcionales. Se lleva a cabo una descripción del procedimiento de fabricación combinado que se ha generado, del funcionamiento y manejo de los diferentes instrumentos, así como de las posibilidades y modos de maniobra que el equipo permite.
- El capítulo quinto contiene resultados y discusiones de la aplicación práctica del equipo desarrollado. Se hará una exposición de los diferentes ensayos realizados para evaluar y validar sus posibilidades y capacidades.
- El sexto capítulo contiene las conclusiones más relevantes que se han podido extraer durante el transcurso de la tesis, con la propuesta de posibles líneas de trabajo futuro en aprovechamiento de las capacidades que ofrece el equipo.

- El Anexo I contiene datos, gráficos e imágenes resultado de la fase de aplicación experimental del equipo de micro-electroconformado, en extracto de un número determinado de experimentos que resultaron más relevantes.
- El Anexo II incluye los códigos fuente de los programas que se han generado para el control de algunos de los dispositivos que forman parte del equipo.
- El Apartado de planos contiene los planos pertenecientes al diseño y desarrollo de la herramienta para el texturizado de piezas electroconformadas.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Capítulo 2. Antecedentes.

2.1. PREFACIO.

En la línea de trabajo desarrollada en esta Tesis Doctoral se relacionan diferentes tecnologías de fabricación y conceptos tecnológicos. Los términos: tribología, superficies estructuradas, superficie funcional, micro fabricación, fabricación aditiva, modelo funcional, electroerosión, sputtering y electroconformado, necesitan de un hilo de conexión para dar sentido a la labor realizada.

En este capítulo se intentará, a través de un desarrollo descriptivo breve, realizar el tejido de todos estos conceptos de manera que generen un antecedente sólido para el resto del trabajo.

2.1.1. TRIBOLOGÍA Y SUPERFICIES ESTRUCTURADAS.

La tribología es la ciencia que se encarga del estudio de la interacción de superficies que están en contacto en presencia de movimiento [1]. Esta interacción genera cambios en la estructura de las superficies debido al rozamiento, lo que determina la aparición del fenómeno de desgaste. El estudio del comportamiento tribológico implica el conocimiento de la naturaleza física y química de la estructura superficial de los materiales, de las fuerzas que intervienen, de la energía que se transforma y de cómo mejorar esa interacción a través de la lubricación. Su estudio y análisis es, por tanto, de vital importancia en la mejora de todo tipo de máquinas, sistemas mecánicos y mecanismos, en orden a mejorar su funcionamiento y alargar su vida útil.

El mapa topográfico de las superficies tiene una enorme relevancia en las propiedades tribológicas de los materiales. Se ha demostrado experimentalmente que la texturización de las superficies en contacto disminuye la fricción y mejora el rendimiento tribológico de

componentes mecánicos, reduciendo las temperaturas en servicio e incrementando la vida útil de los componentes. Hamilton, Walowit y Allen ya propusieron en 1966, reducir la fricción de un sello mecánico aplicando un patrón de texturas a la superficie [2]. Desde entonces han sido muchos los esfuerzos de la comunidad científica por investigar y evolucionar en este campo [3].

La aplicación de texturas busca modificar la topografía de la superficie de un material para mejorar sus propiedades [4]. Esta modificación se puede realizar en base a geometrías de alto o bajo relieve o combinación de ambas. Las formas bajo relieve generalmente requieren procesos descendentes basados en la eliminación de material de la superficie. Corte, fresado, desbaste, grabado o mecanizado láser, son algunos de los procesos más habitualmente utilizados para realizar esta tarea. Las formas sobre relieve utilizan procesos ascendentes basados en la adición del material en la superficie. En este caso, la oxidación anódica de aluminio, el autoensamblaje de partículas, la copolimerización por bloques o la electrodeposición son procesos notables.

En la medida en que esta modificación se hace con una estructura o un patrón definido, se consiguen superficies estructuradas, que se adaptan a las necesidades de las mejoras que se pretenden conseguir. Es por tanto una texturización [5].

Si bien la mayoría de los esfuerzos de la comunidad científica se han centrado en la mejora de las propiedades tribológicas de las superficies, también hay aplicaciones de mejora en otros campos. Por ejemplo, modificando los niveles de rugosidad superficial, se pueden obtener superficies super hidrofóbicas [6], que resultan muy interesantes para aplicaciones de autolimpieza y mejora de la resistencia aerodinámica. La mejora de la estética, la adhesión, la disipación de calor, el rendimiento de la energía superficial o la mejora de los comportamientos hidrodinámicos u ópticos de las superficies son más ejemplos de aplicaciones del texturizado funcional [7]. Actualmente muchas de estas propiedades se alcanzan en etapas

complementarias en el acabado de los productos, y en muchos casos con la aportación de capas adicionales de otros materiales diferentes al del componente base. Sin embargo, ni el diseño de las texturas ni el proceso para obtenerlas están estandarizados.

La observación de la naturaleza se ha utilizado desde siempre por el ser humano como modelo de mejora, por lo que no podía obviarse en la búsqueda de grandes soluciones funcionales para las superficies. Una hoja de loto (hidrofobia), la pata de una lagartija (adhesión), el ojo de una polilla (reflexión) son algunos ejemplos de magníficos diseños de texturizado creados por la Madre Naturaleza [8].

Los procesos convencionales de mecanizado se han utilizado tradicionalmente para el tratamiento de las superficies. Al principio, la perforación, el fresado y el torneado eran los más utilizados. La llegada de los sistemas de control numérico y la incorporación de la vibración por ultrasonidos aumentaron la exactitud y precisión de estos procesos.

El mecanizado químico también fue inicialmente un gran exponente de este tipo de trabajo. La disolución química controlada del material de una pieza mecanizada por contacto con un fuerte reactivo [9], ya se utilizó en la década de 1950 para eliminar material de una superficie [10]. Hoy en día, procesos como el mecanizado electroquímico a reacción (Jet-ECM) son exponentes de flexibilidad, exactitud y precisión [11].

Los avances tecnológicos han permitido llevar a escala micrométrica la posibilidad de generar patrones funcionales, para obtener superficies microestructuradas o microtexturizadas, siendo de especial interés para el desarrollo de trabajo, los patrones realizados a base de micro cavidades [12]. A esta escala, toman protagonismo los procesos de conformación no

convencionales. Estos, han ocupado un espacio donde los procesos convencionales, a pesar de los intentos por adaptarlos, han encontrado una barrera tecnológica.

Al igual que ocurre a escala milimétrica, los procesos de micro fabricación se pueden clasificar en función de la manera en que se realizan. Así, se pueden diferenciar: procesos de arranque de material, procesos aditivos, procesos de formación o deformación volumétrica, procesos de unión y ensamble y procesos híbridos [13].

Desde el punto de vista de la texturización de superficies, los procesos de substracción y los procesos híbridos son los que se utilizan de forma más relevante. Cobran especial importancia los procesos de eliminación de material por mecanizado eléctrico y químico.

Especial notoriedad han adquirido el mecanizado por descarga eléctrica (EDM) [14] y las técnicas láser [15]. Se han desarrollado aplicaciones específicas de estas técnicas para el micro texturizado de superficies, como el torneado por descarga eléctrica (EDT) [16] o la texturización láser (LST) [17].

A pesar de los numerosos estudios encaminados a reducir el desgaste, el texturizado funcional de superficies sigue siendo poco estudiado para otras aplicaciones.

Para estas otras aplicaciones se utilizan diferentes geometrías, ya sea en forma de ranura, de hoyuelo o de canal. Es bien conocido, por ejemplo, el uso de hoyuelos en la superficie de las pelotas de golf. Su aplicación modifica la aerodinámica de la superficie, consiguiendo alcanzar mayores distancias y mejorando el control de su desplazamiento aéreo. Algunos tipos de geometrías de hoyuelos utilizadas por los autores son: la circular [18], la elíptica [19], la cuadrada [20], en forma de triángulo [21], rectilínea o en forma de diamante [22].

La conformación de estas geometrías depende de las capacidades del proceso de fabricación. Por ejemplo, los procesos de mecanizado convencionales no pueden generar semi esferas bajo relieve sin alterar la superficie. El proceso de mecanizado de electroerosión por penetración (SEDM) puede llegar a generar algunas de ellas incluso a escala micrométrica. Igualmente, se muestran incapaces de crear esa misma geometría sobre relieve en la superficie de un material. Para esto último sería necesario recurrir a un proceso de electroconformado.

De cara al interés del trabajo desarrollado en esta tesis, aún son escasos los estudios que relacionan los parámetros de estos procesos con la obtención de determinadas propiedades superficiales.

2.1.2. MICRO FABRICACIÓN.

La micro fabricación puede ser entendida desde el contexto fábrica, como un sistema de fabricación en miniatura, es decir que todo el equipo y las instalaciones necesarias para realizar el proceso se reducen a microescala. El objetivo es reducir principalmente los costes, disminuyendo el consumo de energía y de materia prima.

Desde el concepto puro de fabricación de componentes, la micro fabricación debe entenderse como la producción de piezas a pequeña escala.

Sin bien la comunidad científica parece estar de acuerdo en los campos de aplicación, con destacada incidencia en la microelectrónica, implantes e instrumental médico y componentes microscópicos para sistemas mecánicos, no parece haber tanto consenso a la hora de expresar sus límites dimensionales.

Algunos autores indican que, para ser considerado una micro parte, el producto final debe tener un tamaño inferior a 10 milímetros, con tolerancias dentro del rango de 0,1 a 10 micras

[23]. Otros autores plantean que son piezas que disponen de al menos dos de sus dimensiones por debajo del rango milimétrico [13], y otros establecen el límite en 100 micras para las dimensiones características de las piezas [24].

De forma general se puede expresar que la micro fabricación se refiere a la conformación de piezas o formas a pequeña escala, cuyas dimensiones, en el límite superior, se encuentran en el rango milimétrico y que presentan detalles o tolerancias con dimensiones a escala micrométrica.

2.1.3. FABRICACIÓN ADITIVA.

La fabricación aditiva es el término general para aquellas tecnologías que, basadas en una representación geométrica, crean objetos físicos en tres dimensiones mediante la adición sucesiva de material [25]. En los últimos años, la innovación tecnológica de los procesos de fabricación aditiva capa a capa para materiales poliméricos, la variedad de materiales generados y la evolución de sus prestaciones, los han posicionado como una alternativa muy competitiva, alejándolos de sus inicios en aplicaciones centradas básicamente en el prototipado rápido.

La posibilidad de conseguir piezas a pequeña escala, con una capacidad de reproducción de geometría y detalles inalcanzables para los procesos de mecanizado convencionales, los colocan como tecnologías de alto rendimiento ante los procesos de micro fabricación.

Una de las técnicas de fabricación aditivas más antiguas es la fotopolimerización en tanque (VAT photopolymerisation). Este es un proceso en el cual un fotopolímero líquido, que se encuentra en un tanque (VAT), es curado de forma selectiva por la acción de la luz [26]. Para que este curado sea selectivo y se genere la geometría de diseño, puede utilizarse un sistema con luz ultravioleta (UV) generada por un rayo láser, que recorre el área que debe ser curada.

Otra posibilidad es aplicar una fuente de luz UV a través de una máscara que contiene la geometría, repitiéndose el procedimiento para cada una de las capas que componen la pieza final.

La fuente de luz ultravioleta, por tanto, distingue las dos variantes principales de este proceso: estereolitografía (SLA) y procesado por luz digital (DLP). En el caso de la tecnología DLP puede optarse por diferentes formas de proyectar la luz: utilizar un dispositivo de micro espejos digitales (DMD) a modo de proyector. Este elemento refleja y enfoca la luz ultravioleta (UV) en las superficies de los materiales foto reactivos que se polimerizan capa por capa [27], o bien utilizar un emisor a partir de una pantalla de cristal líquido (LCD) [28]. La figura 2.1 muestra una ilustración esquemática de este proceso.

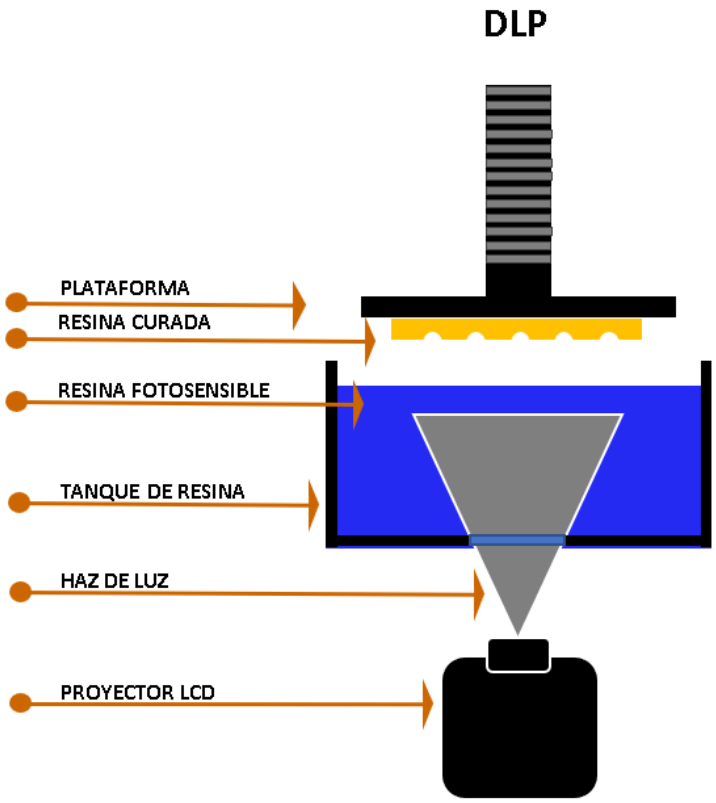


Fig. 2.1. Representación del proceso de fotopolimerización en tanque SLA / DLP.

La fabricación aditiva permite afrontar el diseño de geometrías hasta ahora inalcanzables para otros procesos de fabricación. Libera al diseñador y permite abordar la metodología de diseño para la fabricación y el montaje (DFMA) de una manera diferente.

Está metodología, utilizada durante el proceso de desarrollo y/o mejora de un producto, tiene como objetivo principal reducir los costes de fabricación y de montaje, desde el cumplimiento de todas las necesidades funcionales del producto. En definitiva, plantea prever e incorporar la forma en que se va a fabricar el producto desde la fase de diseño. Su relevancia es tal que su uso se ha extendido a actividades como la industria aeronáutica [29] o las construcciones prefabricadas [30].

Se relacionan especialmente con el desarrollo de esta tesis, autores que han utilizado la fabricación aditiva para la conformación directa de electrodos para EDM [31,32,33,34].

La fabricación aditiva tiene como gran ventaja que aquello que se modela es aquello que se fabrica, sin embargo, esa es también su principal desventaja, ya que en muchas ocasiones se sobreestiman las capacidades de las piezas diseñadas. Se necesita, por tanto, de un buen dominio de la tecnología para entender y conocer sus limitaciones.

2.1.4. ELECTROEROSIÓN (EDM).

El proceso de electroerosión EDM (Electrical Discharge Machining) se fundamenta en el mecanizado de una pieza de trabajo por el efecto de una descarga eléctrica, que se produce entre la herramienta y la pieza de trabajo, a través de un fluido dieléctrico [35]. Las descargas son de alto voltaje y crean suficiente energía térmica como para causar la erosión y eliminación de material de la pieza de trabajo. La herramienta y la pieza de trabajo no están en contacto físico, por lo que no se genera estrés y se evita su deformación. Las separa un fluido dieléctrico

cuya vaporización es el causante del proceso de erosión del material. Esto permite el uso de pequeñas herramientas adecuadas para micro mecanizado [36]. La figura 2.2 muestra una ilustración esquemática de este proceso.

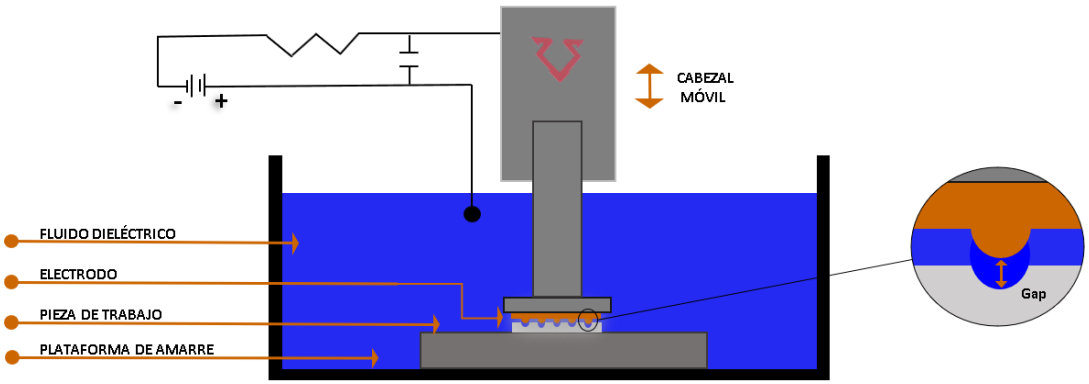
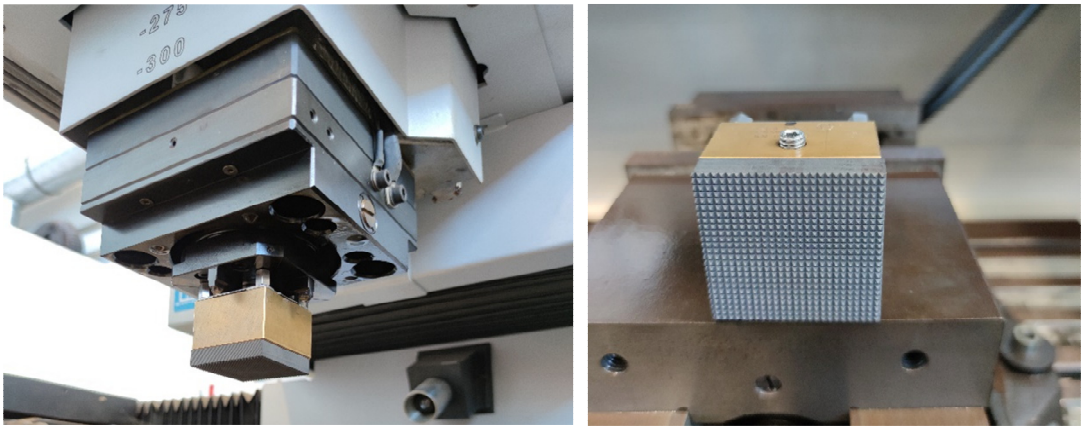


Fig. 2.2. Ilustración esquemática del proceso EDM

La aplicación de una diferencia de potencial de forma pulsada, entre el electrodo y la pieza, genera una serie de chispas eléctricas discretas, que en el pequeño espacio que los separa (típicamente valores de 10µm a 50µm), eleva la temperatura hasta tal punto que provoca la eliminación del material por fusión y vaporización. El producto de esa fusión es un residuo que en ocasiones se vuelve a solidificar generando cráteres de descarga [37], que son muy habituales en este proceso. La herramienta, denominada electrodo, contiene la geometría que se pretende reproducir, siendo por tanto una preforma del resultado deseado.

El proceso completa geometrías complejas con alta exactitud dimensional y superficies de baja rugosidad. No afecta mecánicamente a la superficie de la pieza de trabajo y se puede utilizar tanto para superficies grandes como pequeñas. La figura 2.3 muestra imágenes de un electrodo para EDM.



(a) (b)

Fig. 2.3. Electrodo EDM. (a) Ubicación en condiciones de servicio. (b) Detalle de la geometría funcional.
(imágenes cedidas por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

B.R. Lazarenko y N.I. Lazarenko de la Universidad de Moscú, fueron los primeros en desarrollar un proceso controlado para el mecanizado de materiales mediante descarga eléctrica [38, 39]. A partir de ellos, se generó un creciente interés en las nuevas aplicaciones del proceso, con especial énfasis en su capacidad para modificar superficies [40].

En las últimas décadas, su aplicación ha sido explorada, específicamente, para reducir el desgaste. Dong y otros utilizaron un sistema micro EDM con una micro herramienta cilíndrica para generar un inserto micro texturizado, logrando disminuir la fuerza de corte en el mecanizado por torneado.

Koshy y Tovey utilizaron EDM para texturizar una herramienta de corte para acabados. Compararon una textura lineal con ranuras de 100µm de profundidad con una textura de área en la superficie de la herramienta. Establecieron que tales texturas son eficaces para reducir la fricción, debido a una reducción significativa de la fuerza de mecanizado. El resultado fue mejor

para la textura de área, sin embargo, propusieron desarrollar una textura híbrida que integrara ambas tipologías para mejorar aún más el rendimiento del lubricante [41].

Una de las principales ventajas del proceso EDM con respecto a cualquier otro proceso de arranque de material de tipo convencional, es que la dureza del material de la pieza de trabajo no es importante para el desarrollo del proceso [42], debido a que, como ya se ha expuesto, herramienta y pieza no entran físicamente en contacto.

El proceso EDM presenta principalmente dos variantes de conformado: el proceso de electroerosión por hilo y el proceso de electroerosión por penetración. El proceso de electroerosión por hilo WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) es una variante que utiliza un hilo metálico para realizar cortes o geometrías vaciadas.

El proceso de electroerosión por penetración utiliza un electrodo de material conductor, normalmente cobre o grafito, que tiene la forma que se pretende reproducir. El electrodo se podría asimilar a una herramienta, por establecer una similitud con un proceso convencional de arranque de material. Al igual que sucede con una herramienta, el electrodo también sufre un desgaste, aunque no relacionado, como ya se ha indicado, con la dureza del material de la pieza de trabajo. Se podría indicar de forma simple que el proceso EDM por penetración es un proceso de copiado.

Los parámetros que gobiernan el proceso EDM son principalmente: la diferencia de potencial, la corriente de descarga (o corriente de pulso), el tiempo de pulso y el factor de trabajo. El control de estos parámetros es de especial importancia para obtener buenos resultados. Tanto es así, que existen estudios que han apostado por la aplicación del método Taguchi para la optimización de los parámetros de mayor influencia en el proceso EDM. Con su

aplicación en la experimentación, se han publicado resultados con las condiciones óptimas bajo las cuales puede formarse un micro agujero con un diámetro mínimo y una máxima relación de aspecto, mediante [43].

El método Taguchi, desarrollado por el Dr. Genichi Taguchi, es un conjunto de metodologías para la optimización y mejora de un proceso o producto. Reduce las tasas de desperdicio, los costos de los reprocesos y los costos de fabricación debido a la variabilidad de estos [44]. Comprende tres etapas: diseño del sistema, diseño de los parámetros y diseño de la tolerancia. Los valores experimentales se transforman en una relación entre el valor deseable (media) y el valor indeseable para la variable de salida.

En su variante de aplicación a la fabricación de piezas pequeñas, la micro electroerosión aglutina el control exhaustivo del movimiento de los electrodos, la cualificación del desgaste de los electrodos, un control cuidadoso de la frecuencia de descarga y el nivel de energía a la entrada (voltaje e intensidad). Necesita de un mejor conocimiento de las propiedades de los materiales, conductividad térmica de la pieza de trabajo, de la forma de las piezas a producir, así como cuidadosas consideraciones sobre la configuración de los gaps (espacio entre electrodo y pieza de trabajo), el destello de los residuos y especialmente las limitaciones de la miniaturización de los electrodos. Se pueden realizar descargas mínimas de 0,1µJ. que causa un arranque de material mínimo, con brechas del orden de 1,5 µm a 5µm.

2.1.5. SPUTTERING.

La pulverización catódica (sputtering) es la erosión de las superficies sólidas que se produce por el bombardeo con iones de energía [45]. El principio físico se basa en aplicar una diferencia de potencial de alto voltaje entre un ánodo y un cátodo en presencia de un gas inerte,

habitualmente argón, para hacerlo pasar al estado [46]. Los electrones emitidos por el cátodo chocan con las moléculas de gas, produciendo la ionización de este y generando iones positivos. Estos iones positivos son atraídos por el potencial negativo del cátodo lo que provoca el bombardeo del objetivo. Cada una de las colisiones erosiona y arranca átomos de la superficie del material (objetivo), que habitualmente se encuentra en contacto con el cátodo. Los átomos desalojados del objetivo caen hacia la muestra y se depositan sobre su superficie. Debido a la presencia del gas ionizado, estos átomos siguen múltiples trayectorias, lo que consigue que se recubran todas las caras expuestas. Todo el proceso se lleva a cabo en una cámara al vacío. La figura 2.4 muestra, de forma ilustrada, los principios de la operación de pulverización catódica.

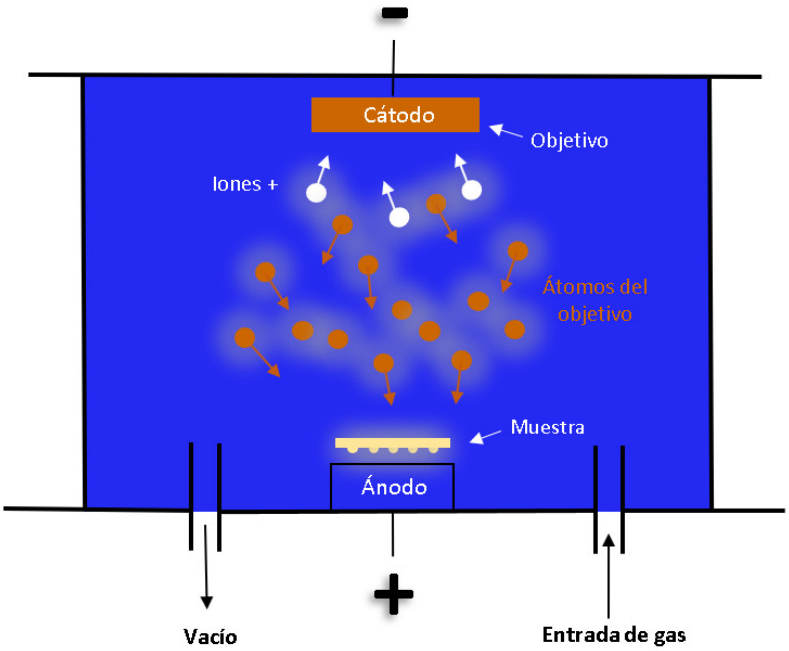


Fig. 2.4. Ilustración esquemática del proceso de deposición por pulverización catódica.

La pulverización catódica se observó por primera vez como la pérdida de material del cátodo en los dispositivos de descarga luminiscente [47]. Hay autores que han encontrado similitudes con este proceso que se remontan a más de 7000 años [48]. Consideran que las deposiciones

accidentales de capas de metal sobre las vasijas de cerámica, que se utilizaban alrededor de los fuegos de carbón caliente, utilizados para reducir los minerales metálicos, son los primeros exponentes del sputtering.

En algunas aplicaciones experimentales, la pulverización catódica resulta perjudicial ya que, los componentes que están expuestos a las partículas energéticas serán erosionados [49], [50]. No obstante, de forma general es un proceso que ofrece grandes posibilidades en el tratamiento de superficies.

La pulverización catódica se utiliza, por ejemplo, para limpiar muestras en procesos de análisis de superficies [51,52]. También resulta interesante su aplicación en los métodos analíticos de la composición de superficies sólidas, conocidos como espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS). En este procedimiento la muestra objetivo se pulveriza a una velocidad constante con un haz de iones primarios. La concentración e identidad de los iones secundarios expulsados y pulverizados, se miden mediante espectrometría de masas. De esta manera se puede determinar la composición del material objetivo e incluso detectar su [53,54]. Otra de sus principales aplicaciones, es la deposición de películas delgadas en la superficie del material con plasma o haz de iones plasma (PSD; del inglés Plasma Sputter Deposition e IBSD; del inglés Ion Beam Sputter Deposition respectivamente) [55, 56].

Una de las variantes de la pulverización catódica es el método magnetron sputtering, cuyas capacidades han resultado de aplicación en el desarrollo de esta tesis. Su uso tiene como principales ventajas el mejor control del espesor de película a depositar, alta pureza y velocidades de deposición, baja temperatura de trabajo, buenas condiciones de adherencia y facilidad de operación [57, 58]. Esta tecnología puede depositar películas metálicas o no metálicas en la superficie del sustrato de textiles como poliéster, algodón, lino, seda, lana,

poliamida, ácido poli láctico y polipropileno, mediante la selección del proceso de sputtering adecuado, y el uso de diferentes materiales objetivo y gases de proceso [59, 60]. Los materiales objetivo son metales como Cu, Ti, Ag, Al, W, Ni, Sn, Pt o no metales como Si, grafito, así como óxidos metálicos como TiO_2, Fe_2O_3, WO_3, ZnO y óxido no metálico como SiO_2. También puede depositar materiales cerámicos y nano-películas compuestas de una o varias capas, formadas con polímeros como poliamida y politetrafluoroetileno. No sólo puede dotar a los tejidos de funciones individuales o compuestas como el blindaje electromagnético, la protección UV, propiedades antiestáticas, antibacterianas, conductivas o impermeables, etc., sino también obtener colores estructurales a través de los caracteres de interferencia y difracción de las nano-películas [61, 62, 63, 64, 65, 66].

La pulverización catódica con magnetrón se ha convertido en el proceso seleccionado para la deposición de una amplia gama de revestimientos de importancia industrial. Los ejemplos incluyen revestimientos resistentes al desgaste, revestimientos de baja fricción, revestimientos resistentes a la corrosión, revestimientos decorativos y revestimientos anti reflectivos o con propiedades ópticas o eléctricas específicas [67].

Recientemente Radziejewska et al. han utilizado magnetron sputtering para aplicar recubrimientos resistentes al desgaste a la inserción WC-Co de herramientas de corte comerciales. Aplicaron WB_2 y (W, Ti) B_2 boruros. Su estudio determinó que los recubrimientos depositados en el sustrato WC-Co son lisos y muy duros. En una de sus pruebas (torneado de acero inoxidable 304), la herramienta recubierta W-B mostró una mejor resistencia al desgaste que la herramienta sin recubrimiento. El desgaste del flanco de la herramienta fue menor en un 30% [68].

2.1.6. ELECTROCONFORMADO.

El electroconformado (*electroforming*) es un proceso electroquímico que se define como "la producción o reproducción de artículos por electrodeposición sobre un mandril o molde que posteriormente se separa del depósito [69]. Es un proceso de deposición para la fabricación de piezas metálicas. Un baño electrolítico es utilizado para la deposición metálica sobre un substrato base que debe ser conductivo [70].

Forma parte de los procesos de electrodeposición química, compartiendo muchas similitudes con el electroplating [71]. Este proceso realiza un recubrimiento fino sobre la superficie de un objeto, utilizando el mismo concepto de traslado de masa del metal base, mediante la aplicación de corriente eléctrica, en presencia de una solución electrolítica [72]. El objetivo del recubrimiento es la mejora de las características de la superficie. La estética, la adherencia o la mejora de la resistencia a la [73].

Sin embargo, el electroconformado, no busca realizar un recubrimiento con la deposición del metal, sino la generación de una cáscara que conforma una pieza en sí misma, como resultado de la reproducción del modelo. Básicamente la diferencia radica en la aplicación de un mayor tiempo de deposición (varias horas), siendo este mayor cuanto más espesor se persiga.

No hay un consenso en la comunidad científica sobre los espesores que se consideran límites para cada proceso, y se opta por diferenciarlos según su aplicación: recubrimiento para el electroplating y obtención de una pieza independiente para el electroconformado.

El electroconformado requiere de un ánodo (material a depositar), de un cátodo (elemento que recibe la deposición y contiene la geometría que se pretende reproducir), de un tanque con

una solución electrolítica (elemento de transmisión de los iones) y de una corriente eléctrica (directa o pulsante) que es responsable de desencadenar el proceso electroquímico.

El ánodo (+) y el cátodo (−) deben estar sumergidos en la solución y deben ser conductores. Ambos elementos no están en contacto físico por lo que no hay posibilidad de causar daños a ninguna de las superficies. La electrodeposición es teóricamente un proceso de acumulación átomo a átomo, por lo que la exactitud de la reproducción depende del diseño del modelo [74]. El modelo se puede definir como la forma negativa a generar y la cáscara electrodepositada la forma positiva. La figura 2.5 muestra de forma esquemática los principios de la operación del electroconformado.

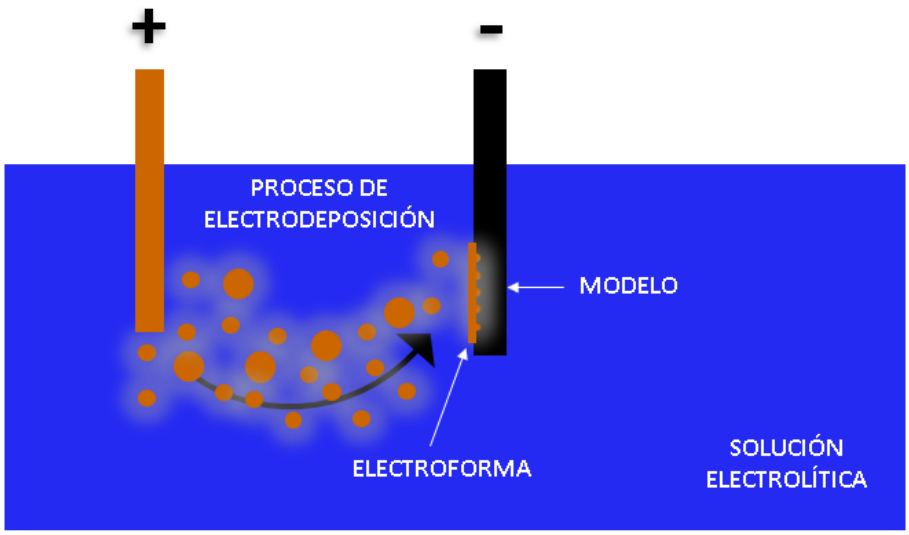


Fig. 2.5. Ilustración esquemática del proceso de electroconformado.

Cuando el proceso de reproducción tiene como objetivo generar una pieza para aplicaciones funcionales, el modelo utilizado se denomina modelo funcional. De igual manera, la superficie depositada en contacto con el modelo funcional recibe el nombre de superficie funcional.

La deposición se realiza a lo largo del tiempo dependiendo de las condiciones del baño y de los parámetros del proceso, de tal manera que, a mayor tiempo de exposición mayor espesor

se conseguirá en la pieza (cáscara). Espesores de capa entre 0,025mm y 25mm se consideran valores objetivos de un proceso de electroconformado [75]. Los materiales más habitualmente utilizados como ánodo son níquel, cobre y sus aleaciones (Ni-Fe o el Cu-P), no obstante, se pueden depositar otros metales.

Las principales ventajas de este proceso son la gran exactitud y precisión dimensional de la reproducción de detalles de la superficie del modelo, capacidad para conformar geometrías complejas y paredes delgadas, así como adaptabilidad a diferentes tamaños [76].

Sus principales restricciones se derivan de una baja velocidad de deposición y por tanto largos tiempos de trabajo, la limitación de materiales aplicables; cobre, níquel, oro, plata y algunas aleaciones de los anteriores, las dificultades para conseguir uniformidad de espesor, los inconvenientes derivados de la necesidad de separar el modelo de su electro forma, la aplicación casi exclusiva a productos con paredes delgadas y a la necesidad de modelos conductores de la electricidad en sus superficies activas [77]. Además, la posibilidad de obtener geometrías tridimensionales cerradas incluye el inconveniente de trabajar con modelos perdidos, que no podrán separarse de la capa depositada.

El electroconformado y su gran capacidad para reproducir con exactitud dimensional geometrías tridimensionales, ha experimentado un renovado interés en los últimos años, dada la demanda existente de nuevos procedimientos de trabajo en el campo de la micro fabricación [76]. En determinadas aplicaciones se presenta como unas de las pocas soluciones para la consecución de buenos resultados, como es el caso de los agujeros de gran profundidad.

En la mayoría de los otros métodos de micro mecanizado, las dificultades a las que se enfrentan por la extracción de virutas o desechos en la profundidad del agujero generan un

cuello de botella para realizar trabajos en geometrías con muy alta relación de aspecto. Por el contrario, el micro electroconformado requiere sólo un núcleo largo que pueda ser fácilmente adaptado. Dado que el agujero es la réplica del núcleo, se pueden realizar fácilmente varios tipos de agujeros modificando simplemente la forma del núcleo [78]. Por estas razones el proceso de electroconformado posee grandes ventajas, en este ámbito, para la reproducción de detalles superficiales en condiciones de repetitividad.

En los últimos años se ha surgido una variante del proceso dirigida específicamente a la micro fabricación de componentes denominada micro electroconformado [79]. En esta variante, se utilizan sistemas especiales para el equipo de electroconformado, como fuentes de energía pulsante con inversión de la polaridad, sistemas de agitación magnético y/o por ultrasonidos [80, 81].

El electroconformado forma parte de los procesos de electrodeposición de metales que tienen su origen en el siglo XIX. En sus inicios le electrodeposición fue utilizada como método de trabajo de metales para usos decorativos. Su posterior evolución derivó hacia aplicaciones en productos industriales y mejora de materiales.

Walter G. Mc Millan, ya en 1890 incluía el “electrotipado” en lo que llamaba procesos de “Electro- Metalurgia”. Lo definió como la producción de una réplica exacta de cualquier objeto que tuviera una superficie irregular, para ser usada en impresión o para propósitos artísticos [82].

El origen de la galvanoplastia y el electrotyping se atribuyen a Moritz Hermann Jacobi en 1838, aunque el físico y químico Inglés John Frederic Daniell, ya se había tropezado con este fenómeno dos años antes sin prestar la debida atención a los depósitos de cobre cuando trabajaba en las primeras pilas de corriente eléctrica [83].

Su primera gran aplicación industrial en la fabricación de productos fue en planchas de impresión para imprentas. Otras aplicaciones relevantes se desarrollaron para el perfeccionamiento de materiales, como los recubrimientos para mejorar la resistencia a la corrosión, mejorar propiedades funcionales superficiales y para la recuperación de metales.

El Grupo de Investigación de Fabricación Integrada y Avanzada de la ULPGC tiene gran experiencia previa en el uso de la técnica de electroconformado para el prototipado rápido de herramientas, tanto en la mejora del proceso en sí mismo [84, 85, 86] como en su aplicación en micro fabricación [74] y en superficies estructuradas [87]. Igualmente destacan sus trabajos en el uso del electroconformado en combinación con técnicas de fabricación aditiva, concretamente con fotopolimerización por luz ultravioleta y su empleo en EDM [88].

A continuación, se realiza una breve exposición de los aspectos electroquímicos más destacables del proceso de electroconformado, relacionados de forma más directa con el objeto de la investigación.

2.1.7. PRINCIPIOS DEL ELECTROCONFORMADO

La electrodeposición es un proceso electroquímico que resulta muy complejo debido a la cantidad de variables que intervienen y que influyen de manera muy determinante en la eficiencia de este. El acabado, la composición, la estructura, la morfología y las propiedades de los depósitos metálicos dependen de cada uno de los parámetros del proceso y de todos a la vez. La complejidad se asocia además a que algunos de los parámetros mejoran ciertas propiedades mientras empeoran otras. Es el caso del acabado superficial, cuya excelencia está vinculada a un crecimiento lento y por tanto a una pérdida de rendimiento productivo.

El éxito de este proceso está relacionado, por tanto, con la necesidad de encontrar un equilibrio entre todos los parámetros de influencia.

Participan como parámetros fundamentales: la densidad de corriente; el voltaje, la temperatura, el pH, la composición y el volumen del baño electrolítico y el tiempo. Participan como parámetros de mejora; la agitación del baño, la presencia de aditivos, la relación dimensional ente el ánodo y el cátodo (distancia, forma y disposición) y el acabado superficial de los electrodos entre otros.

2.1.7.1. Etapas del electroconformado.

El mecanismo 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 2.6 y 2.7 muestran algunos ejemplos de tipos de crecimiento.

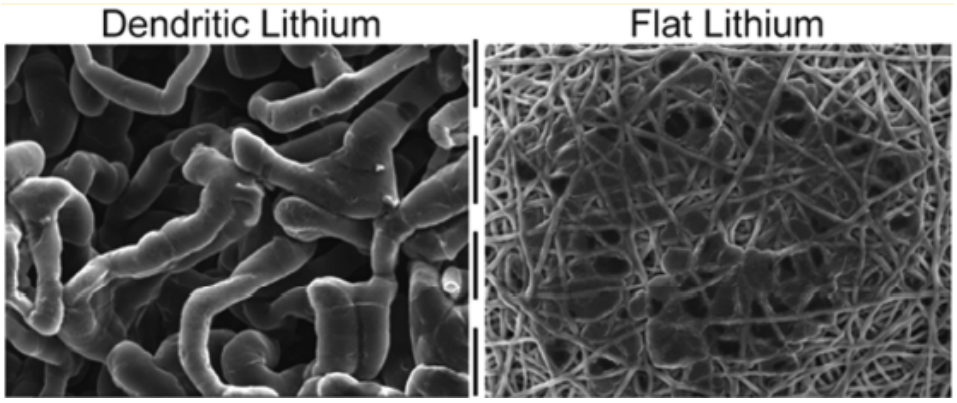


Fig. 2.6. Crecimientos de una deposición de litio sobre electrodo de cobre [92].

Fig. 2.7. Crecimientos de tipo nucleado y arborescente de cobre.

2.1.7.2. Densidad de corriente.

La densidad de corriente es el parámetro que impulsa las reacciones químicas e influye directamente en la capacidad productiva y en la calidad de la reproducción de los detalles. Resulta determinante en la definición del crecimiento y las propiedades de la capa a depositar. Su expresión matemática es la siguiente:

$$i = \frac{I}{A}$$

Donde:

i = densidad de corriente

I = Intensidad de corriente que circula por el sistema, expresada en amperios (A)

A = área del electrodo expresada en dm^2

Un aumento de la densidad de corriente consigue reducir los tiempos de deposición, aumentando las cantidades de material depositado, pero a la misma vez genera un grano menos fino y una preferencia de deposición en las zonas de menor resistencia. Esto perturba el correcto completado del recubrimiento.

Este efecto se retroalimenta a medida que aumenta el espesor de la deposición, por lo que esta tendrá preferencia por las zonas ya depositadas, abandonando las superficies no completadas. Las elevadas tasas de deposición por densidades de corriente altas, provoca además fragilidad en los depósitos, por lo que es necesario establecer límites.

2.1.7.3. Velocidad de deposición.

La velocidad de deposición establece la cantidad de material depositado en un tiempo determinado. Su expresión se calcula a partir de las leyes de Faraday y se puede representar en función de la densidad de corriente de la siguiente forma:

$$v = \frac{dn}{dt} = \frac{i}{z \cdot F}$$

Donde:

i: densidad de corriente (A)

Z: el número de valencia de la sustancia o ion de la solución

F: constante de Faraday de valor 96.487 (C/mol)

2.1.7.4. Espesor de la deposición.

En el caso de un sistema de electrodeposición de cobre como el que se ha utilizado en la presente investigación, la generación de masa de la capa depositada a través del proceso electroquímico se realiza según:

En el cátodo: $Cu(s) \rightarrow Cu^{2+}(aq) + 2e^{-}$

En el ánodo: $Cu^{+2}(aq) + 2e^{-}Cu(s)$

El espesor teórico de la deposición se puede calcular relacionando el peso molecular y la densidad del depósito con el tiempo que dura el proceso, a una densidad de corriente determinada. Su expresión se calcula de nuevo a través de las leyes de Faraday para la electrólisis y tiene la siguiente forma:

$$e_t = \frac{i \cdot PM \cdot t}{n \cdot F \cdot \rho}$$

Donde:

S_t: espesor depositado (gr)

i: densidad de corriente (A/cm^2)

PM: peso molecular del material depositado (gr/mol)

n: cantidad de sustancia liberada (mol e$^-$ /mol).

F: constante de Faraday de valor 96.487 (C/mol e$^-$)

ρ: densidad del material de recubrimiento de valor 8,97 gr/cm^3 para el cobre.

t = tiempo de deposición (s)

Si se prefiere, se puede reformular esta ecuación de forma más sencilla en función de la intensidad de corriente que circula por el circuito y el área de la superficie de deposición. Considerando que el valor de la constante de deposición del cobre es 3,68x10^{-5} cm^3/A·s [92], se puede determinar el espesor depositado según la siguiente expresión:

$$e_t = \frac{C \cdot I \cdot t}{A}$$

Donde:

e_t: espesor teórico depositado (gr)

I: Intensidad de corriente a la que se realiza la deposición.

t: tiempo de deposición

A: área de la superficie de depósito (cm^2).

t = tiempo de deposición (s)

Este valor teórico debe ser corregido en función de la eficiencia del cátodo, por lo que el espesor teórico corregido se puede expresar como:

$$S_c = S_t \cdot E$$

Donde:

S_c: espesor depositado corregido (gr)

S_t: espesor teórico depositado (gr)

E: eficacia del cátodo, cuyo valor oscila entre el 92% y el 98%. [93]

2.1.7.5. Poder de deposición.

El poder de deposición, o también conocido por su término en inglés “throwing power”, es la relación entre la uniformidad del espesor depositado y la distribución de corriente en la superficie catódica. Sus factores de influencia son las características electroquímicas de la solución electrolítica (la polarización catódica, la eficiencia catódica y la conductividad eléctrica), la forma del cátodo y su posición relativa respecto al ánodo [94]. Una solución que tenga un alto poder de deposición es capaz de depositar casi por igual en zonas salientes, zonas hundidas e incluso zonas en sombra del modelo.

El poder de deposición puede mejorarse actuando sobre las condiciones operativas del proceso: reducir densidad de corriente, aumentar la distancia entre el cátodo y el ánodo, aumentando la temperatura y el pH de la disolución o bien utilizando aditivos para incrementar la conductividad eléctrica de la solución [95].

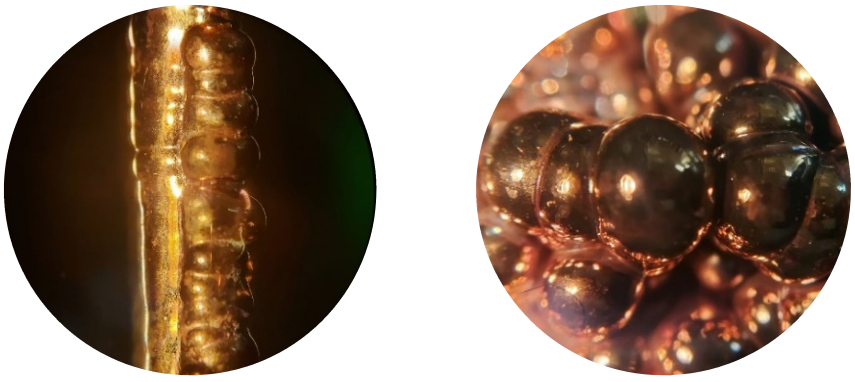


Fig. 2.8. Efecto de throwing power en piezas electrodepositadas de cobre.

2.1.7.6. Poder de nivelación.

El poder de nivelación, o según se conoce por su término en inglés “levelling”, es la capacidad de una solución para generar un depósito uniforme en superficies catódicas con zonas valle. Estas zonas valle pueden ser debidas a formas intencionadas, practicadas sobre el cátodo o defectos superficiales (cráteres, arañazos, huellas de mecanizado, etc.).

Una solución con un elevado poder nivelador mejora el acabado superficial de la deposición con apariencia menos rugosa y un tacto más suave. Las condiciones de nivelación se pueden mejorar mediante el uso de aditivos orgánicos. Estos aditivos se establecerán en las zonas salientes, reduciendo localmente la densidad de corriente en esas zonas y provocando un efecto inhibidor que favorece la deposición en las zonas valle [96].

2.1.7.7. Control y mejora de los parámetros operativos del proceso.

Los parámetros del proceso de electroconformado determinan y rigen su desarrollo e influyen de manera relevante en su resultado. Afectan a la calidad de las piezas obtenidas, no solo desde el punto de vista dimensional y estético, sino a nivel de las propiedades físicas y químicas de las piezas resultantes.

2.1.7.7.1. Densidad y tipos de corriente.

Como ya se ha expresado anteriormente trabajar con densidades de corriente altas supone mayores tasas de deposición, pero a la vez empeora el poder de deposición y por lo tanto la uniformidad del espesor, máxime si se trata de geometrías complejas, donde el crecimiento de tipo arborescente tiende a presentarse en las zonas de mayor concentración de corriente. Por tanto, es sumamente importante realizar una correcta elección del rango de densidad de

corriente a utilizar durante el proceso de electroconformado. Sus valores deberán adaptarse a las especificaciones geométricas y de acabado de la pieza.

En principio para operaciones a pequeña escala con geometrías complejas y acabados exigentes deberán utilizarse densidades de corriente pequeñas. Resultan recomendables valores inferiores a $2A/dm^2$ [97]. Igualmente, resulta recomendable utilizar estos valores al inicio de la deposición. Así, se puede garantizar una solvente capa inicial, que reproduzca de forma fiel el modelo, y aporte una mayor superficie conductiva que permita aumentar la velocidad de deposición.

Una gran parte de la investigación acerca de los procesos electroquímicos de deposición de metales se ha centrado en el estudio de las mejoras en el proceso, a través del uso de diferentes tipos de corriente. La posibilidad de generar corrientes de tipo pulsante, tanto en polarización directa (PC, del inglés Pulse Current) como en polarización inversa (PRC, del inglés Pulse Reverse Current) han sido explorados desde finales de los años 70, como una posible fuente de mejora de la calidad de los depósitos frente al uso de la corriente continua (CC) convencional [98, 99].

Diversos estudios han conseguido mejoras en las propiedades de los depósitos [100], lo que ha impulsado un interés en los sectores de la aeronáutica, la automoción, la electrónica y la metalurgia, tradicionalmente punteros en la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación [101].

En el uso de la corriente pulsante, el potencial o la intensidad se alternan de forma rápida entre dos valores diferentes. En el caso de la corriente pulsada directa, cada pulso se compone de un tiempo de encendido (TON), durante el cual se fija y se aplica una diferencia de potencial

o intensidad de corriente y un tiempo de pausa (TOFF) durante el cual no se aplica corriente. Durante la fase de encendido, se utilizan pulsos de igual amplitud y duración.

En el caso de la polarización inversa, una fase de corriente con polaridad invertida sustituye a la fase de apagado. Esta corriente invertida es conocida como corriente anódica [100].

Ya en los estudios tempranos, los investigadores determinaron que el uso de la corriente pulsante resulta eficaz en el control de la microestructura de los depósitos [99], se favorece el inicio de nucleación de grano y resulta en un depósito de grano más fino. Es posible controlar la composición, microestructura y porosidad del depósito mediante la regulación de los parámetros de pulso, reduce la cantidad de aditivo requerida en un 50-60%. Por su parte, el uso de PRC mejora la estabilidad y la eficiencia del baño con un consumo de aditivos muy pequeño [102].

2.1.7.7.2. Temperatura.

Los aumentos de temperatura provocan normalmente la mejora de la conductividad del electrolito, pero tiene efectos contrapuestos. El aumento de la temperatura provoca un descenso de la resistividad del electrolito, generando una menor densidad de corriente, que permite controlar mejor los crecimientos irregulares en zonas no deseadas. Sin embargo, aumenta el desprendimiento de hidrógeno y la posibilidad de precipitación de sales contaminante. Una combinación de aumento de temperatura y de aumento de los valores de la densidad de corriente, genera más movilidad en los iones metálicos, lo que permite un afinado del grano de la deposición. En general en los baños de cobre se obtienen buenos resultados sin necesidad de sobrepasar la temperatura ambiente, no así en los baños de níquel, que suelen trabajar entre 40ºC y 60ºC.

2.1.7.7.3. Composición del baño electrolítico.

Afecta a la conductividad y por tanto a la movilidad de los iones individuales responsables del transporte del depósito, lo que es determinante para conseguir uniformidad en la distribución de espesores. Depende en gran medida de la concentración de la solución electrolítica y por tanto de la composición química de la misma. El empleo de aditivos como sales orgánicas e inorgánicas (sulfatos y cloruros) es habitual para mejorar su conductividad. Igualmente es usual utilizar agitación y modificar la temperatura para mejorar sus condiciones.

Leith y Schwartz realizaron un estudio en el que se describía un proceso de electrodeposición que buscaba lograr una buena uniformidad, tasa de crecimiento y rendimiento en la fabricación de micro engranajes de NiFe [103]. Establecieron la importancia de dedicar esfuerzos a la consecución de una buena preparación y optimización del baño electrolítico. Tras desarrollar sus experimentos, afirmaron que la composición óptima de una solución es aquella que apenas muestra diferencia en los resultados por la presencia de agitación del baño. Lo que significa que la correcta formulación de la composición del baño electrolítico debe ser entendida como una prioridad en la preparación del proceso de electroconformado.

2.1.7.7.4. Control del pH.

Influye de forma importante en la solubilidad del baño electrolítico y sus condiciones de operación, así como en la naturaleza y aspecto de la deposición [104]. La disminución del pH mejora la conductividad. De su control depende la cantidad de iones H^+ presentes en la solución, que deben ser suficientes para evitar la precipitación de sales, pero no demasiados para evitar su descarga en el cátodo. La presencia de burbujas de hidrógeno en la cercanía del

cátodo hace que se adhieran a este no permitiendo la deposición. A este fenómeno se le denomina picado (pitting). La generación de hidrógeno se produce según la reacción:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\,(g)$$

Un pH muy elevado puede provocar una disolución química del depósito más rápida que la propia deposición. Grujicic y Pesic encontraron que, con el aumento del pH y la concentración de cobre, aumentaba el tamaño de los núcleos de crecimiento, pero estos disminuían en densidad [105]. El pH de la solución electrolítica aumenta durante el proceso, por lo que es necesario la adición de ácidos para mantener el nivel dentro del intervalo correcto de operación. En el caso que el pH se mantenga o descienda es probable que haya contactos defectuosos en el ánodo o que la superficie de este sea insuficiente [106].

2.1.7.7.5. Aditivos.

Son sustancias químicas que se añaden al baño electrolítico para mejorar la calidad de los depósitos y evitar las contaminaciones metálicas. Los más utilizados son: abrillantadores que generan un grano más fino y aportan brillantez a la deposición; niveladores que actúan sobre los puntos de mayor deposición para compensarla; modificadores de estructura utilizados para mejorar propiedades del depósito; sales, habitualmente de la misma naturaleza que el baño y que se utilizan para relanzar el número de iones en baños agotados [107].

2.1.7.7.6. Agitación y filtración del baño.

La agitación contribuye a la renovación de las zonas de incidencia, refrescando la zona catódica con iones procedentes del resto del baño. Evita la posibilidad de crecimientos nodulares gracias a una mejor distribución de la densidad de corriente, lo que genera mayor

uniformidad en la deposición. La agitación puede ser de tipo mecánico, neumático o combinación de ambas. Se debe poner especial atención en la agitación neumática para no provocar burbujeo en las zonas de influencia. En el caso de la agitación mecánica, un exceso de caudal puede provocar fenómenos de turbulencia en las zonas cercanas al cátodo y por tanto la aparición de burbujeo.

La filtración permite retirar las partículas en suspensión ajenas al baño y los restos insolubles. Una correcta filtración retrasará la necesidad de añadir aditivos al baño, aumentando su tiempo de uso y proporcionando un mejor acabado. La filtración no es imprescindible para la obtención de buenos resultados, sobre todo en procedimientos con compuestos de la misma naturaleza. No obstante, resulta de ayuda en baños con tendencia a la contaminación.

2.1.7.7.7. Influencia del tamaño y forma de la pieza.

Cuando el área activa del modelo es más pequeña que el ánodo, la corriente tiende a ser mayor en los bordes del área activa. Esto hace que fluya más corriente de la que pueden transportar los iones, lo que obliga a que el ion se deposite como un pequeño defecto en lugar de construir una estructura cristalina adecuada. De acuerdo con la distribución del campo eléctrico, una disposición con ánodo y cátodo del mismo tamaño debe tener una distribución uniforme de la corriente de recubrimiento.

La influencia de la diferencia de geometría entre el ánodo y el modelo puede resultar muy importante [108]. Resulta ideal utilizar ánodos que reflejen o simulen la geometría del cátodo en el caso de formas complicadas o complejas, donde haya muchas zonas valles o zonas en sombra. En el caso que dicha reproducción sea costosa o complicada, se recurre al uso de

cátodos auxiliares (dummy cathode) [109] o celdas de recubrimiento para obtener una distribución uniforme del espesor [110].

2.1.7.7.8. Pantallas o escudos aislantes.

En ocasiones y a pesar del uso de aditivos es muy complicado controlar los puntos de concentración de corriente. Se recurre entonces al bloqueo físico de este flujo. Para ello, se colocan elementos no conductivos entre el cátodo y el ánodo de manera que obstaculicen el flujo de corriente hacia el cátodo. Se consigue así controlar el exceso de deposición en las zonas más favorables.

Suelen ser de gran aplicación en geometrías salientes o de borde, o aquellas situaciones donde las zonas valles tienen gran presencia en el modelo, y necesitan este tipo de compensación para no perder capacidad de deposición.

Son diversos los estudios realizados con ejemplos de aplicación de estos elementos de contención [111,112] que incluso han derivado en la generación de patentes [113, 114].

Tras esta breve exposición sobre los elementos de mayor influencia en la operativa del proceso de electrodeposición, se plantea que la separación entre cátodo y ánodo, la concentración del baño, la diferencia de forma entre el ánodo y el modelo [115], la optimización de los parámetros del proceso [116] y la agitación [117] pueden modificarse para obtener mejores resultados en la uniformidad de la deposición.

Algunos estudios han determinado que, actuando sobre estos parámetros de forma individual, se pueden conseguir mejoras importantes. Sin embargo, también establecen que el

tratamiento conjunto de estas mejoras y su combinación, a veces no generan los buenos resultados esperados [118].

Nos encontramos, por tanto, en un espacio de incertidumbre a veces solo abordable desde el punto de vista experimental.

2.2. ESTADO DE LA TÉCNICA.

En este apartado se presenta una revisión del estado actual y los últimos avances relacionados con el electroconformado y su combinación con la fabricación aditiva de modelos. De las referencias consultadas se han revisado los datos, métodos, resultados y conclusiones que pudieran resultar de interés para la contextualización del trabajo de investigación planteado en la presente tesis. Se han organizado en dos apartados principales vinculados con los objetivos y fases del desarrollo experimental propuestos en el Capítulo 1: la compatibilidad entre las tecnologías de fabricación aditiva, micro fabricación y electroconformado, para conseguir modelos y piezas funcionales y el desarrollo de un equipo de trabajo que las materialice.

El electroconformado es un procedimiento que ha ido subiendo niveles en la pirámide jerárquica de los procesos productivos, tradicionalmente dominada por los procesos convencionales de mecanizado. La necesidad de obtener productos a escalas cada vez más pequeñas con geometrías más complejas, hace que resurjan este tipo de procesos, que a pesar de sus dificultades se muestran, en ocasiones, como la única opción válida para obtener buenos resultados.

La nueva era industrial, donde la automatización y la gestión de enormes cantidades de información permiten controlar, tratar y optimizar los procesos productivos, ya está implantada de forma extensa en los procesos convencionales. El desarrollo continuo de mejoras

tecnológicas, basadas en la experiencia de muchas décadas productivas, ha generado el control casi total de los parámetros que llevan al límite máquinas y herramientas. Sin embargo, el conocimiento actual del electroconformado sigue basándose en datos empíricos, sus parámetros de operación, el equipamiento y los componentes necesarios para su desarrollo a nivel industrial, siguen sin tener protocolos exhaustivos para su uso masivo. Algunos autores han apostado por arrojar luz sobre los complejos problemas que rodean el comportamiento electroquímico y químico durante el proceso de deposición [119].

2.2.1. TÉCNICAS DE ELECTROCONFORMADO

La capacidad de controlar la uniformidad de la capa depositada es una de las claves para obtener buenos resultados. Cáscaras no uniformes generan la necesidad de procesados posteriores de las piezas, los cuales no suelen ser sencillos o no consiguen calidades aceptables.

Zhai et al. utilizaron una fuente mega sónica como elemento de agitación del baño electrolítico, para conseguir una capa electroconformada uniforme. Realizaron experimentos sobre sustratos de cobre utilizando dos tipos de onda; una onda mega sónica unidireccional y otra alterna bidireccional. Según los autores los resultados aportan mejoras en los valores de planitud del orden de un 30%, en comparación con una deposición sin agitación [120].

W. Hu et al. También utilizaron este método para reducir las tensiones residuales en capa depositada. Sus autores afirman haber conseguido reducir en hasta un 60% la tensión residual aplicando agitación mega sónica. Para la medición utilizaron el método de difracción de rayos X [121].

Zhao. Y et al. han propuesto el uso de nuevo proceso de electroconformado foto asistido (PAE) en una aplicación muy específica para la mejora del rendimiento de las memorias resistivas para computadoras (RS). Para ello, irradian con luz visible el proceso de electroconformado.

Según su investigación, el efecto de la fotoconductividad logra suprimir el exceso de corriente que induce un crecimiento excesivo de filamentos conductores, mejorando el [122].

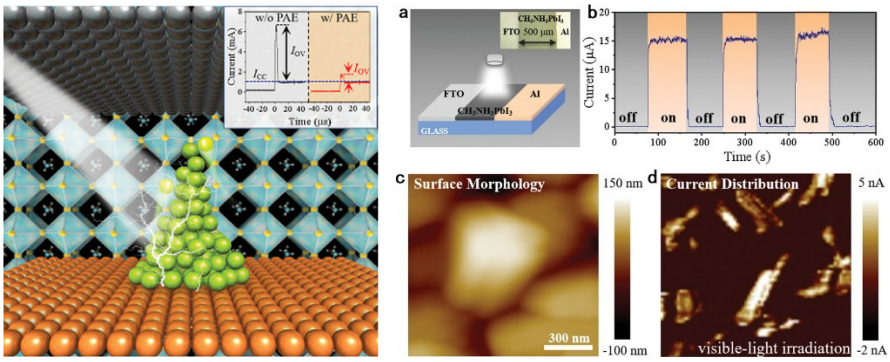


Fig. 2.9. Imágenes de la investigación de Zhao et al. (2019)

J. Hu et al. plantearon la introducción de alcoholes, en concreto glicerol, como aditivo para un proceso de electrodeposición de cobre en presencia de un baño de pirofosfato. Según su investigación no se modifica el mecanismo de nucleación ni la pureza de la deposición, sin embargo, se consigue una porosidad más baja por afinamiento del grano y una micro deformación más pequeña que utilizando un baño convencional. Los autores atribuyen los resultados a la mejora sustancial del coeficiente de transferencia de carga y por tanto de la densidad de corriente [123].

Nishikawa et al. estudiaron el efecto de aplicación de un campo magnético durante el proceso de electrodeposición de cobre en una solución de sulfato de cobre. Para ello, midieron la capa límite de concentración con un microscopio de interferencia de tecnología láser. Como resultado determinaron que se mejora la trasferencia de iones de Cu^{2+} en la capa de difusión generando grandes granos de cristal [124].

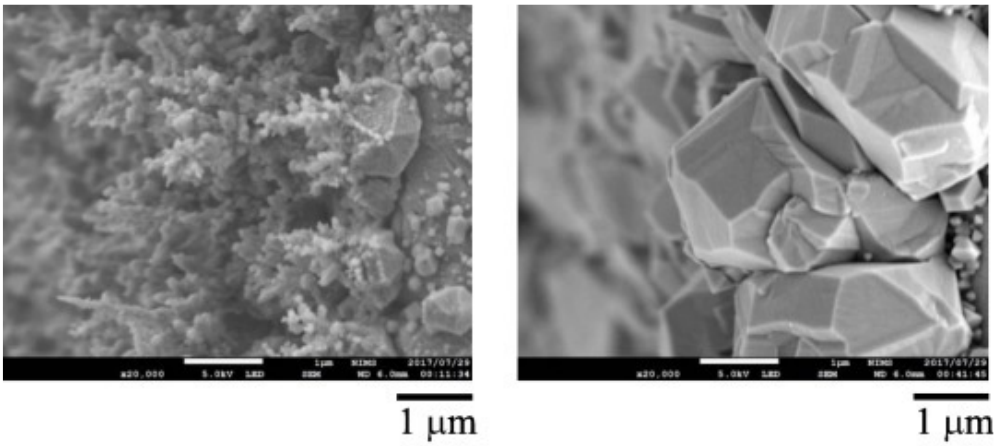


Fig. 2.10. Imágenes de la investigación de Nishikawa et al. (2019)

Wang et al. utilizaron diferentes potencias ultrasónicas en un proceso de electroconformado de cobre y analizaron las propiedades físicas (rugosidad, módulo de Young y dureza) de la capa depositada. También midieron y compararon el tamaño de grano. Según los autores, el aumento de la potencia ultrasónica reduce la rugosidad de la superficie, mejora las propiedades físicas y disminuye el tamaño de grano de los cristales de cobre depositados [125].

Schmitt et al. evaluaron el uso de aditivos de ácido sulfónico en la electrodeposición de cobre, encontrando respuesta efectiva en la aceleración de la deposición [126].

Singha, Sharma y Wei, utilizaron el método Taguchi ortogonal L9 para establecer el valor óptimo de las variables voltaje, concentración de la solución y tiempo en un proceso de electroconformado de cobre, que consiguieran una rugosidad óptima de la capa depositada. Como conclusión establecieron que los valores de voltaje de 2V, una concentración de 200gr/l y un periodo de 7 horas resultaban los más adecuados para conseguir mejor acabado superficial. Todos los experimentos se realizaron en condiciones de agitación [127].

2.2.2. FABRICACIÓN ADITIVA Y MICRO FABRICACIÓN.

Los sistemas micro mecánicos (MEMS) son un exponente de gran interés para los investigadores. Su producción a nivel industrial es cada vez más demandada para cubrir las necesidades de la maquinaria y la electrónica de precisión, los sistemas de computación, la bioquímica, la industria aeroespacial, equipos médicos, etc. Esta tecnología se utiliza para crear pequeños dispositivos o sistemas integrados que combinan componentes mecánicos y eléctricos y necesitan a toda velocidad, nuevos sistemas de producción que puedan acometer sus desafíos.

Los procesos de fabricación aditiva y su capacidad para conseguir muy buenos resultados a esas escalas se han beneficiado de los grandes esfuerzos por desarrollar nuevos procesos como la impresión 3D a microescala y nano escala, bio impresión, impresión 4D, estructuras e 3D de alta resolución e impresión en multi materiales [128].

A continuación, se muestran algunos estudios recientes en este campo.

Ma et al. afrontaron la fabricación de una microestructura metálica multicapa combinando la tecnología de superposición UV-LIGA y el electroconformado. Utilizado la fabricación de máscaras, el tratamiento del modelo y el control de los parámetros de ambos procesos para reproducir matrices de micro cilindros con un diámetro de 30 µm y espesores de capa micro electroconformada de 300 µm. En este trabajo, los autores utilizaron el control del pH (3,8-4,4) y la densidad de la corriente (3A/dm^2) para el restringir la formación de poros en la capa de micro-electroconformado de Ni [129].

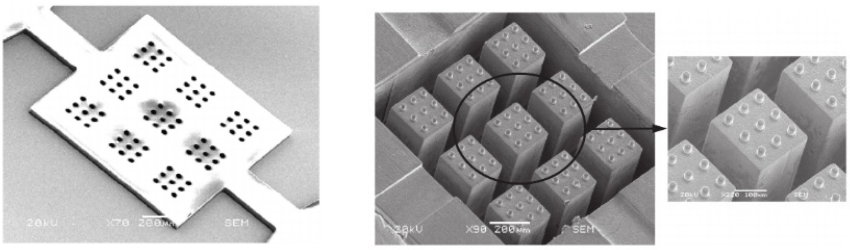


Fig. 2.11. Imágenes de la investigación de Ma et al. (2019)

Matsuzaki et al. utilizaron un método de fabricación aditiva que combina la impresión 3D FDM, también conocida como fabricación mediante filamentos fundidos (FFF) y una tecnología de electroconformado para fabricar estructuras multi materiales compuestas de plástico y metal [130]. Con el electroconformado del interior de un molde de polímero impreso permitieron la fabricación de estructuras multi material. Se determinaron las condiciones de fabricación para el espesor especificado por proceso y los espesores totales de todos los procesos. Sus resultados indicaron que la conformación de la parte metálica dependía de la calidad de la fabricación de la impresora 3D. La figura 2.12 presenta uno de sus ejemplos de fabricación consistente en un engranaje a partir de resina y metal.

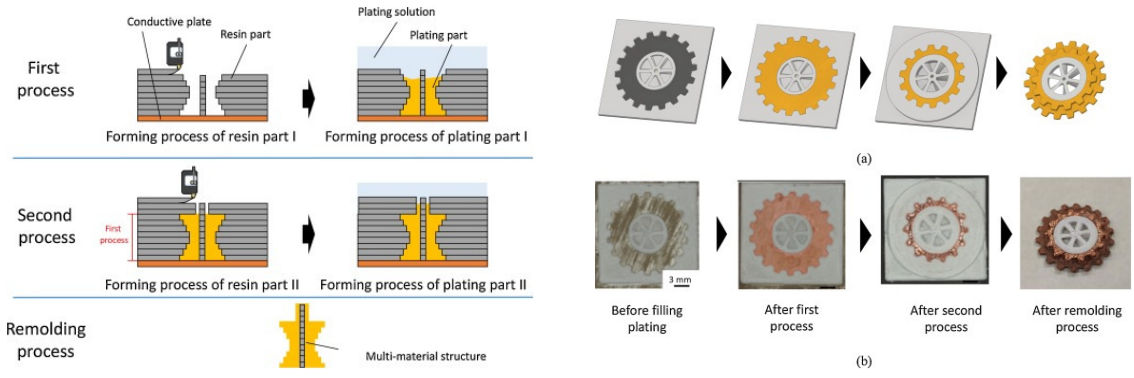


Fig. 2.12. Imágenes de la investigación de Matsuzaki et al. (2019)

Wu et al. realizaron un estudio experimental para fabricar microestructuras metálicas tridimensionales mediante un proceso de mecanizado combinado basado en tecnología de impresión 3D SLA y tecnología de electroconformado de cobre. Utilizaron una capa de pintura de plata para conseguir la conductividad. Determinaron que una densidad de corriente máxima de 6A/dm^2, una relación de huecos del 20% y una distancia entre cátodo y ánodo de 40 mm eran las condiciones óptimas del proceso [131]. Además, encontraron mejores resultados con el uso de corriente pulsada. Utilizaron una geometría en forma de peine con una dimensión mínima de 300µm. Si bien expusieron mejoras en la calidad superficial de las piezas, no mostraron datos de los espesores obtenidos ni la uniformidad de estos.

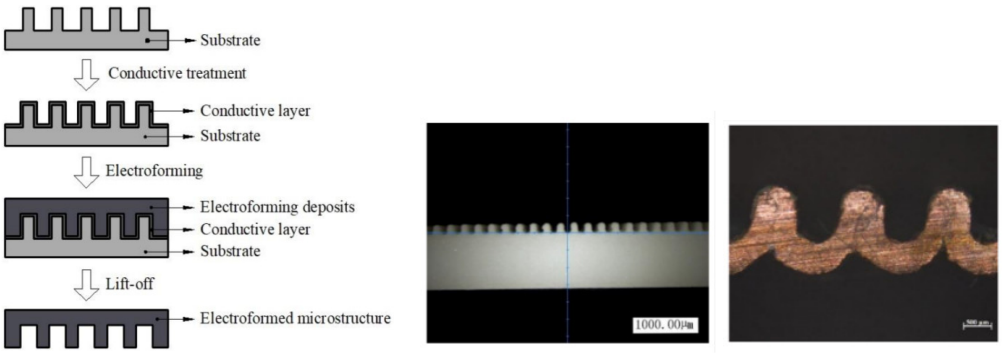


Fig. 2.13. Imágenes de la investigación de Wu et al. (2019)

Kim et al. Llevaron a cabo la electrodeposición de cobre sobre piezas impresas con tecnología 3D por FDM utilizando filamento conductivo de uso comercial. El objeto del estudio era la mejora de forma rápida y sencilla de la conductividad y por tanto del rendimiento de componentes electrónicos impresos en 3D. De los tres modelos de filamento utilizados, solo uno permitió realizar la electrodeposición en un solo paso. A partir de ahí, la electrodeposición permitió no sólo mejorar la conductividad sino la rugosidad superficial de los depósitos [132].

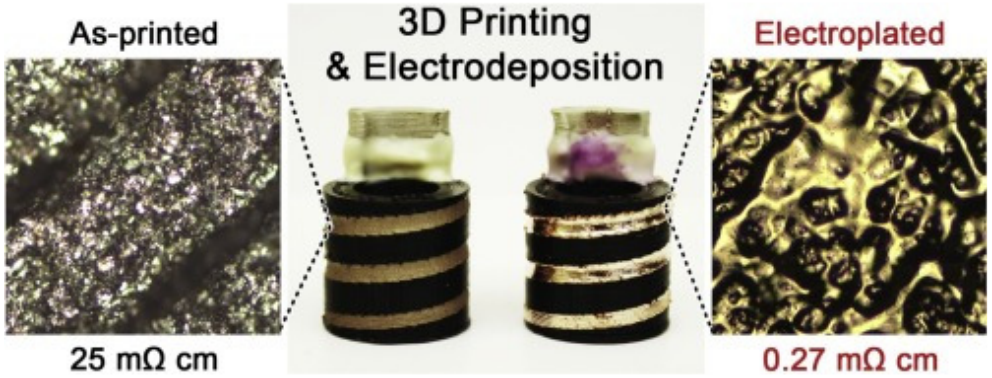


Fig. 2.14. Imagen extraída del estudio realizado por Kim et al. (2019)

Padhi et al. llevaron a cabo el estudio de la viabilidad y el rendimiento de un electrodo electroconformado para proceso EDM fabricado con ABS mediante proceso de fabricación aditiva FDM. El modelo fabricado consistía en una geometría cilíndrica de diámetro 10mm y 25 mm de altura. Para la metalización del modelo de ABS utilizaron tres métodos: Pintura de plata, Inmersión en una solución de plata y la técnica ELP (electro-less plating), que realiza el recubrimiento metálico mediante la reducción química auto catalítica de cationes metálicos en un baño líquido. Este procedimiento tiene la ventaja de no necesitar superficies conductivas para generar la deposición. Los parámetros eléctricos que utilizaron para el proceso de electroconformado fueron 6V DC y 500mA, con una tasa de deposición de 100-120µm /24h. Emplearon 192 horas para el recubrimiento de 1mm de uno de los electrodos. Los autores indican haber realizado con éxito el mecanizado de una pieza de acero de herramientas aleado con cromo. Se realizaron operaciones de desbaste y semiacabado obteniendo profundidades de 3,5mm con un desgaste de solo 8µm [133].

Fig. 2.15. imágenes extraídas del estudio realizado por Padhi et al. (2019)

Danade et al. también utilizó un electrodo fabricado a partir de ABS con tecnología FDM para realizar un mecanizado EDM. En su publicación afirman que el rendimiento de un electrodo revestido mediante proceso de electroconformado con 1mm de espesor de capa, consigue resultados igualmente satisfactorios que un electrodo sólido. En este caso realizaron la electroerosión sobre una superficie de aleación de titanio aluminio y vanadio (TI-Al_6-V_4) [134].

Fig. 2.16. Imágenes extraídas del estudio realizado por Danade et al. (2019)

A la vista de la investigación realizada, estamos ante un campo que ha sido y está siendo explorado de forma intensa. No obstante, los resultados expuestos no permiten establecer un procedimiento estándar que aporte datos reproducibles y resultados predecibles. Al contrario, muestran un escenario plagado de diferentes metodologías, parámetros, procedimientos, equipamientos, adaptaciones, etc. que obligan a extraer lo mejor de cada estudio como base de experimentación, pero con pocas posibilidades de predicción de resultados. Ninguna de las informaciones analizadas se muestra como definitiva.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO

3.1. INTRODUCCIÓN.

Las especificaciones de las piezas que se pretenden conseguir, mediante el proceso de electro conformado, son todo un desafío para los equipos existentes en el mercado. Habitualmente son equipos pensados para geometrías de cierta complejidad, pero con niveles de reproducción menos exigentes. La combinación de geometrías entrantes y salientes, unido a tolerancias dimensionales del orden de la micra necesita de un equipo con un desarrollo más específico.

La geometría del modelo funcional SLA/DLP está limitada por la reproducción de detalles y la escala a la que se pretende reproducir. Por ello, necesita de su sistema de sujeción de diseño específico no disponible en un equipo comercial. Este sistema de fijación debe aportar fiabilidad, flexibilidad y facilidad de manipulación, a la vez que adaptabilidad a posibles variaciones de las especificaciones de diseño.

Las dimensiones del tanque de ensayos igualmente deben adaptarse a las dimensiones de la geometría a fabricar.

La influencia de los factores geométricos en la distribución de la densidad de corriente, tales como la forma de la pieza y la localización relativa de la misma respecto del ánodo, necesitan de todos los avances y mejoras aportadas por la bibliografía. Así, la agitación del baño electrolítico, el filtrado de la solución, el empleo de fuentes de energía pulsada, la inversión de la polaridad, la orientación de los electrodos y el enmascaramiento del cátodo para controlar la deposición entre otros, debían tenerse en cuenta.

3.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.

A continuación, se especifican las necesidades funcionales y operativas más relevantes que se han tenido en cuenta para el desarrollo del equipo:

- Aprovechamiento de la tecnología disponible: gracias a los recursos aportados por el proyecto de investigación del que forma parte la presente tesis doctoral, se disponía de una instrumentación electrónica de alto rendimiento. Era necesario realizar un estudio de sus características y capacidades, en orden a poder incorporarlos como parte del equipo de ensayos.
- Compatibilidad con los elementos existentes: en base al punto anterior, y dada la importancia de estos instrumentos, se hacía fundamental adaptar el resto de los componentes disponibles para poder aprovechar al máximo sus prestaciones.
- Resistencia a la corrosión: la solución electrolítica a utilizar en el desarrollo de los experimentos, a base de sulfato de cobre (*Bright copper plating bath CU 501 de la empresa Heimerle-Meule)*, determina una composición del baño eminentemente ácida, con una alta capacidad de ataque a los componentes en contacto con ella o con sus vapores. Este es un factor muy importante a tener en cuenta en la etapa de diseño.
- Sistema de agitación del baño: lo complejo de la geometría y lo pequeño de la escala de los detalles a conformar, necesitan de métodos alternativos para garantizar un crecimiento uniforme de las cascaras.
- Autonomía: Los procesos de electro conformado se caracterizan por necesitar de grandes intervalos de tiempo para su realización. Esto plantea la posibilidad de un equipo que pueda realizar funciones de forma automática sin la intervención del operador.

- Versatilidad: ofrecer opciones al investigador para modificar el mayor número de parámetros posibles, de aquellos que intervienen de forma significativa en el proceso de electro conformado.
- Portabilidad: permitir que el equipo pueda ser trasladado fácilmente, sin necesidad de hacer adaptaciones y/o intervenciones que generen inconvenientes en su utilización. Que todos los elementos puedan ser desmontados, almacenados y/o transportados sin que afecte a su operatividad o funcionamiento.
- Gestión de datos: permitir la toma y gestión de los datos procedentes del proceso de electro conformado de forma automática, para un mejor análisis de los resultados.
- Sistema de fijación de la probeta de ensayo: diseñar un sistema de fijación que garantice la conductividad, sea de fácil manipulación y permita gobernar parámetros geométricos (distancia y orientación) de posible influencia en el desarrollo de los experimentos.

Estas especificaciones iniciales se acompañaron, durante el desarrollo del trabajo, de otras mejoras que elevaron las prestaciones y posibilidades del equipo. Estas mejoras, como en el desarrollo de cualquier prototipo, fueron surgiendo a medida que se iba experimentando en base a la solución adoptada.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ELECTRO CONFORMADO.

Para dar respuesta a todas las necesidades indicadas, el equipo de electro conformado se ha desarrollado en base a la unión de varios componentes. Cada uno de ellos, con sus diferentes funciones, hacen posible la operatividad del conjunto.

En base a la tecnología disponible se han analizado y estudiado diferentes componentes, equipos e instrumentos ya existentes en el mercado. Tras su evaluación se han seleccionado aquellos que se han considerado de gran utilidad en aplicación al estudio experimental.

De forma paralela se han diseñado, desarrollado, fabricado e implementado componentes de nuevo creación para mejorar las capacidades del conjunto.

A pesar de que las dimensiones del tanque de ensayos y sus componentes han sido adaptadas a la escala de las piezas de esta línea de investigación, los componentes de control son totalmente aplicables a otras condiciones geométricas, incluso para piezas de mayor tamaño.

A continuación, se muestra una imagen de conjunto del equipo desarrollado para la aplicación experimental objeto de esta tesis. En ella se pueden apreciar todos sus componentes en condiciones de servicio.

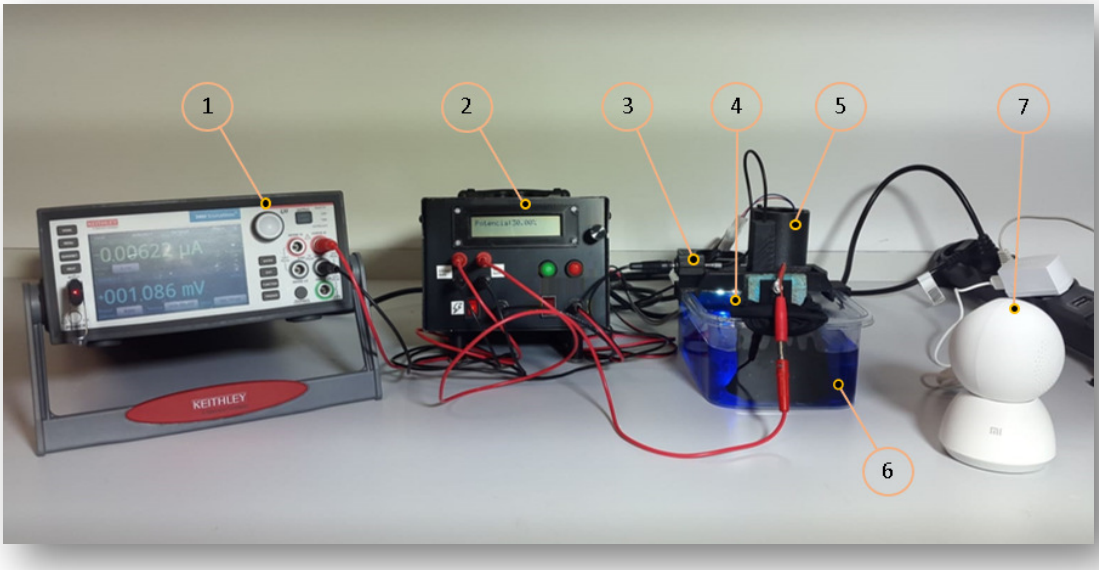


Fig. 3.1. Componentes del equipo de micro-electroconformado.

La tabla 3-1 enumera los diferentes componentes que forman el equipo.

Tabla 3-1. Listado de componentes del equipo de micro-electroconformado

Identificador	Componente
1	Fuente de alimentación
2	DCAB
3	Puente de sujeción
4	Retroiluminación
5	Sistema de agitación del baño
6	Tanque de micro-electroconformado
7	Cámara vigilancia

En los siguientes apartados de este capítulo, se va a realizar una descripción de cada uno de los componentes del equipo de ensayos. Se indicarán sus principales características, la función que desempeñan, así como las diferentes opciones que ofrecen al investigador, para su utilización en el proceso experimental.

Se hará hincapié en aquellos componentes de diseño y desarrollo propio, por su interés como nueva aportación, justificando el porqué de su implementación. Aquellos que tras su desarrollo han sido finalmente fabricados, incluirán los parámetros necesarios para su completa definición en base a las tecnologías de fabricación utilizadas.

3.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

3.3.1.1 Descripción del equipo.

Como fuente de energía para el proceso de electro conformado, se ha seleccionado el equipo *KEITHLEY 2460* SuourceMeter® de *Keithley Instruments*. Es un instrumento de medida a la vez que fuente de alimentación. Es lo que el fabricante denomina “SMU (del inglés; source measure

unit)" [135]. Es capaz de hacer mediciones reales de todos los parámetros presentes en la Ley de Ohm (amperaje, voltaje y resistencia), a la misma vez que proporciona energía con salida configurable en voltaje o amperaje, según las necesidades del usuario. La figura 3.2 muestra una imagen del panel de control del equipo.

Fig. 3.2. KEITHLEY 2460 - vista frontal [135]

Este equipo se ha utilizado como fuente de alimentación a la vez que instrumento de medición en aplicación al proceso de electro conformado. La posibilidad de incluir en un solo equipo la generación de energía, la medición de los parámetros eléctricos del baño, el almacenaje y exportación de los resultados de la medición y la sencillez de interacción con el operador, se presentó como una opción inmejorable en aplicación a los experimentos.

Es un instrumento versátil que cuenta con una exactitud dimensional en sus mediciones que lo hace ideal para el trabajo con todo tipo de componentes y equipos electrónicos. Tal y como establece el fabricante [135], es especialmente adecuado para la caracterización de semiconductores, dispositivos y materiales a escala nano, semiconductores orgánicos, circuitos impresos y otras pequeñas geometrías y dispositivos de bajo consumo.

Presenta una exactitud de medición básica del 0,012% con resolución de 6 dígitos y una sensibilidad con rangos de 20mV y 10nA para fuente y medida.

Contiene modos de programación de secuencias de comandos, así como función "Control Trigger" para desencadenarlos, lo que quizás ha sido una de sus mayores aportaciones al conjunto de experimentos. Esta opción ha permitido parametrizar los ciclos de trabajo y por tanto controlar los parámetros eléctricos del proceso de electro conformado. La importancia de esta aportación será explicada de forma más exhaustiva más adelante.

El instrumento dispone de una interfaz gráfica muy intuitiva con una pantalla táctil de 5" que permite que la interacción con el operador sea rápida y sencilla. La figura 3.3 muestra una imagen de la interfaz gráfica.

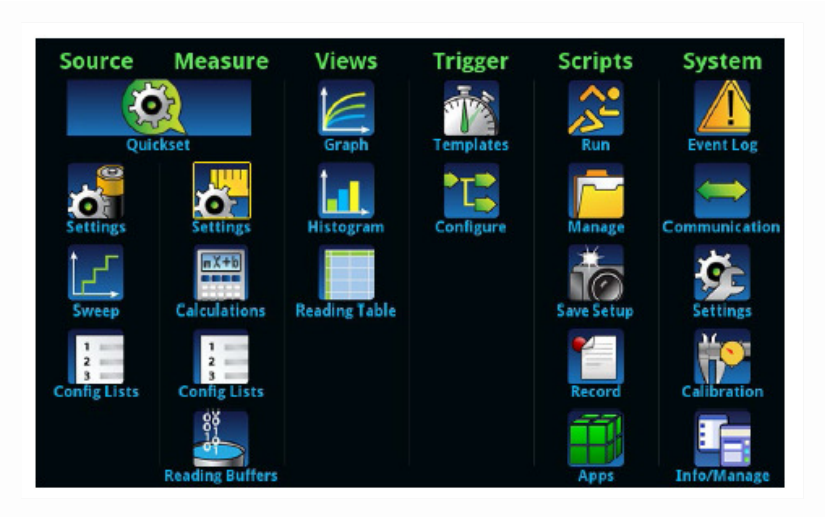


Fig. 3.3. KEITHLEY 2460- Menú de iconos de la pantalla gráfica. [135]

A continuación, la figura 3.4 muestra una imagen de la interfaz gráfica en modo programación. En esta pantalla el operador puede, de forma sencilla, hacer modificaciones en el diagrama de flujo que determina el comportamiento del instrumento, en este caso la alimentación de salida.

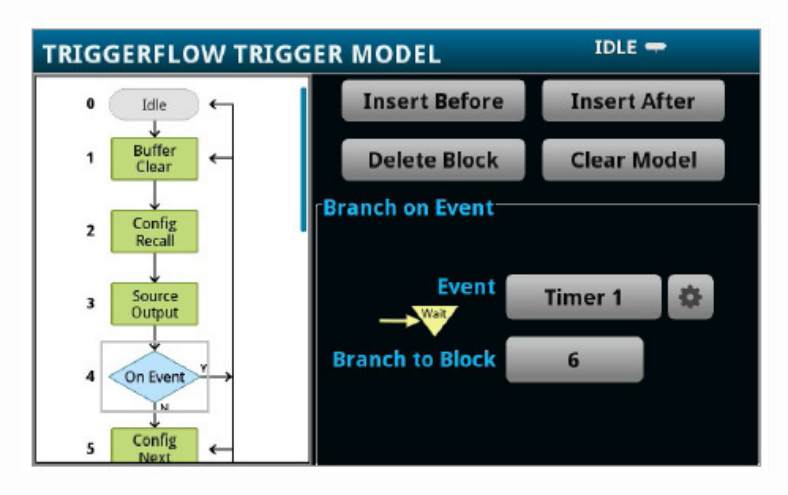


Fig. 3.4. KEITHLEY 2460 – Ejemplo de diagrama de flujo de programa. [135]

En el panel frontal dispone de tomas banana para las conexiones y de puerto de memoria USB para almacenar datos, programaciones, configuraciones de instrumentos y actualización de la unidad. Esta opción ha tenido también gran relevancia en el desarrollo de los experimentos. Ha permitido la extracción de los datos referentes a los parámetros que gobiernan el proceso para su posterior gestión y análisis.

Según el fabricante sus aplicaciones típicas lo hacen ideal para la caracterización corriente o voltaje y la prueba funcional de un amplio rango de equipos electrónicos: [135]

- Materiales semiconductores y semiconductores de potencia
    - SiC, GaN.
    - Transistores IGBT.
    - Transistores MOSFETs de potencia.
    - Tiristores.
- Equipos de potencia
    - Conversores DC-DC.
    - Chips de gestión de energía de telecomunicaciones.

- Electroquímica
    - Ciclos de galvanizado.
    - Voltimetría cíclica.
    - Ciclos de carga y descarga de baterías.
    - Electrodeposición.
- Generación de energía
    - Células solares.
    - Baterías.
- Consumo eficiente de energía
    - LEDs/AMOLEDs.
    - Módulos para la automoción.
    - Módulos para la administración de energía.

El KEITHLEY 2460 puede mostrar directamente en pantalla datos de medición, barridos y trazado completo de los datos. Esto permite al operador visualizar en tiempo real el comportamiento de los parámetros eléctricos de ensayo.

Fig. 3.5. KEITHLEY 2460 - Pantalla de medición. [135]

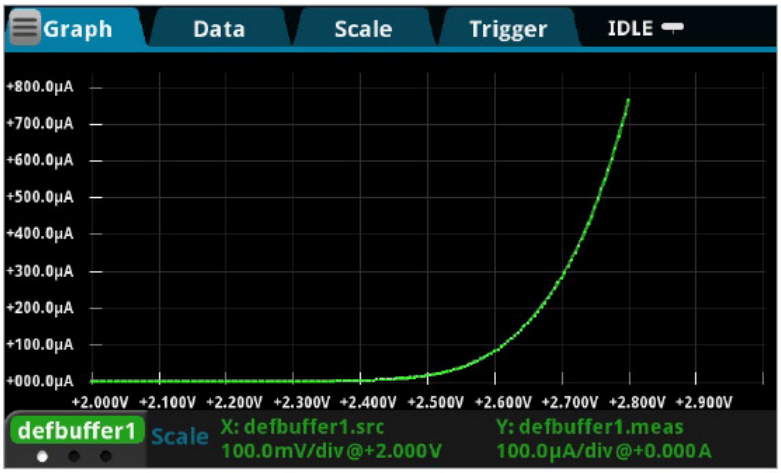
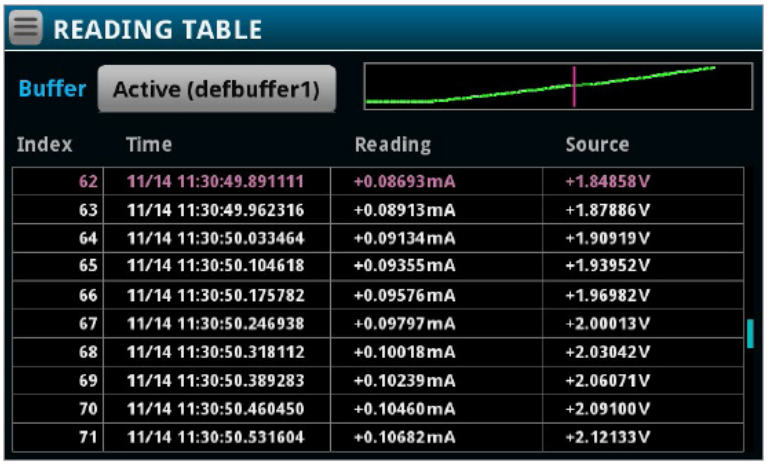


Fig. 3.6. KEITHLEY 2460 - Pantalla de representación de datos. [135]



Index	Time	Reading	Source
62	11/14 11:30:49.891111	+0.08693mA	+1.84858V
63	11/14 11:30:49.962316	+0.08913mA	+1.87886V
64	11/14 11:30:50.033464	+0.09134mA	+1.90919V
65	11/14 11:30:50.104618	+0.09355mA	+1.93952V
66	11/14 11:30:50.175782	+0.09576mA	+1.96982V
67	11/14 11:30:50.246938	+0.09797mA	+2.00013V
68	11/14 11:30:50.318112	+0.10018mA	+2.03042V
69	11/14 11:30:50.389283	+0.10239mA	+2.06071V
70	11/14 11:30:50.460450	+0.10460mA	+2.09100V
71	11/14 11:30:50.531604	+0.10682mA	+2.12133V

Fig. 3.7. KEITHLEY 2460 - Pantalla de lectura de datos. [135]

3.3.2. DISPOSITIVO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE AGITACIÓN DEL BAÑO (DCAB).

3.3.2.1. Descripción del equipo.

Se trata de un equipo de desarrollo propio, concebido a partir de componentes electrónicos de bajo coste. Se ha concebido así con el objetivo de que pueda ser reproducible en cualquier laboratorio y de esta manera se pueda adaptar a las condiciones particulares de diferentes líneas de experimentación.

El DCAB es un aparato electrónico que tiene la función principal de gestionar la agitación del baño electrolítico. No solo se encarga de controlar el caudal de la bomba de impulsión, sino que además sirve de interfaz entre la fuente de alimentación y los componentes del baño electrolítico. Por último, actúa como equipo de potencia para la retroiluminación LED.

La figura 3.8 muestra una imagen del DCAB en condiciones de servicio.

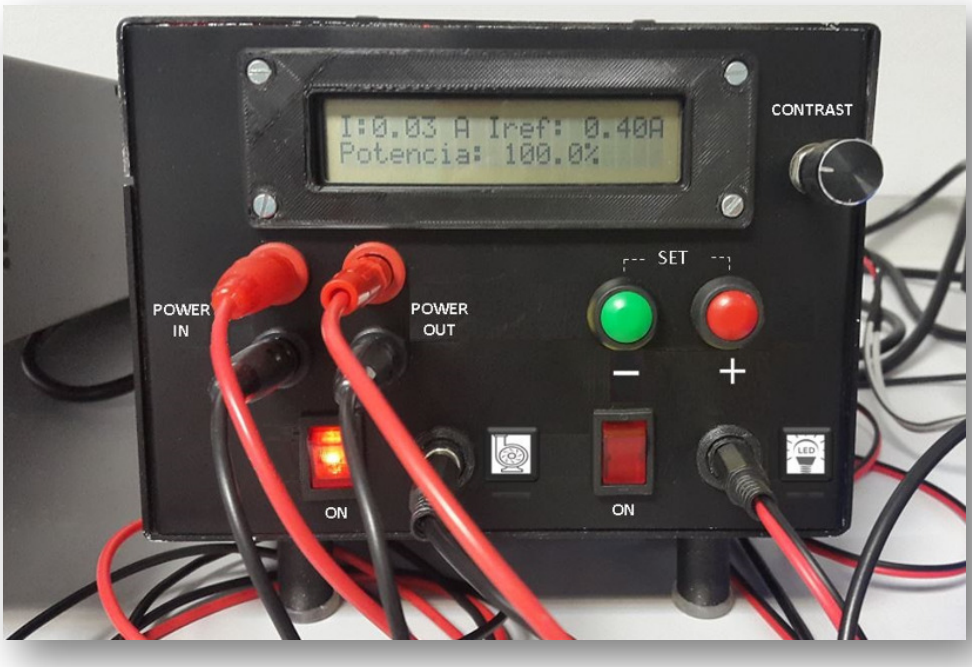


Fig. 3.8. Dispositivo de control automático de agitación del baño electrolítico (DCAB).

Sus principales características son las siguientes:

- Entrada AC universal / Full range.
- Protección contra cortocircuito mediante fusible de vidrio 0,5A
- Refrigeración por convección mediante libre circulación de aire.
- Indicador Led para el encendido del equipo.
- Indicador Led para el encendido de la retroiluminación Led (output 24VDC).
- Salida múltiple DC 24V/1,5Ah
- Dos parejas (positivo + negativo) de tomas banana en el panel frontal.
- Dos tomas output 24V en panel frontal.
- Pantalla LCD alfanumérica de interfaz con el usuario.
- Botones en panel frontal para configuración de funcionamiento.
- Posibilidad de control de potencia de salida en modo automático o manual.
- Dimensiones generales: 205mm x 170mm x 125mm (largo x ancho x alto).

La figura 3.9 muestra una imagen de sus componentes principales.

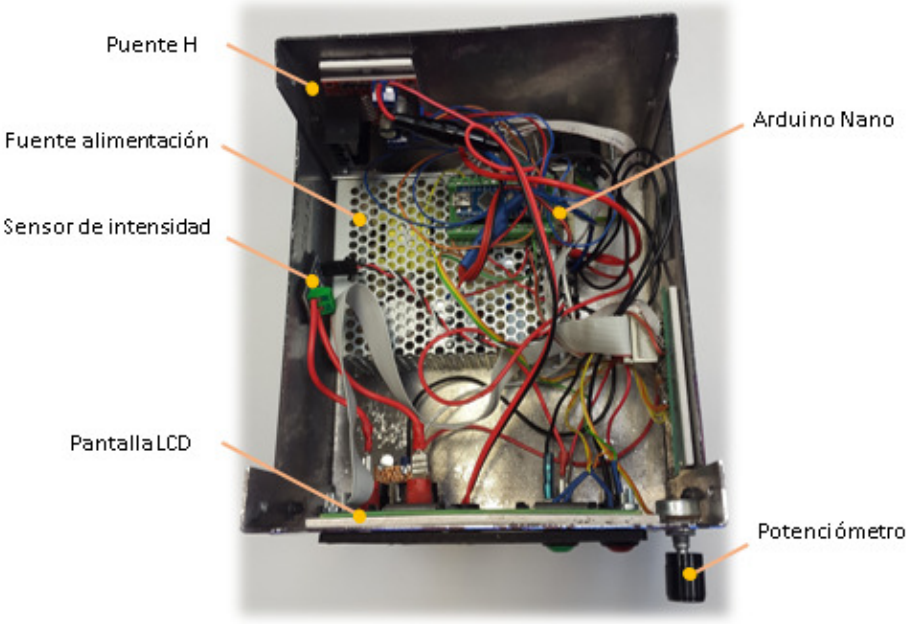


Fig. 3.9. Componentes del DCAB.

3.3.2.2. Componentes.

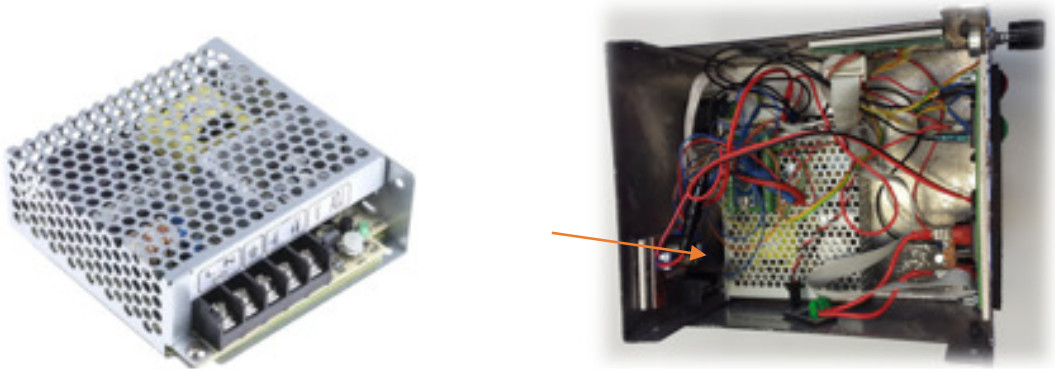
A continuación, se detallan los componentes del equipo de control.

3.3.2.2.1. Fuente de alimentación.

Este componente es el encargado de proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento del equipo. Externamente suministra energía para el funcionamiento de la retroiluminación LED y la bomba de agitación del baño, e internamente aporta energía a los componentes electrónicos de control.

Sus principales características son:

- Denominación comercial: Mean Well RS-50-24
- Tensión de entrada: 220V AC
- Tensión de Salida: 24V DC
- Modo de trabajo: conmutado (SMPS) integrado
- Potencia de salida: 52.8W
- Rango de corriente de salida: 0 – 2.2A



(a) (b)

Fig. 3.10. Fuente de alimentación. (a) Vista general. (b) Vista instalada.

3.3.2.2.2. Puente H.

El puente H es un componente electrónico habitualmente utilizado en automatización de sistemas para el control de cargas de salida, como es el accionamiento de motores de corriente continua. Dependiendo de la señal que se introduzca a través de las entradas de control, se puede modificar el sentido de giro de un motor. También, con la ayuda de programación y modificando el ciclo de trabajo mediante variables, se puede controlar la tensión de salida hacia el motor. Esto se traduce en la posibilidad de variar de su velocidad de giro.

En aplicación a nuestro equipo de laboratorio, esta última posibilidad se planteó como una interesante aportación sobre el diseño. Permitiría variar el caudal de la bomba de impulsión y por tanto el nivel de agitación del baño electrolítico.

Se ha seleccionado el modelo L298N cuyas principales especificaciones técnicas se indican a continuación:

- Denominación: placa controladora L298N-HW-095
- Dimensiones: 43mm x 43mm x 27mm (largo x ancho x alto).
- Canales de potencia: 2
- Voltaje de salida: 5V - 35V.
- Potencia máxima: 25W.
- Intensidad de salida máxima: 2A
- Tensión lógica: 5V.

La figura 3.11. muestra en imágenes el puente H

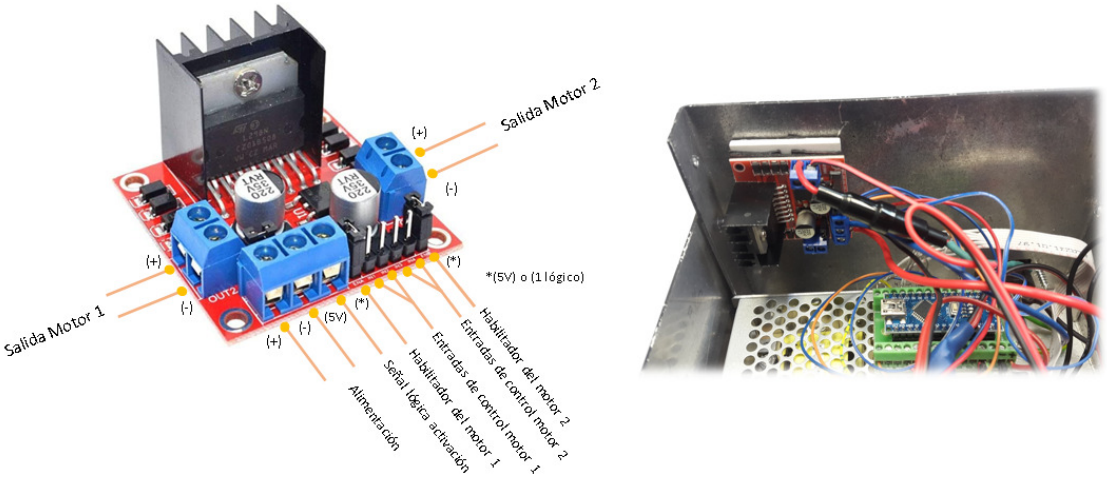


Fig. 3.11. Puente H- L298N. (a) esquema de conexión. (b) Vista instalado.

El puente H - L298N trabaja en su configuración estándar con alimentación y cargas de salida de 12VDC. Debido a que la tensión de salida de trabajo de la bomba es 24VDC, se hace necesario conectar una tensión externa de 5V para la entrada lógica y así evitar dañar el componente. Esta configuración está prevista por el fabricante y así lo establece entre sus opciones de conexión.

Independientemente y por iniciativa de diseño propia, se le ha dotado de un sistema de protección mediante fusible de cristal de 0,5A alojado en portafusibles aéreo. Ese componente se ha instalado en conexión sobre el positivo de la salida de potencia para evitar posibles sobrecargas.

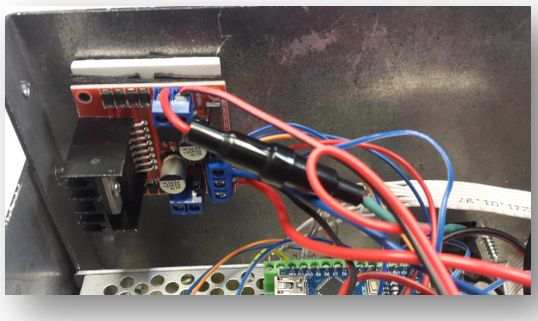


Fig. 3.12. Fusible de protección.

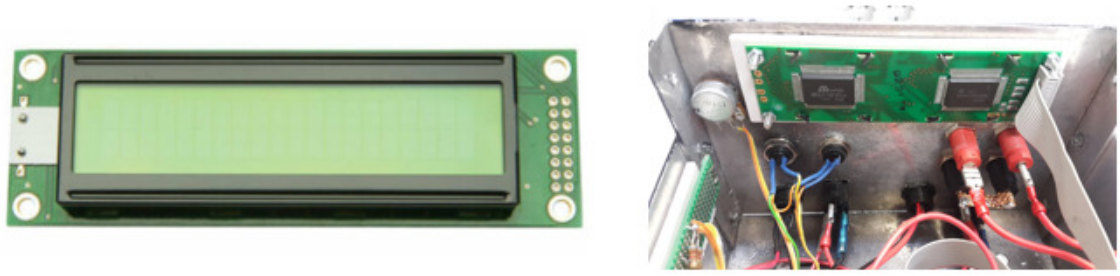
3.3.2.2.3. Pantalla LCD.

Es el componente de interacción entre el equipo y el operador. Se ha implementado una pantalla de cristal líquido (Display LCD) para la visualización de datos. Es una pantalla monocroma que permite la visualización de 20 caracteres alfanuméricos distribuidos en 2 filas (2x20 caracteres).

Para la mejora de la lectura de datos se le incorporó un potenciómetro manual para el control del contraste.

Sus especificaciones técnicas más relevantes son:

- Fabricante: Winstar
- Modelo: WH2002A-YYH-JT
- Dimensiones: 116mm x 37mm x 11mm (largo x ancho x alto)
- Dimensiones de la zona de visualización: 85mm x 18,6mm (largo x alto)
- Dimensiones de los caracteres: 3,2mm x 5,5mm (largo x alto)
- Modo de pantalla: transreflectivo
- Tensión de alimentación: 5V



(a) (b)

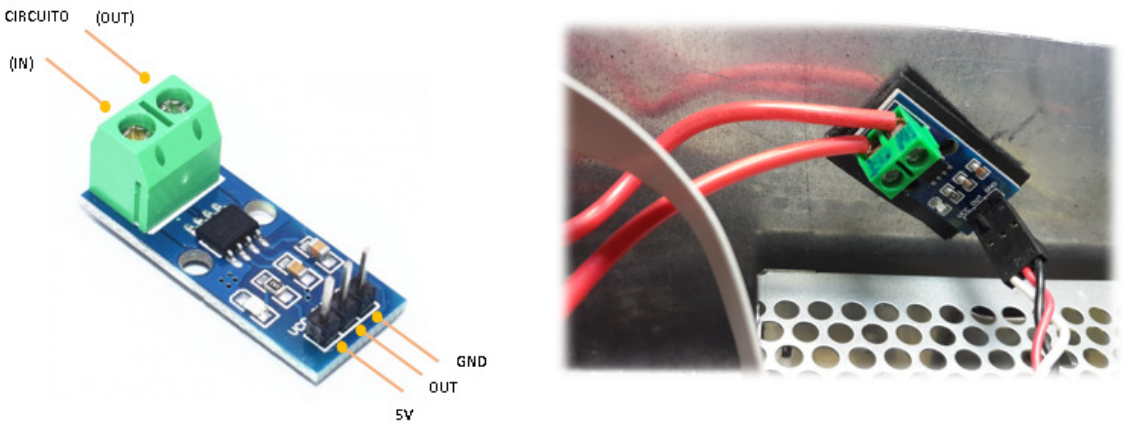
Fig. 3.13. Pantalla LCD WH2002A. (a) Vista general. [3] (b) vista instalada.

3.3.2.2.4. Sensor de intensidad.

Este componente electrónico es un módulo que realiza la función de amperímetro. Permite medir la corriente que circula a través de un circuito tanto de corriente alterna como de corriente continua. En aplicación al equipo de ensayos es el componente que se encarga de medir y devolver el valor de corriente que circula entre el ánodo y el cátodo.

Sus especificaciones técnicas más relevantes son:

- Fabricante: Allegro MicroSystems
- Modelo: ACS712-05A
- Dimensiones: 31mm x 14mm (largo x ancho)
- Tensión de trabajo: 4.5V a 5.5V
- Sensibilidad de salida: 185mV/A
- División de escala: 4,8mA
- Tiempo de respuesta: 5 µs
- Error Total Salida: 1.5% a T_{amb} = 25°C



(a) (b)

Fig. 3.14. Sensor de intensidad ACS712. (a) esquema de conexión. (b) vista instalado.

3.3.2.2.5. Placa electrónica (PCB) Arduino.

Este componente hace la función de cerebro del equipo de control. Mediante su programación se consigue gestionar el funcionamiento del DCAB. Se seleccionó una PCB Arduino en base a la idea de utilizar componentes de bajo coste y que puedan ser fácilmente reproducibles en otros laboratorios.

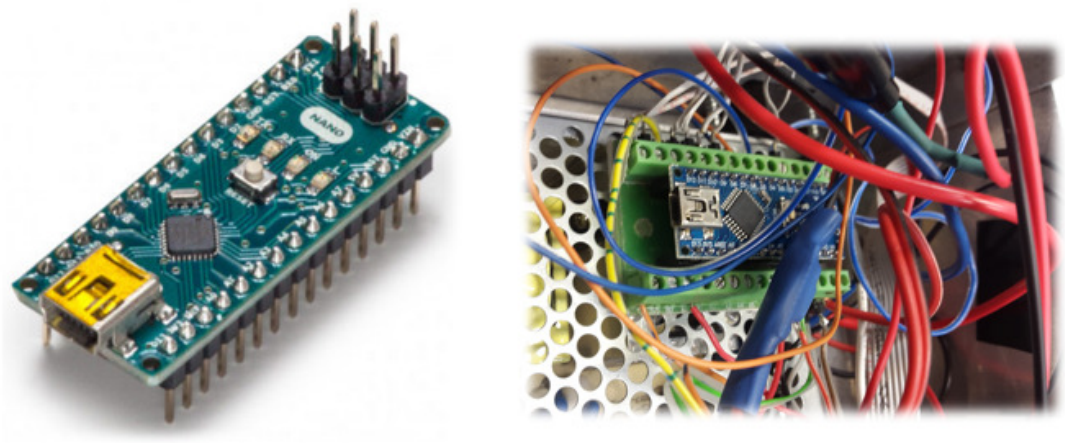
"Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla" [136]

En aplicación al equipo de control, se seleccionó el Arduino nano 3.0 ATMEGA328P por sus funcionalidades idénticas al Arduino UNO, pero con unas dimensiones menores que permiten la fácil incorporación al box del equipo de control. Se instaló sobre una placa adaptadora con conexiones estándar.

Especificaciones técnicas: [136]

- Microcontrolador: ATMega328
- Dimensiones: 43,5mm x 18,7mm (largo x ancho)
- Tensión de trabajo: 5V
- Tensión de alimentación (Recomendado): 7-12V
- Entradas analógicas: 6
- Entradas y salidas digitales: 14 (6 son PWM)
- Memoria Flash: 32KB
- EEPROM: 1KB

- Frecuencia de trabajo: 16MHz
- Conexión: mini USB



(a) (b)

Fig. 3.15. Arduino nano 3.0 ATMEGA328P. (a) Vista general. (b) Ubicación.

3.3.2.2.6. Componentes de conexión.

Para completar el box del equipo de control, se hizo necesario incorporar una serie de componentes estándar, para poder realizar la conexión con los otros componentes del equipo de ensayo, así como para la interactuación con el operador:

- Conector DC de chasis para bomba y retroiluminación LED
- 2 pulsadores de control (verde + rojo) para chasis.
- 4 conectores banana hembra para chasis.
- Interruptor encendido 220V con indicador luminoso para chasis.
- Interruptor encendido 24V con indicador luminoso para chasis.
- Conector IEC C14 para chasis.

(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 3.16. Componentes para chasis. (a) Conector banana hembra. (b) Pulsador. (c) Conexión DC. (d) Interruptor. (e) Conector IEC C14.

3.3.2.2.7. Caja de control.

La caja de control (box) es el elemento para el soporte y alojamiento de todos los componentes del controlador de la bomba. Es un elemento de diseño, desarrollo y fabricación propios. Está compuesto por 4 piezas: base, panel frontal, panel trasero y tapa.

Está fabricado en aluminio de 1,5mm de espesor y para su conformación se utilizaron procesos de cizallado, fresado CNC, taladrado, doblado y unión mecánica. Los paneles trasero y delantero necesitaron de operaciones de fresado, para mecanizar los huecos para los diferentes componentes. Los paneles y la base se unieron mediante unión mecánica remachada.

La tapa se fija al cuerpo mediante unión mecánica atornillada. Esto facilita el montaje y desmontaje en caso de: avería, operaciones de mantenimiento o programación de la placa Arduino. El acoplamiento cuerpo-tapa se diseñó con una franja de 10mm de separación en los laterales para mejorar la ventilación de los componentes electrónicos.

Sus dimensiones generales son 170mm x 125mm x 205mm (largo x ancho x fondo).

Fig. 3.17. Imagen del box.

3.3.2.3. Funcionamiento.

El DCAB se encarga de modificar la velocidad de giro de la bomba mediante la regulación del voltaje de salida. Cuenta con dos modos de funcionamiento: modo manual y modo automático.

En modo manual es necesaria la intervención del operador para aumentar o disminuir la velocidad de giro y, por lo tanto, la aportación de caudal al baño electrolítico. Para ello dispone de dos botones de pulsación en el panel frontal (rojo y verde). Pulsando el botón rojo aumenta el voltaje de salida del equipo y pulsando el botón verde lo disminuye. Si no se opera sobre los botones, el equipo mantiene el último valor consignado.

Para hacer más sencilla la lectura por parte del operador, el valor de consigna se muestra en la pantalla en forma de porcentaje. Este valor expresa una proporción sobre la potencia nominal de la bomba.

La figura 3.18 muestra una imagen de la pantalla de visualización en condiciones de servicio para modo manual.

Fig. 3.18. Pantalla de visualización del DCAB. Ejemplo de visualización en modo manual.

En modo automático no es necesaria la intervención del operador para el correcto funcionamiento del equipo, excepto para modificar el valor de consigna. En este modo de funcionamiento, el equipo está continuamente tomando lecturas de la intensidad de corriente que pasa por el circuito y las compara con la intensidad de referencia programada. En función del resultado, aumenta o disminuye la potencia de salida. Valores inferiores al valor programado, provocaran un aumento del caudal de agitación en pasos incrementales del 10% hasta conseguir el equilibrio. De la misma manera, valores de las lecturas superiores al valor de consigna programado, provocaran una disminución de ese caudal, hasta un mínimo del 10%.

En cualquier momento el operador puede modificar el valor de consigna actuando sobre los botones rojo o verde (aumentar o disminuir). La figura 3.19 muestra una imagen de la pantalla de programación del valor de consigna.

Fig. 3.19. Pantalla de visualización del DCAB. Programación del valor de consigna.

Cuando el equipo está en modo automático, además de la lectura de potencia, la pantalla muestra los valores actuales de intensidad de corriente y el valor de referencia consignado. La figura 3.20 muestra la pantalla de visualización en condiciones de servicio para modo automático.

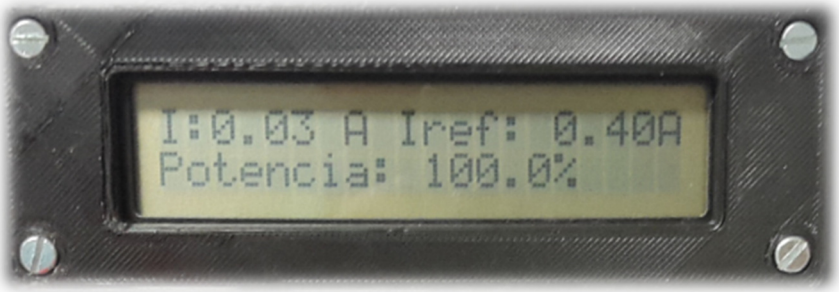


Fig. 3.20. Pantalla de visualización del DCAB. Ejemplo de visualización en modo automático.

Para pasar de modo de funcionamiento manual a modo de funcionamiento automático o viceversa, el operador debe pulsar los dos botones (rojo + verde) a la vez y mantenerlos pulsados durante 3 segundos. De esta manera el equipo entrará en modo “SET” o programación.

Una vez en modo programación, la pantalla parpadea solicitando la forma de funcionamiento. Pulsando el botón rojo se puede navegar entre los dos modos de funcionamiento de forma cíclica. Cuando aparezca en pantalla el modo de funcionamiento deseado se deja de actuar sobre los botones y quedará seleccionado.

Durante la fase de pruebas se detectaron diferencias entre las lecturas aportadas por el DCAB y las lecturas aportadas por el KEITHLEY 2460 SourceMeter®. No habiendo dudas en cuanto a la fiabilidad del segundo de los instrumentos, se planteó la necesidad de hacer una corrección de las lecturas aportadas por el sensor de intensidad del DCAB.

Para ello, se combinaron los dos instrumentos en condiciones de servicio y se fueron modificando las intensidades de salida del KEITHLEY 2460 SourceMeter® en el intervalo de 100mA a 1A. Se seleccionó este intervalo por ser el rango de trabajo en el que se desarrollaban los experimentos.

Se utilizaron 14 puntos de medición y se compararon las lecturas de los dos instrumentos en orden a determinar la cuantía de las diferencias. Con los datos obtenidos se realizaron estadísticas de la regresión y análisis de la varianza para determinar el valor de la corrección.

La tabla 3-2 muestra los datos empíricos del proceso de corrección.

Tabla 3-2. Lecturas durante el proceso de corrección del sensor de intensidad del DCAB.

Generador (A)	Lecturas Control (A)	Lecturas Control sin corrección (A)	Corrección (mA)
0,010	0,040	-0,050	0,060
0,020	0,050	-0,040	0,060
0,030	0,060	-0,030	0,060
0,060	0,090	0,000	0,060
0,080	0,110	0,020	0,060
0,090	0,130	0,040	0,050
0,100	0,140	0,050	0,050
0,200	0,240	0,150	0,050
0,300	0,350	0,260	0,040
0,500	0,560	0,470	0,030
0,700	0,770	0,680	0,020
0,800	0,870	0,780	0,020
0,900	0,970	0,880	0,020
1,000	1,080	0,990	0,010

La figura 3.21 muestra una representación gráfica con la curva de regresión de corrección de las lecturas.

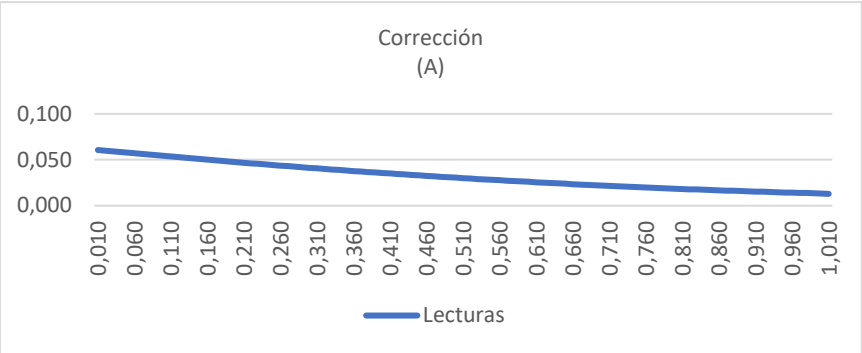


Fig. 3.21. Curva de regresión para corrección de las lecturas.

3.3.2.4. Aplicación de los modos de trabajo a los experimentos.

Durante la realización de diferentes tandas de experimentos se verificó la necesidad y la utilidad de ambos modos de funcionamiento. La posibilidad de trabajar en modo manual o modo automático aporta versatilidad al equipo y por ende al ensayo. Permite al investigador decidir qué opción se adapta mejor al tipo de ensayo que va a realizar.

El modo manual plantea su utilidad desde el punto de vista de experimentos estáticos, donde se necesiten niveles de agitación constantes o incluso inexistentes. El investigador puede realizar ensayos bajo condiciones de repetitividad en diferentes series, sin que la agitación sea un parámetro que aporte variabilidad. A partir de ahí el investigador tiene a su disponibilidad la opción de modificación de las condiciones de agitación para establecer niveles de comparación. El nivel de agitación se convierte en un parámetro de estudio en diferentes series de ensayos.

La posibilidad de interacción con el equipo, no obstante, permite la modificación de la agitación en el momento que se desee. Esto aporta al investigador una infinidad de posibilidades a la hora de personalizar sus ensayos.

En modo manual, por tanto, el operador controla en todo momento que nivel de agitación quiere utilizar.

El modo automático deja que sea el equipo quien controle la agitación del baño. Se establecen unos valores consigna y el equipo realiza modificaciones hasta conseguir equilibrarlos. La posibilidad de esta opción se planteó durante el desarrollo de algunas series de experimentos. En ellos se detectaron caídas de corriente de circulación a través del baño en diferentes etapas de la deposición. Se pudo comprobar, en algunos casos, que estas caídas de amperaje podían ser compensadas mediante cambios en la agitación del baño. Se comprobó que la agitación activaba la circulación de los iones y reestablecía los valores de corriente.

La aparición de estas caídas de rendimiento podía provocar la interrupción del proceso de deposición o cuando menos generar piezas defectuosas. En la medida en que esto sucediera, sin la vigilancia del operador, no era posible revertir la situación.

Tras estas experiencias, se planteó la posibilidad de que de forma automática el equipo de ensayos pudiera nivelar las condiciones eléctricas del sistema y así evitar fallos en el proceso de deposición. Dado que el equipo es capaz de medir y almacenar los datos eléctricos que recaba de cada experimento, aportaría información de en qué momento y en qué condiciones se producen esas anomalías y si eran realmente recuperables.

En el caso que no se hubieran presentado anomalías y los valores de corriente registrados no hubieran descendido por debajo del valor de consigna, el investigador se encontraría con una serie de ensayos estables, información que también sería de gran interés durante el desarrollo de la investigación.

En modo automático, por tanto, el equipo se pone al servicio del investigador, para abordar un abanico de nuevos experimentos, donde el estudio de la aparición de estas anomalías pueda tener un patrón de interesante seguimiento.

3.3.3. PUENTE DE SUJECIÓN.

3.3.3.1. Descripción.

El puente de sujeción es un componente de diseño propio. Su función es la de soportar el modelo funcional sobre el que se va a realizar la deposición y conectarlo al resto de componentes, cerrando el circuito eléctrico necesario para el funcionamiento del proceso.

Su necesidad surgió a partir de las características geométricas de los diferentes modelos de ensayo, las cuales requerían un sistema de fijación y conexión adaptado.

Como parámetros de diseño se plantearon:

- Adaptación a las dimensiones del tanque.
- Adaptación a las dimensiones de las piezas de ensayo.
- Sistema de sujeción de las piezas de fácil operación.
- Sistema de sujeción de las piezas conductor de la corriente eléctrica.
- Posibilidad de regulación en altura.
- Posibilidad de regulación de la posición respecto al ánodo tanto en distancia como en orientación.
- Facilidad para la conexión eléctrica con los componentes que generan la energía.
- Facilidad para el acople y desacople en el tanque. Debía tenerse en cuenta las posibles intervenciones de limpieza, vaciado, llenado, y/o traslado de este.
- Material resistente a la corrosión provocada por la interacción con el baño electrolítico.

A partir de estos parámetros se diseñó un sistema de fijación con estructura tipo puente bi-apoyado, con posibilidad de desplazamiento por sistema de corredera. Sus dimensiones generales se establecieron en 154mm x 32mm x 80mm (largo x ancho x alto). El puente de

sujeción está compuesto por 4 elementos: estructura soporte, mecha, anillo de desplazamiento y bulón de bloqueo.

La figura 3.22 muestra una imagen del modelado de puente de sujeción.

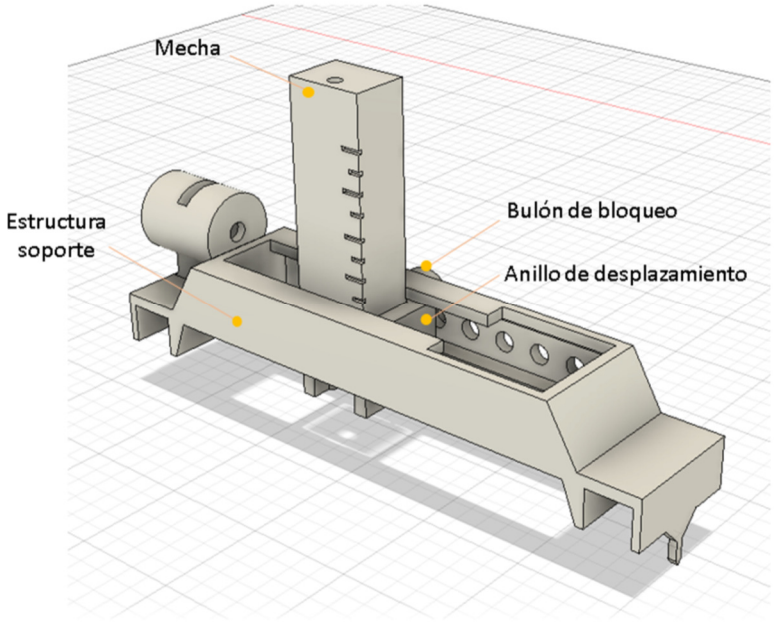


Fig. 3.22. Modelado del puente de sujeción.

3.3.3.2. Componentes.

3.3.3.2.1. Estructura soporte.

Es el componente estructural. Cumple con tres funciones fundamentales:

- Soporte del resto de componentes.
- Medición sobre la escala del eje horizontal.
- Sistema de desplazamiento del conjunto.

La figura 3.23 muestra una imagen del modelado del puente de sujeción con los elementos característicos más importantes.

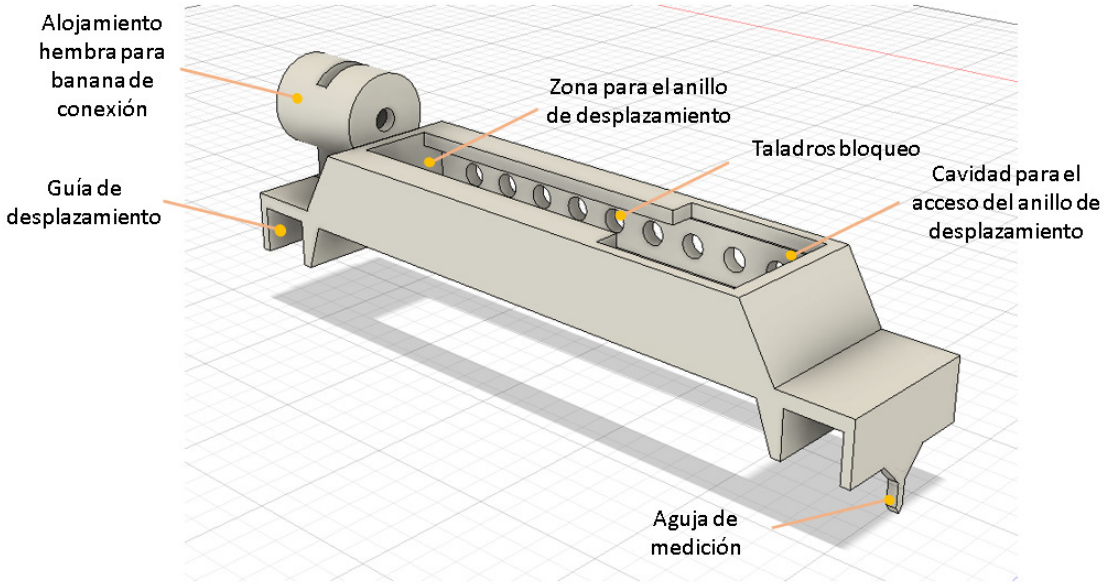


Fig. 3.23. Modelado de la estructura soporte.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: Si, en todos sitios.
- Tiempo de impresión: 3 horas 31 minutos
- Cantidad de material: 38gr – 11,41m

La figura 3.24 muestra la posición de impresión del soporte. Debido a lo complicado de la geometría, las diferentes posiciones de impresión generaban inconvenientes con el desarrollo de los soportes. Finalmente se decidió optar por una posición acostada sobre el plano delantero. La existencia de los taladros en la cara opuesta permitía una cierta mejora del tiempo de impresión y una mejor adherencia sobre la placa de impresión.

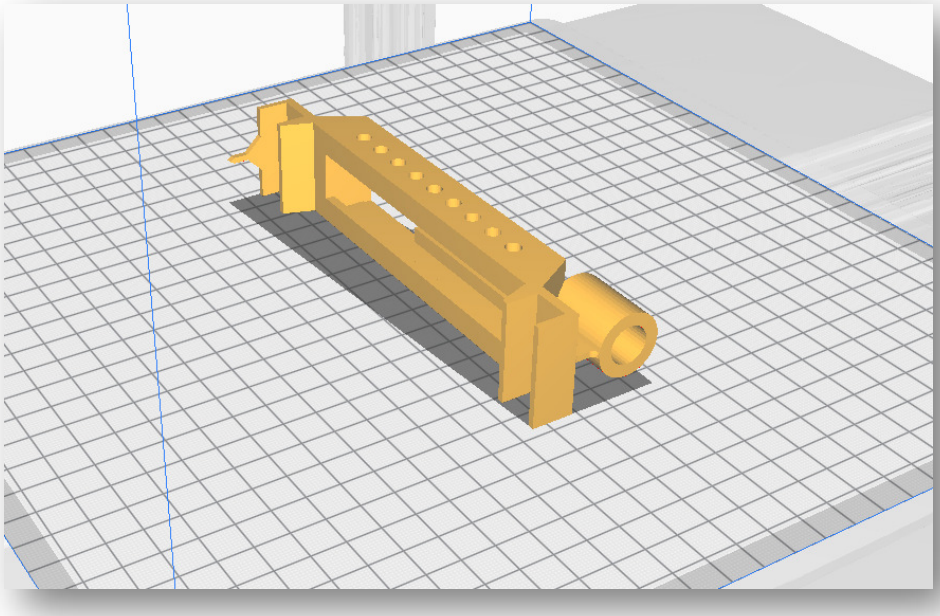


Fig. 3.24. Posición de la estructura soporte sobre la placa de impresión.

3.3.3.2.2. Mecha

La mecha es el componente que interacciona directamente con el modelo funcional. Tiene como labores fundamentales:

- El soporte de la probeta de ensayo.
- El alojamiento del sistema de fijación de la probeta de ensayo.
- El posicionamiento y medición en altura del sistema.
- El alojamiento del cable de conexión del circuito de alimentación.

- Servir de sistema de desplazamiento en sentido transversal para modificar la orientación con respecto a la posición del ánodo.

Se incorporó por diseño una escala de medición regular y discreta en el eje vertical. Esta escala se materializa mediante unas muescas rectangulares de dimensiones 5mm x1mm (largo x alto) practicadas en la esquina derecha de la pieza. La división de escala es de 5mm. De esta manera se puede medir la altura del modelo con respecto al fondo del tanque.

La figura 3.25 muestra varias imágenes de la mecha y sus elementos más importantes.

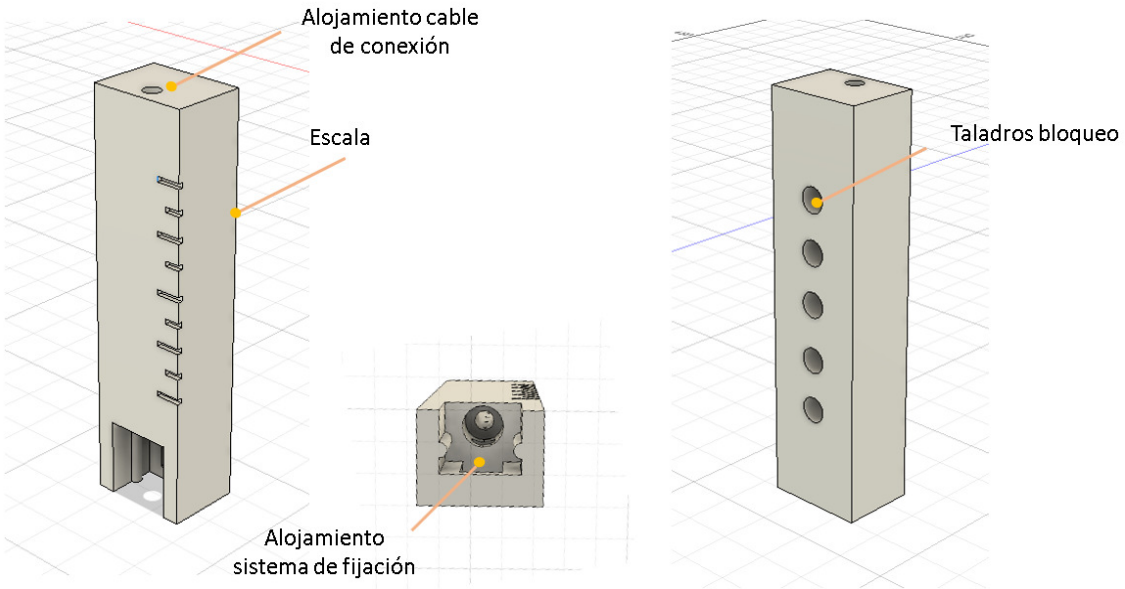


Fig. 3.25. Modelado de la mecha. (a) Vista frontal. (b) Vista planta. (c) Vista trasera.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm

- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: no.
- Tiempo de impresión: 1 horas 21 minutos
- Cantidad de material: 16g – 4,69m

La figura 3.26 muestra la posición de la mecha sobre la placa de impresión.

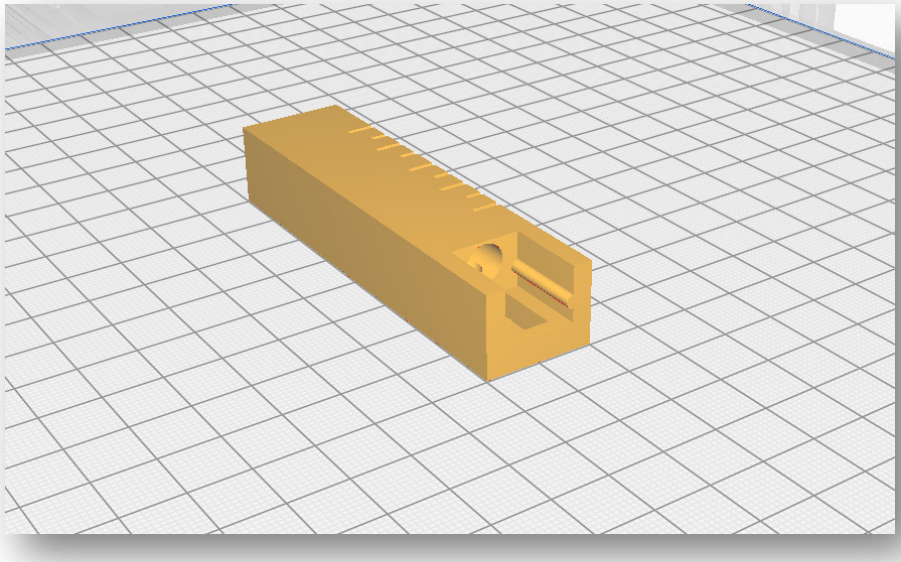


Fig. 3.26. Posición de la estructura soporte sobre la placa de impresión.

3.3.3.2.3. Anillo de desplazamiento.

El anillo de desplazamiento tiene como función el guiado de la mecha en el interior de la estructura soporte en los desplazamientos laterales. Sus dimensiones son 30mm x 25mm x 10mm (largo x ancho x alto) y dispone de un taladro que permite el bloqueo una vez se selecciona la posición deseada.

La figura 3.27 muestra una imagen del modelado del anillo de desplazamiento.

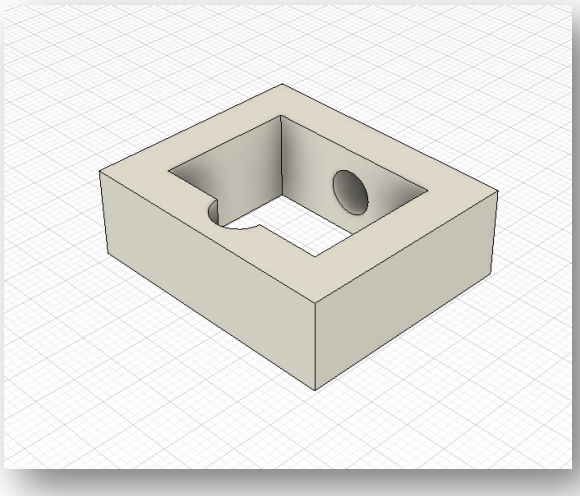


Fig. 3.27. Modelado del anillo de desplazamiento.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%

- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: no.
- Tiempo de impresión: 22 minutos
- Cantidad de material: 4g – 1,26m

La figura 3.28 muestra la posición del anillo de desplazamiento sobre la placa de impresión.

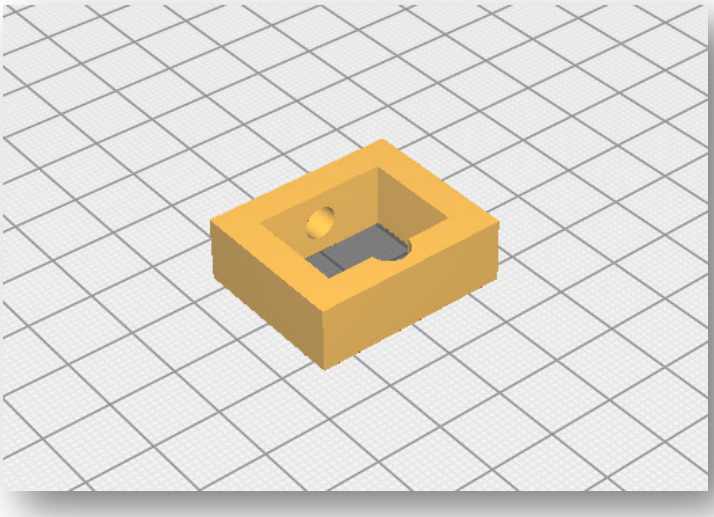


Fig. 3.28. Posición del anillo de desplazamiento sobre la placa de impresión.

3.3.3.2.4. Bulón de bloqueo.

Este componente tiene la función de bloquear tanto la posición horizontal como la vertical del conjunto. Las dimensiones del vástago son Ø4,5x18mm y dispone de un taladro que permite el bloqueo una vez se selecciona la posición deseada. Cuando está en posición, pasa a través de los taladros existentes en la estructura soporte y en el anillo de desplazamiento para insertarse en la mecha.

La figura 3.29 muestra una imagen del modelado del anillo de desplazamiento.

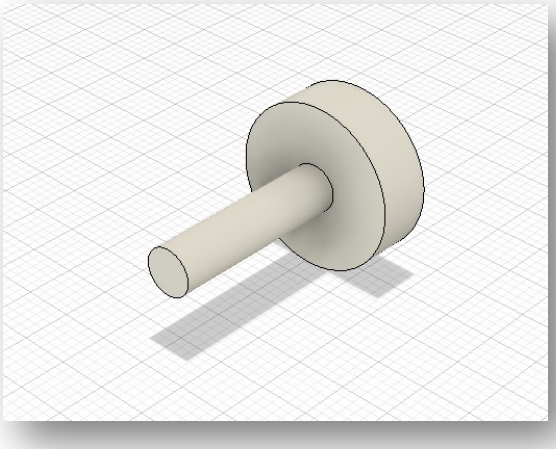


Fig. 3.29. Modelado del bulón de bloqueo.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: no.
- Tiempo de impresión: 9 minutos
- Cantidad de material: 1g – 0,38m

La figura 3.30 muestra una imagen de la posición de impresión del bulón.

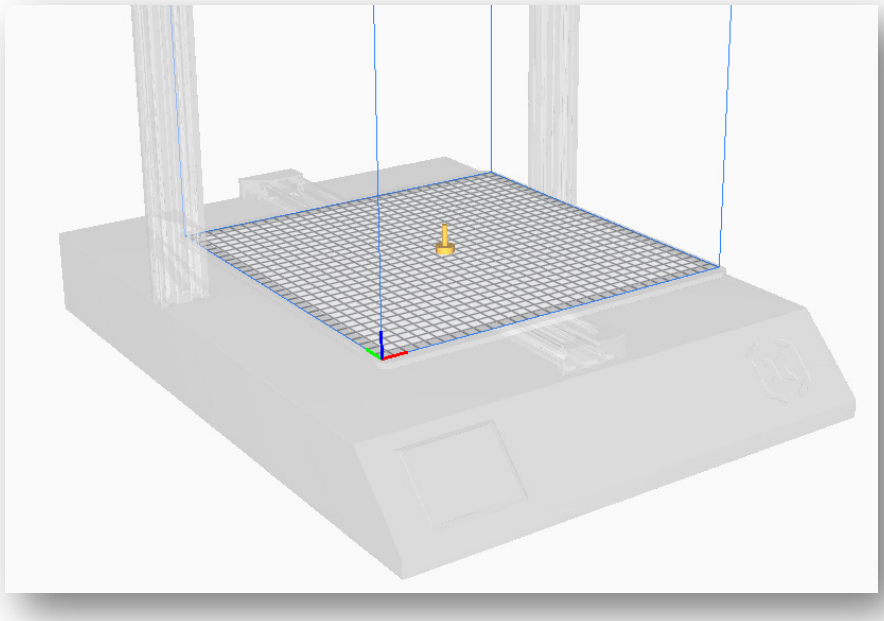


Fig. 3.30. Posición del bulón de bloqueo sobre la placa de impresión.

3.3.3.2.5. Sistema de fijación del modelo funcional.

Para garantizar la continuidad eléctrica entre el modelo funcional y el resto del circuito era necesario implementar un elemento conductor. Teniendo en cuenta que todos los componentes del puente de sujeción estaban fabricados en material plástico, se planteó la posibilidad de trasladar esa función al sistema de fijación.

Para ello se seleccionó un componente estándar existente en el mercado bajo la denominación de tuerca en jaula o tuerca cautiva. Este sistema de fijación dispone de una tuerca cuadrada plana de acero que se envuelve con una caja o jaula que contiene dos alas. Estas alas actúan a modo de resorte. Para su colocación es necesario comprimirlas para introducirlas en un orificio de geometría cuadrada. Una vez liberadas, las alas aprisionan las paredes del orificio bloqueando el conjunto. Para esta aplicación se seleccionó un conjunto formado por tuerca M6

DIN562 y tornillo M6x12mm DIN 7985 en acero galvanizado. La imagen 3.31 muestra la tuerca cautiva utilizada como elemento de conexión entre la probeta de ensayos y la mecha.

Fig. 3.31. Componente para la fijación de la probeta de ensayos.

Este tipo de fijación se utiliza cuando se requiere que la unión quede oculta. Es una alternativa a la fijación mecánica mediante tuercas remachables, debido a su facilidad de instalación y no requerir herramienta específica para su colocación. Se suele utilizar en uniones deslizantes, carcasas de instrumentos, estantes y bastidores de racks, paneles de muebles o armarios metálicos.

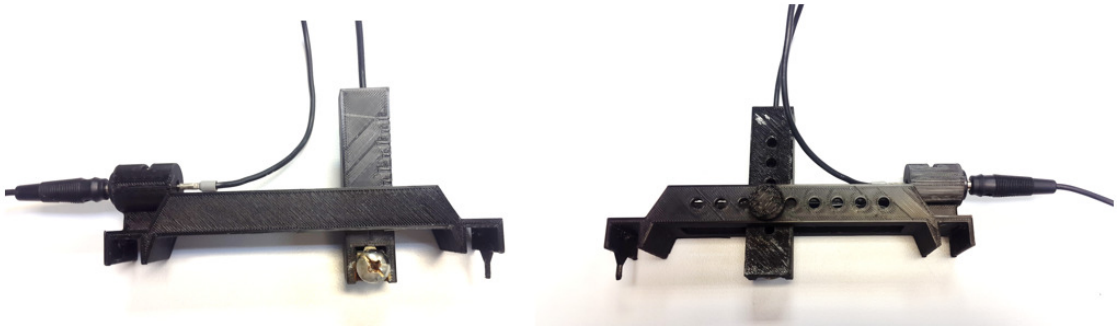
3.3.3.2.6. Conector banana hembra.

Este componente se incluyó como elemento de conexión intermedia entre el baño y los equipos de potencia para permitir la movilidad del conjunto. Es un componente estándar que se utiliza en una gran diversidad de dispositivos e instrumentos electrónicos para la generación, transmisión y/o medición de pruebas eléctricas. Su denominación comercial es: conector banana hembra para chasis. Para esta aplicación se seleccionó un conector roscado de color negro de un solo polo de 4mm con una tensión nominal de 1kV y una corriente nominal de 32A.

La figura 3.32 muestra una imagen del conector banana convencional para conexión al negativo del circuito.

Fig. 3.32. Conector banana hembra para chasis.

La figura 3.33 muestra una imagen del conjunto ya fabricado donde se pueden apreciar todos los elementos descritos en este apartado.



(a) (b)

Fig. 3.33. Puente soporte. (a) Vista frontal. (b) Vista trasera.

3.3.3.2.7. Funcionamiento.

El puente de sujeción aporta versatilidad a los experimentos. Su posibilidad de desplazamiento en tres ejes permite introducir como parámetros de estudio la distancia entre ánodo y cátodo, la orientación en sentido vertical y la orientación en sentido transversal.

Tanto la aguja de medición como las marcas practicadas en la mecha permiten establecer un valor para cada una de las posiciones establecidas.

A la hora de realizar los experimentos se debe colocar en posición el puente de sujeción. Primero se debe seleccionar la posición en ancho y alto de la probeta, para ello se debe desplazar

lateralmente y en vertical la mecha hasta encontrar la posición deseada y a continuación, inmovilizar con el bulón de bloqueo. A continuación, se debe seleccionar la distancia entre ánodo y cátodo y posicionar el puente de sujeción mediante las guías de desplazamiento. Es importante aprovechar la aguja de medición y la escala de medición del tanque de ensayos para ubicarlo en la posición deseada.

Por último, se debe realizar la conexión eléctrica con el equipo de potencia introduciendo el cable negro (-) en la banana hembra de conexión.

La figura 3.34 muestra todo el conjunto de elementos del puente de sujeción en condiciones de servicio.

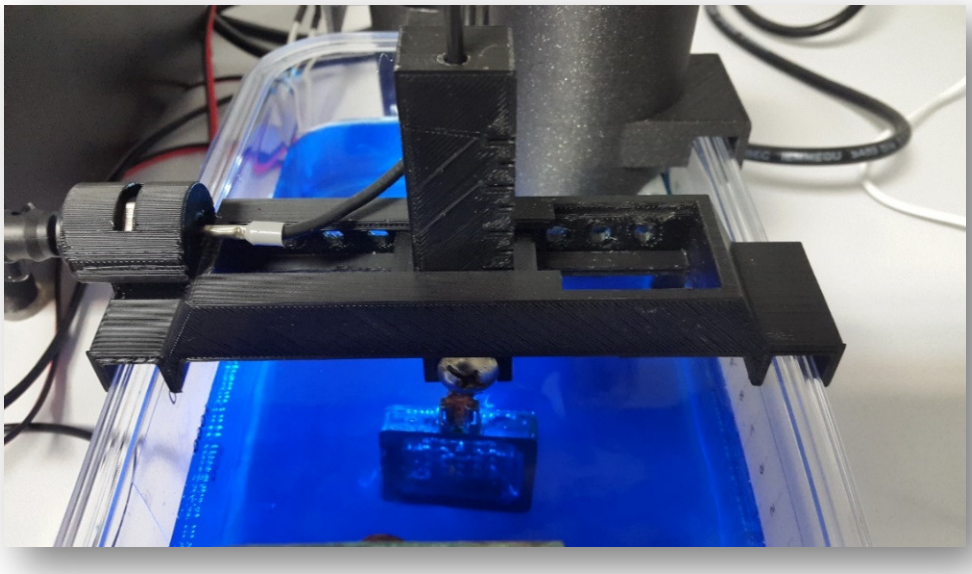


Fig. 3.34. Puente de sujeción en posición de ensayo.

3.3.4. RETROILUMINACIÓN.

3.3.4.1. Descripción.

La retroiluminación consiste en la incorporación de un módulo LED encapsulado con doble óptica, que se ubica en la parte posterior externa del tanque de ensayos.

El módulo LED presenta las siguientes características:

- Tensión nominal: 12V DC
- Tipo de LED: 2x SMD5050
- Consumo: 0,48W
- Temperatura de color: 6500ºK (blanco frío)
- Grado de protección: IP67
- Dimensiones generales: 47x15x5mm

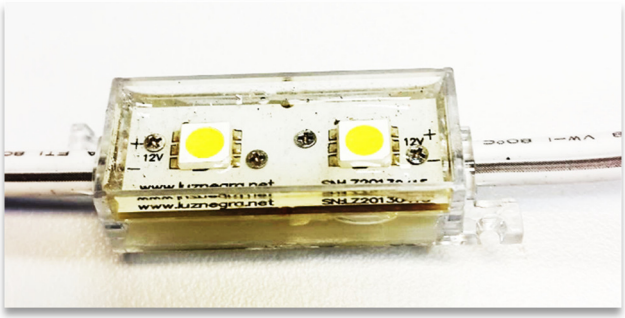


Fig. 3.35. Modulo LED - mod. SN1720130415.

3.3.4.2. Funcionamiento.

Su funcionamiento es de activación manual. Se puede seleccionar su encendido o apagado, a través del interruptor que se encuentra en la parte inferior derecha del panel frontal del DCAB.

El beneficio de esta aportación es aplicable a probetas fabricadas con materiales transparentes o semitransparentes. La retroiluminación permite visualizar las zonas opacas que

se generan en la pieza. En las distintas fases del experimento el investigador puede revisar que partes de la pieza presentan deposición o falta de ella.

Dependiendo del grado de avance del experimento, las faltas de deposición pueden resultar en defectos definitivos o una muestra del mapa de crecimiento de la deposición. A nivel de estudio del proceso resulta revelador, pues permite hacer valoraciones en etapas intermedias sin la necesidad de paralizar el curso del experimento. La figura 3.36 muestra una imagen del efecto de la retroiluminación en condiciones de servicio.

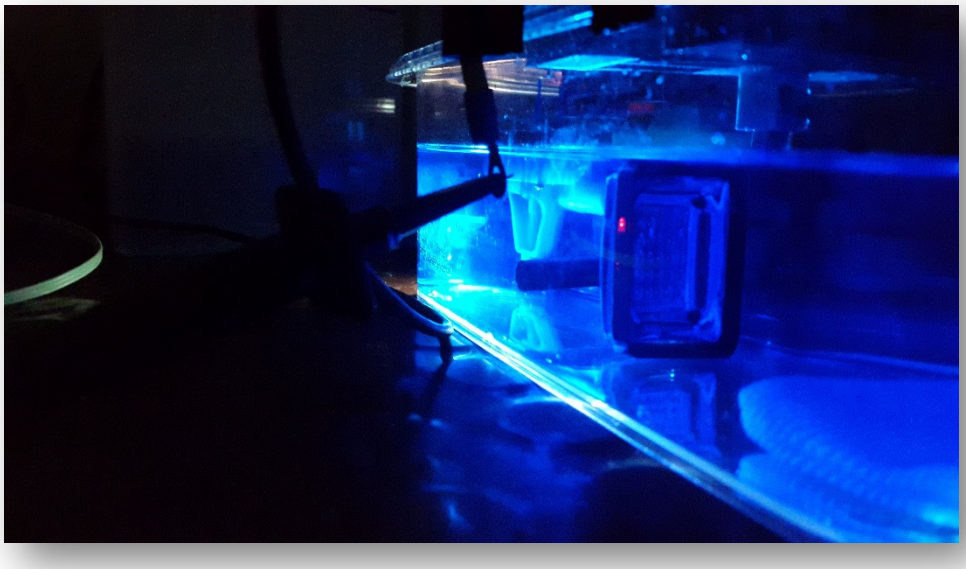


Fig. 3.36. Tanque de ensayos con retroiluminación activada.

La figura 3.37 muestra en imagen lo interesante de utilizar la retroiluminación durante el desarrollo de los experimentos. Como se puede observar, es posible visualizar defectos o falta de deposición en las piezas, así como el avance de esta en las zonas de mayor preferencia. Esto resulta de gran ayuda para llegar a comprender la influencia de la forma de la geometría pretendida, sobre todo al inicio del proceso.

Fig. 3.37. Detalle de falta de deposición durante la realización de un ensayo

3.3.5. SISTEMA DE AGITACIÓN DEL BAÑO.

3.3.5.1. Descripción del equipo.

El sistema dispone de una bomba centrífuga de flujo radial para generar la impulsión. El flujo a la salida del rodete es perpendicular al eje de giro, entra axialmente en el rodete por la boquilla de aspiración y descarga hacia la carcasa. El rodete o impulsor es de tipo abierto.

Para la elección de este componente, fueron determinantes su disponibilidad y sus características, las cuales se adaptaban perfectamente al tipo de aplicación.

Se trata de un elemento utilizado en tratamientos de hemodiálisis y está diseñado específicamente para trabajar en contacto con fluidos corrosivos. Todas las partes en contacto con el fluido: carcasa, rodete, conducto de aspiración y conducto de impulsión están fabricados en material plástico. El sistema de giro se consigue por la actuación de un campo magnético, por lo que rotor y estator están aislados y estancos. La figura 3.38 muestra una imagen de la bomba.

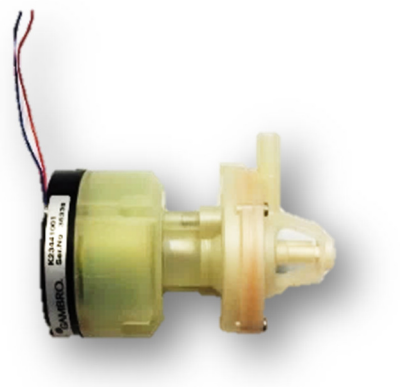


Fig. 3.38. Imagen de la Bomba GAMBRO K2344100S.

Teniendo en cuenta sus características, se presentaba como una excelente opción para realizar las tareas de agitación baño de electro conformado.

Esta bomba era utilizada en máquinas estacionarias de hemodiálisis. Esta en concreto, con número de referencia K23441001 y número de serie 36338, fue fabricada en el año 2005 y pertenece al modelo AK200S del fabricante GAMBRO. El modelo AK200S es una máquina específicamente diseñada para tratamientos en línea de hemodiálisis, hemodiafiltración y hemofiltración.

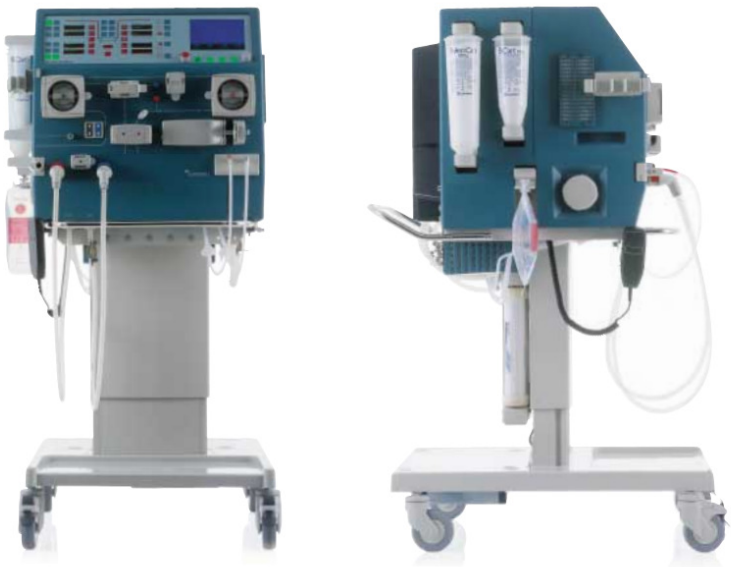


Fig. 3.39. Máquina de hemodiálisis GAMBRO AK200S. [137]

Este componente en concreto presentaba disponibilidad una vez finalizada su etapa productiva. La posibilidad de alargar su periodo de vida útil, en una aplicación totalmente diferente a la que fue inicialmente diseñado y devolverlo al ciclo productivo, se presentó como una propuesta muy atrayente. Esto contribuye a la disminución de la generación de residuos y mejora de la sostenibilidad, referentes que deben estar presentes en todo proceso de diseño.

Las características técnicas más relevantes de la bomba son:

- Alimentación DC.
- Posibilidad de variación de la tensión de trabajo hasta un valor máximo 24VDC
- No hay posibilidad de contaminación del fluido o de la bomba.
- Inexistencia de válvulas unidireccionales o sellos mecánicos.
- Caudales estables y precisos en condiciones de repetitividad.
- Fácil instalación para el conexionado tanto en impulsión como en aspiración.
- Autocebado y funcionamiento en seco
- Posibilidad de conexión en directa o en inversa. En ambos sentidos de giro la bomba impulsa fluido.

3.3.5.2. Caracterización de la bomba.

El parámetro más importante que describe el funcionamiento de la bomba es el caudal. Su variación y control son indispensables si se pretende modificar y controlar el grado de agitación del baño electrolítico.

Habitualmente, esta información es aportada por los fabricantes a través de la curva característica de la bomba. La curva característica representa el comportamiento del equipo, mostrando la relación entre dos de sus variables.

Al no disponer de los datos técnicos de la bomba, se decidió llevar a cabo un procedimiento de ensayo para determinar la relación entre las variables potencia y caudal impulsado. Estas variables caracterizarán el funcionamiento de la bomba en su aplicación a los experimentos del presente trabajo.

El ensayo se planteó en las mismas condiciones de trabajo del equipo, por lo que al igual que en su aplicación práctica, se incluyó el colector de descarga durante la toma de medidas. La tabla de resultados incluye la pérdida de carga asociada a este componente.

Durante el desarrollo del ensayo se seleccionaron los valores de potencia disponibles y se descargaba el fluido impulsado en un depósito anexo. Las descargas se temporizaban para poder relacionar la cantidad de fluido impulsado con la unidad de tiempo. La figura 3.40 muestra una imagen del equipo durante el proceso de caracterización de la bomba.

Fig. 3.40. Equipo de ensayo para determinar el caudal de la bomba.

La descarga de fluido era pesada en una báscula de medición calibrada, en la que previamente se había pesado el depósito en vacío, resultando un valor de 556,73gr. Una vez relacionada la diferencia de mediciones era posible establecer los volúmenes impulsados.

El proceso de medición se repitió para las dos posiciones de funcionamiento de la bomba (directa e inversa) y en cada uno de los niveles de potencia preestablecidos. El equipo de potencia fue programado con incrementos de potencia del 10%, lo que generó 9 puntos de medición. La figura 3.41 muestra una imagen del proceso de medición.

Fig. 3.41. Proceso de medición de masa de la descarga de fluido.

Como equipo de medición se utilizó una báscula de precisión (Mettler Toledo Monoblock, Mettler-Toledo LLC, Columbus, OH, USA) con número de identificación 1122022394. Esta báscula dispone de certificado de calibración en vigor emitido por el Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. La figura 3.42 muestra una imagen de la etiqueta de calibración.

Fig. 3.42. Etiqueta de calibración del equipo de medición.

La tabla 3-3 muestra los resultados del procedimiento de ensayo en conexión directa. A partir de estos datos se pudo obtener la curva característica de la bomba en conexión directa.

Tabla 3-3: Características de la bomba conexión directa.

Porcentaje de potencia nominal (%)	Voltaje (V)	Caudal (l/min)
0	0	0,00
10	15,28	0,66
20	16,36	1,38
30	18,09	1,89
40	19,39	2,04
50	20,63	2,23
60	21,72	2,35
70	22,57	2,44
80	23,22	2,76
90	23,59	2,82
100	23,69	2,88

La figura 3.43 muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos, mostrando la curva característica de la bomba en conexión directa.

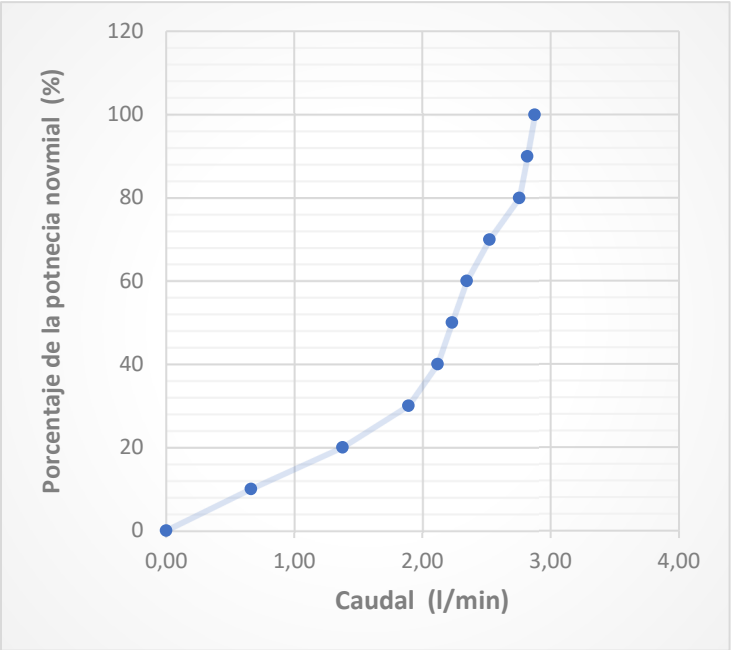


Fig. 3.43. Curva característica de la bomba en conexión directa.

La tabla 3-4 muestra los resultados del procedimiento de ensayo en conexión inversa. Igualmente, estos datos se utilizaron para obtener la curva característica de la bomba, esta vez en conexión inversa.

Tabla 3-4: Características de la bomba conexión inversa.

Porcentaje de potencia nominal (%)	Voltaje (V)	Caudal (l/min)
0	0	0,00
10	15,28	0,37
20	16,36	0,80
30	18,09	1,03
40	19,39	1,14
50	20,63	1,28
60	21,72	1,36
70	22,57	1,42
80	23,22	1,47
90	23,59	1,51
100	23,69	1,55

La figura 3.44 muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos, mostrando la curva característica de la bomba en conexión inversa.

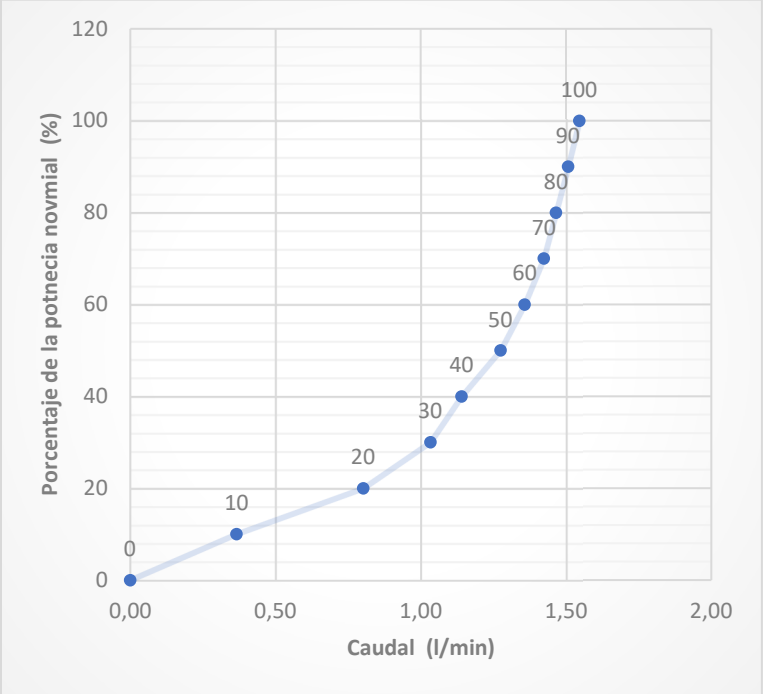


Fig. 3.44. Curva característica de la bomba en conexión inversa.

3.3.5.3. Componentes accesorios.

Para el correcto funcionamiento y adaptación del sistema de agitación del baño se hizo necesario implementar algunos componentes accesorios, que a continuación se pasan a detallar.

3.3.5.3.1. Carcasa

La carcasa es el sistema de fijación y de protección de la bomba. Es un elemento de diseño propio. Se desarrollo a partir de la geometría y dimensiones de la bomba para su adaptación al tanque de experimentos.

Como parámetro fundamental de diseño se planteó la facilidad de acople y desacople. Las actividades de renovación, limpieza, vaciado, llenado, traslado, etc. necesitan de un elemento fácilmente desmontable.

Otro parámetro de diseño importante establecía la necesidad de facilidad de montaje y desmontaje de la propia bomba, tanto para tareas de mantenimiento como para la posibilidad de reemplazo por avería.

La carcasa dispone de una geometría cilíndrica. Se desarrolla en altura, partiendo desde el fondo del tanque hasta la parte superior de la bomba, donde se encuentran los cables de conexión para la alimentación.

Se practicaron espacios en las paredes del cilindro para el encaje de las bocas de aspiración e impulsión.

La tapa superior dispone de huecos para los tornillos de fijación, pero tiene un hueco de diámetro de 40.5mm en el centro para permitir la ventilación en condiciones de trabajo intensivas.

El desarrollo del cilindro en altura, 116mm, protege la zona de conexiones de posibles salpicaduras o interacción con el fluido.

El sistema de fijación cuenta con un doble apoyo a 90º con estructura en voladizo que le aporta estabilidad estática y dinámica. El posicionado en esquina viene motivado por la necesidad de dejar espacio para la ubicación de la retroiluminación LED.

La figura 3.45 muestra en imagen el modelado del componente.

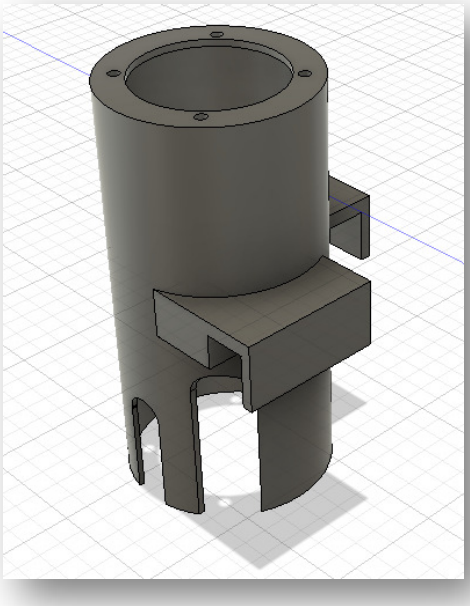


Fig. 3.45. Modelado 3D de la carcasa.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 98%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: Si, tocando la placa.
- Tiempo de impresión: 6 horas 5 minutos
- Cantidad de material: 70g – 21,03m

La figura 3.46 muestra la posición de impresión de la carcasa. Tal y como se puede apreciar se imprimió en posición invertida para minimizar la cantidad de soporte.

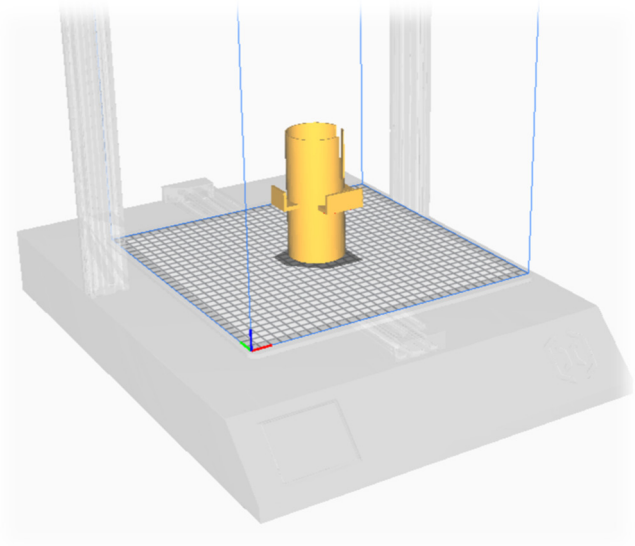


Fig. 3.46. Posición de la carcasa sobre la placa de impresión.

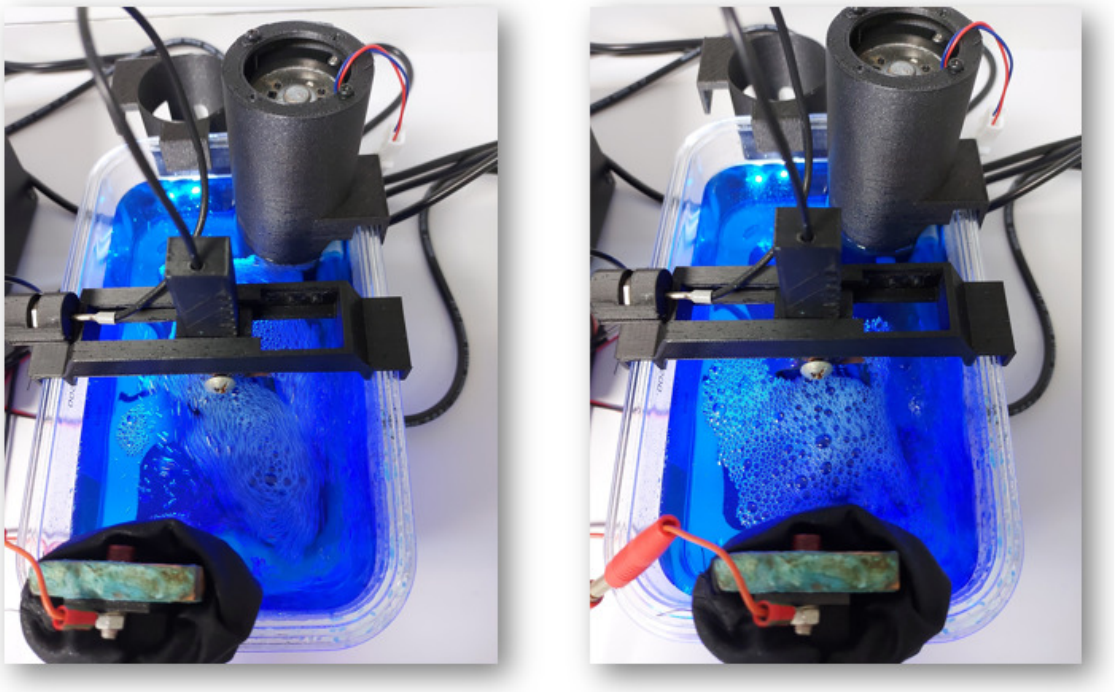
La figura 3.47 muestra el resultado final del elemento incorporado al tanque de ensayos.

Fig. 3.47. Carcasa incorporada en el tanque de ensayos.

3.3.5.3.2. Colector.

El colector es un componente de diseño propio cuya función es distribuir el flujo de agitación. Su necesidad surgió a partir de las primeras pruebas de bombeo realizadas en el tanque, en las que se colocaron algunas pequeñas partículas en suspensión para poder analizar el flujo. A potencias superiores al 20% se detectaron turbulencias en la zona de influencia de la pieza. Esta circunstancia generaba dudas sobre su efecto en la uniformidad de las deposiciones.

El diámetro de la boca de impulsión era excesivo para un exhaustivo control del flujo, además, su posición elevada con respecto al fondo del tanque generaba burbujeo y salpicaduras en la superficie del fluido, lo que resultaba perjudicial para el desarrollo de los experimentos. La figura 3.48 muestra este efecto en condiciones de trabajo.



(a) (b)

Fig. 3.48. Problemas de flujo. (a) Turbulencia. (b) Burbujeo en la superficie.

Se hacía necesario, por tanto, el desarrollo de un elemento que contrarrestara estos inconvenientes. Para ello, se establecieron los siguientes parámetros de diseño:

- Ajuste a la salida de la boca de impulsión de la bomba.
- Ajuste según las dimensiones del tanque y posición relativa respecto a la pieza de trabajo.
- Facilidad para el acople y desacople. Debía tenerse en cuenta las intervenciones para mantenimiento, operaciones de limpieza, vaciado, llenado, y/o traslado del tanque.
- Redireccionado del flujo a la parte baja del tanque.
- Reducción de la sección para un mejor control del caudal de agitación.
- Distribución del flujo alrededor de la pieza de trabajo.

A partir de estos parámetros se diseñó un colector adaptado de sección cilíndrica y diámetro interior de 8mm, desarrollado en forma de "L" a lo largo de su longitud. Presenta dos cambios de dirección a 90° y boca de entrada de diámetro 6,5mm para su acople con la bomba. El tramo descendente tiene una longitud de 32mm y el tramo de distribución una longitud de 86mm. Se practicaron 5 taladros de diámetro 5mm equiespaciados 12mm para un mejor reparto del flujo.

La figura 3.49 muestra el diseño realizado.

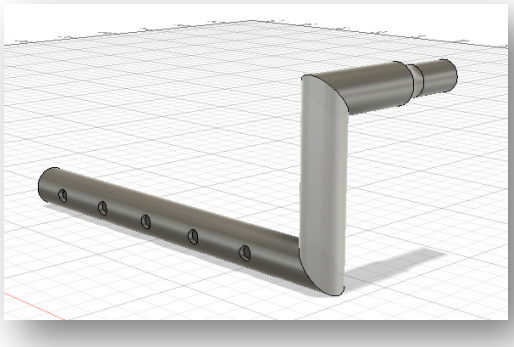


Fig. 3.49. Modelado del colector.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,16mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: Si, tocando la placa.
- Tiempo de impresión: 1 horas 12 minutos
- Cantidad de material: 6g – 1,80m

La figura 3.50 muestra la posición de impresión del colector.

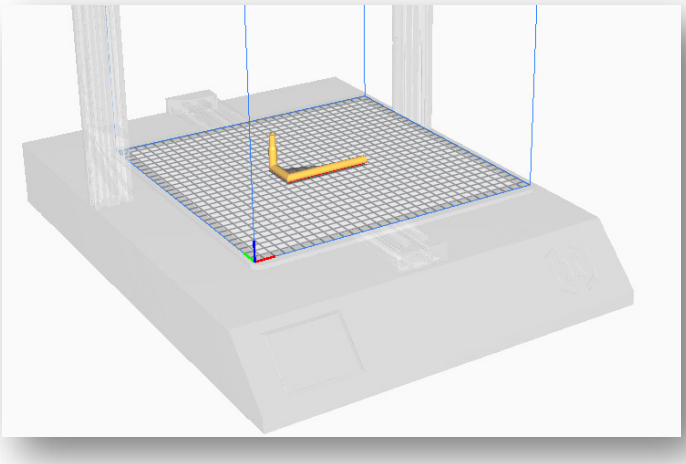


Fig. 3.50. Posición del colector sobre la placa de impresión.

La figura 3.51 muestra el resultado obtenido y su acoplamiento con la bomba.

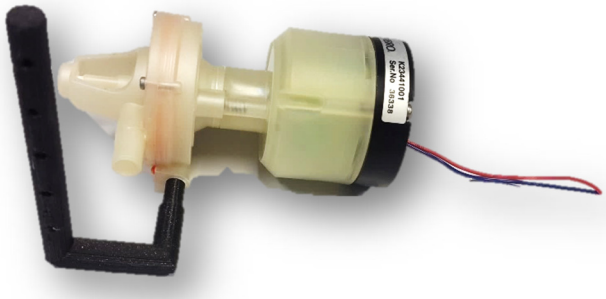


Fig. 3.51. Acoplamiento entre colector y la bomba.

La figura 3.52 y 3.53 muestra en imágenes la posición del colector sumergido en el tanque de ensayos. Tal y como se puede apreciar, con este diseño el colector queda suspendido. En condiciones de servicio, su elevación con respecto al fondo permite una buena circulación del fluido.

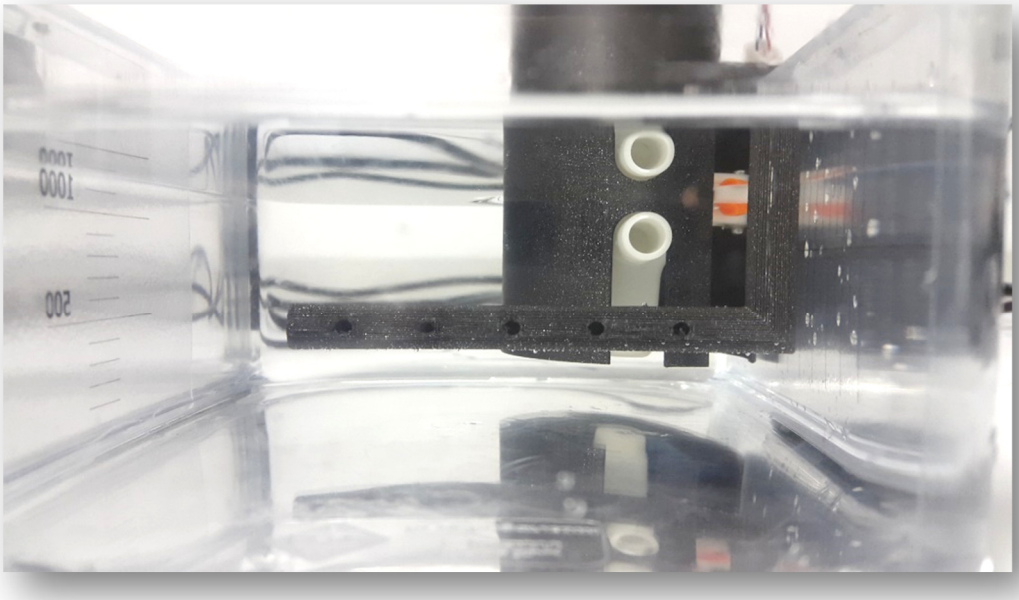


Fig. 3.52. Vista Frontal del colector sumergido en el tanque de ensayos.

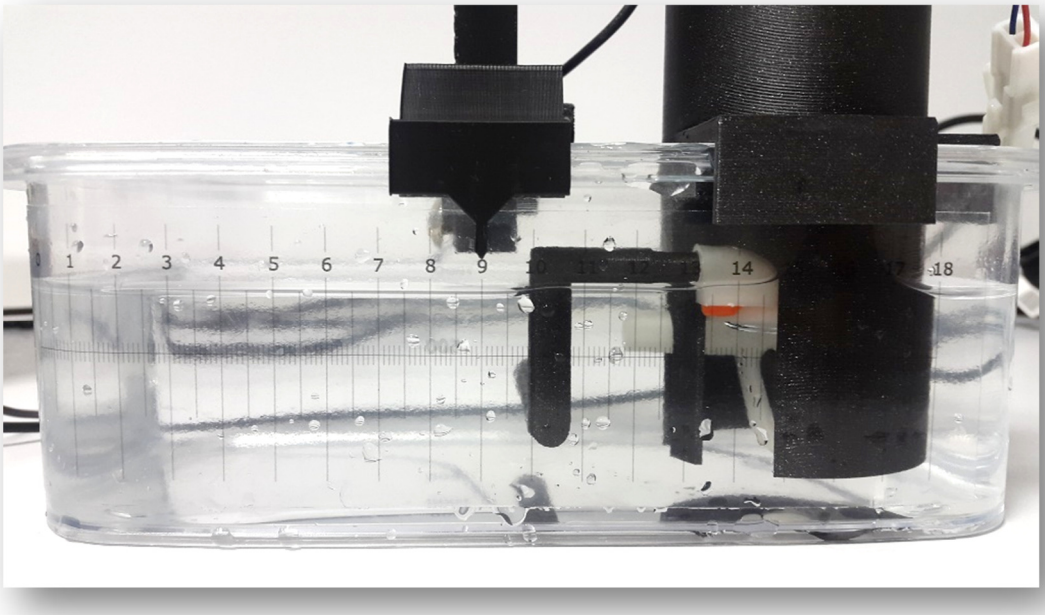


Fig. 3.53. Vista lateral del colector sumergido en el tanque.

3.3.5.4. Funcionamiento del sistema de impulsión.

La participación de este componente en la realización de los experimentos permite la aportación de un flujo con caudal configurable. Este caudal puede ser constante, con una potencia seleccionable por el operador, si se trabaja en modo manual. Pero también puede ser variable si se selecciona el modo de funcionamiento automático. En esta opción el caudal se ajusta en función de las condiciones de paso de corriente a través del baño electrolítico.

En una primera disposición el sistema bombea fluido procedente del propio baño ya que las bocas de aspiración e impulsión se encuentran sumergidas en el interior del tanque. De esta manera el sistema de impulsión hace la función de agitador.

En una segunda disposición, añadiendo al sistema una bomba gemela, es posible bombear el fluido fuera del baño, tal y como se muestra en la figura 3.40 e introducir fluido desde otro

depósito anexo. De esta forma la agitación del baño se complementa con la posibilidad de renovación.

En el desarrollo de este trabajo se ha utilizado solo el modo agitación. Dado el pequeño tamaño de las piezas y lo exigente de los detalles, se prefirió no introducir nuevas variables que pudieran afectar al experimento y así poder focalizar los resultados. En series de hasta 20 experimentos no se apreció agotamiento en las condiciones del baño. No obstante, el diseño incluye ambas opciones para aportar mayor versatilidad al equipo.

La figura 3.54 muestra el sistema en condiciones de servicio.

Fig. 3.54. Funcionamiento de la bomba.

3.3.6. TANQUE DE MICRO-ELECTROCONFORMADO.

3.3.6.1. Descripción.

Es el componente que contendrá el baño electrolítico en el que se van a desarrollar los experimentos. Para su selección se tuvieron en cuenta principalmente tres aspectos:

- Dimensiones: desde el punto de vista geométrico el factor profundidad se mostró como el más relevante. Se establece como parámetro de diseño la necesidad de que la pieza quede totalmente sumergida, pero sin llegar a apoyar en el fondo. Se pretende permitir la libre circulación del flujo de agitación. Teniendo en cuenta las dimensiones del modelo funcional, la profundidad debía ser ≥50mm.

  Volumen: la relación de escala entre el volumen del baño electrolítico y la superficie de deposición no es un valor consensuado de manera explícita entre la comunidad científica. En muchas de las aplicaciones consultadas, los autores utilizan equipos comerciales donde el volumen está preestablecido, por lo que no se plantea como un parámetro configurable. Se han encontrado estudios que han utilizado volúmenes mínimos, como es el caso de Janda et al., que realizaron sus experimentos en una célula electrolítica tan sólo 5ml [139]. Tras revisar los datos, se puede establecer que la relación con el área de deposición fue aproximadamente 8:1. Para la presente investigación, teniendo en cuenta la diferencia de escala, se decidió proponer una relación 50:1.
- Material: se estableció la transparencia como una propiedad necesaria. La posibilidad de interacción visual con el proceso, incluso en las zonas sumergidas, resultaba a priori muy interesante. Poder verificar la evolución de la deposición en tiempo real, era una opción poco explorada en la bibliografía para este tipo de procesos. En cuanto a la funcionalidad,

se planteó un material que fuera de fácil manipulación y limpieza, así como de fácil reposición y bajo coste.

En base a estas premisas, finalmente se optó por un recipiente transparente fabricado en polipropileno, de dimensiones 205mm x 126mm x 70mm (largo x ancho x fondo), con capacidad para un volumen máximo de 1,5 litros.

3.3.6.2. Caracterización.

Para aportar versatilidad a los ensayos, a este recipiente se le incorporaron dos escalas de medición regulares y discretas, una en el eje horizontal y otra en el eje vertical.

La figura 3.55 muestra en imagen la escala de eje horizontal. Cuenta con una división de escala de 1mm, que permite el posicionamiento de la pieza de ensayo. En aplicación a los experimentos, ofrece la posibilidad de establecer la distancia entre ánodo y cátodo como un parámetro configurable. De esta manera es posible generar una línea de experimentos basados en la influencia de su variación.

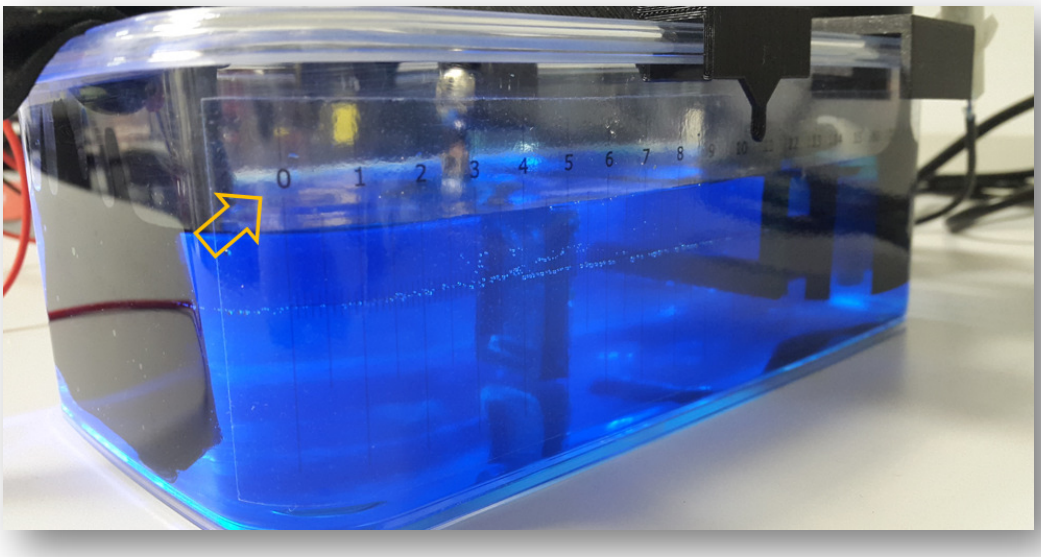


Fig. 3.55. División de escala en el eje horizontal.

La figura 3.56 muestra en imagen la escala de eje vertical. Dispone de una división de escala de 100ml, que permite medir el volumen del baño.

En aplicación a los experimentos, propone otro parámetro configurable ya que es posible generar una línea de experimentos basados en la influencia de su variación, e incluso relacionarlo con el nivel de concentración de la solución electrolítica.

Además, permite establecer la pérdida de volumen de baño durante la realización de una serie de experimentos en condiciones de repetitividad.

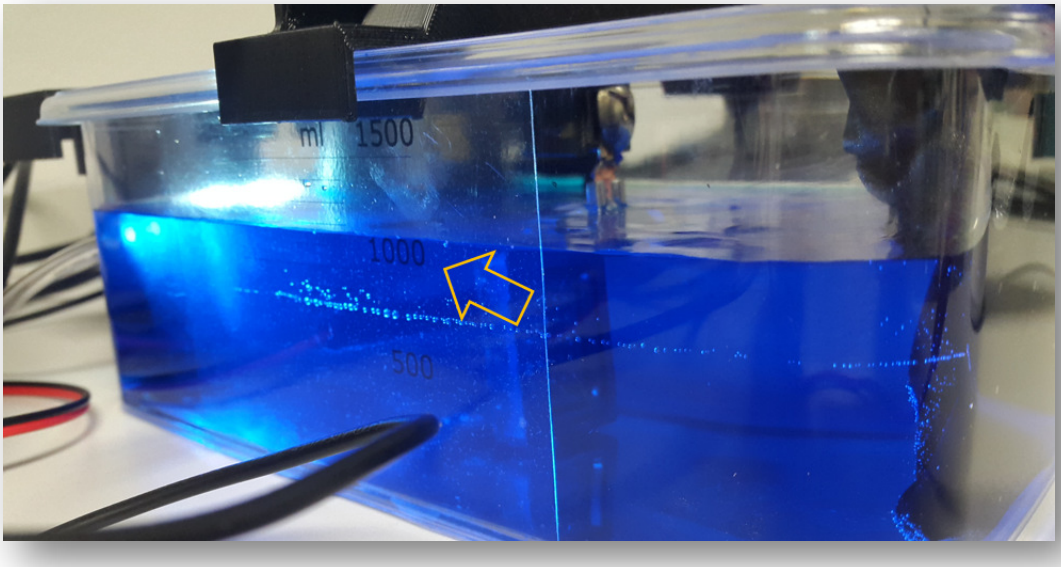


Fig. 3.56. División de escala en eje vertical.

Para establecer la escala de volumen de forma rigurosa se llevó a cabo el aforado del tanque. Se realizó el llenado con fluido en cantidades múltiplos de 100ml hasta completar un volumen de 1 litro. Se tomaron medidas en cada una de las posiciones con un pie de rey calibrado y se estableció la división de escala en función del resultado de las 8 lecturas. La tabla 3-5 muestra el resultado del procedimiento de medición.

Tabla 3-5 Lecturas resultado del proceso de aforado del tanque

Volumen (ml)	Altura (mm)
100	3,8
200	7,6
300	11,3
400	15,2
500	18,8
600	22,5
800	30,1
1000	37,6

La figura 3.57 muestra de forma gráfica la correspondencia entre las dos variables como resultado del proceso de medición.

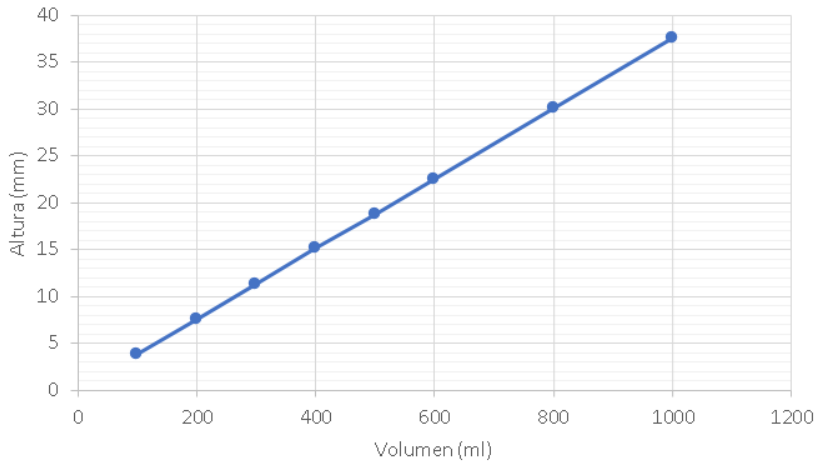


Fig. 3.57. Relación volumen-altura.

Una vez incorporada la escala de medición y para verificar su correcto funcionamiento, se realizó su comprobación. Para ello, se realizaron una serie de 10 mediciones en las que se pesaba el tanque en vacío y con fluido, para cada una de las marcas de la escala.

La figura 3.58 muestra una de las operaciones de pesado del tanque, en este caso en vacío. Para realizar las mediciones se utilizó la misma balanza de precisión descrita en el apartado 3.3.5.2 de este documento.

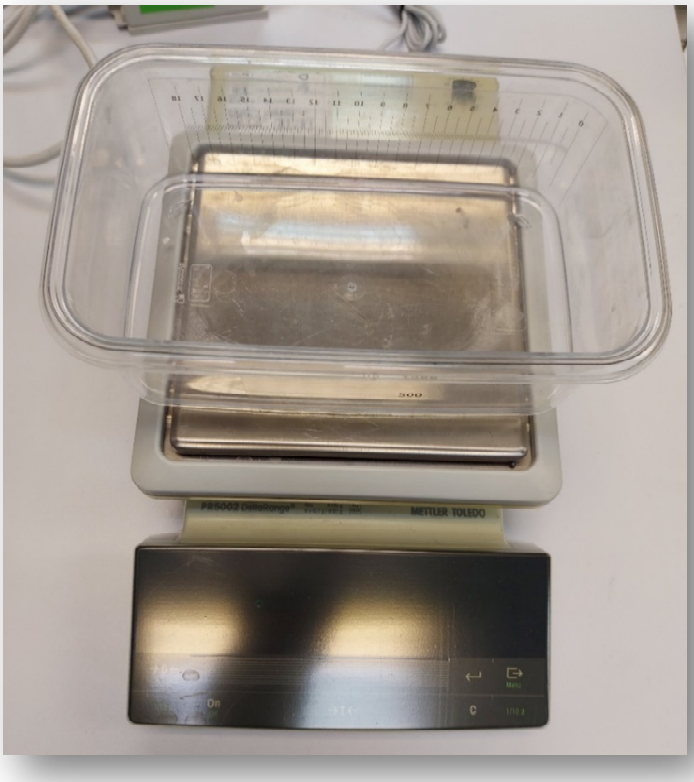


Fig. 3.58. Pesado del tanque.

3.3.7. FIJACIÓN DEL ÁNODO.

La fijación del ánodo es un componente de diseño propio. Su función es soportar y posicionar el ánodo al tanque de ensayos. Se desarrolló a partir de las dimensiones del ánodo de cobre utilizado, el cual presentaba una geometría de sección rectangular con unas dimensiones generales de 100mm x 50mm x 10mm (largo x ancho x espesor).

Su diseño en forma de "h" permite el desplazamiento lateral del ánodo. Sus dimensiones son 25mm x 17mm x 40mm (largo x ancho x alto) y cuenta con un taladro en su parte superior para facilitar la unión mecánica entre el cable de conexión y el ánodo, asegurando la conductividad del conjunto. La existencia de un nervio central junto con un espesor uniforme de 3mm aseguran su solvencia mecánica. La figura3.59. muestra una imagen de su modelado.

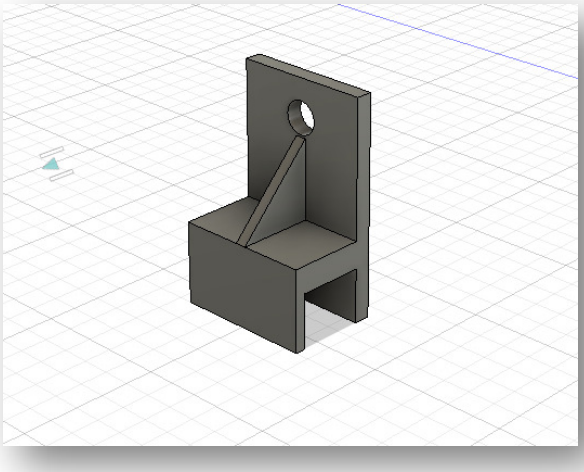


Fig. 3.59. Modelado de la fijación para el ánodo.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s

- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: si, tocando la placa.
- Tiempo de impresión: 36 minutos
- Cantidad de material: 6g – 1,94m

La figura 3.60 muestra la posición de impresión, acostado sobre uno de los flancos.

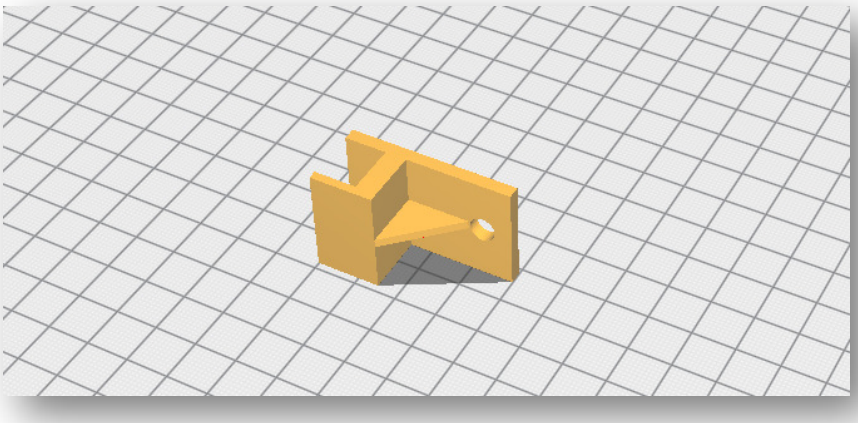


Fig. 3.60. Posición de la fijación sobre la placa de impresión.

La figura 3.61. muestra una imagen del resultado obtenido, incluyendo la fijación con el ánodo y el cable de conexión.

Fig. 3.61. Conjunto ánodo, soporte ánodo, cable de conexión y fijación mecánica.

3.3.8. MÁSCARA PROTECTORA PARA EL MODELO FUNCIONAL.

Durante la realización de los primeros ensayos con modelos funcionales, se pudo comprobar que se producían crecimientos de cáscara no controlados en los bordes de las piezas. La figura 3.62 muestra estos crecimientos y su evolución, incluso hacia la parte trasera de los modelos.

Las zonas traseras de los modelos funcionales quedan ocultas durante el proceso de metalizado, por lo que, en principio no presentaban continuidad eléctrica. No obstante, eran ocupadas por lo frentes de crecimiento que se autoalimentaban de su propia conductividad.

Estos crecimientos no deseados generaban una merma en la reproducción de detalles y consecuentemente defectos en las piezas. Además, imposibilitaban el desprendimiento espontáneo de la cáscara y bloqueaba la posterior extracción de esta.

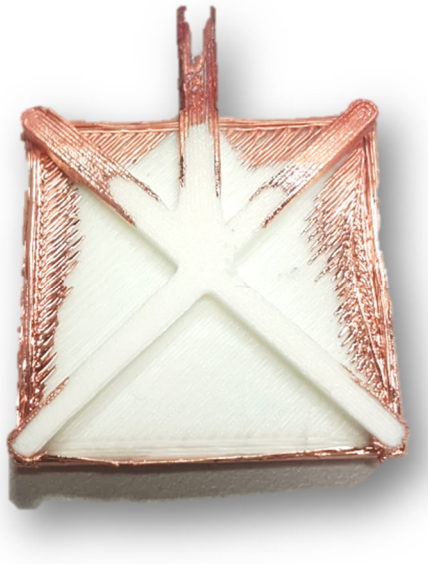


Fig. 3.62. Crecimiento no controlado en la parte trasera del modelo funcional.

Ante esta circunstancia, se hizo necesario el desarrollo de una solución que permitiera impedir el crecimiento descontrolado de la deposición hacia áreas no deseadas, y la fácil extracción de las cáscaras electro conformadas.

Se llevó a cabo el desarrollo de una máscara adaptada a la geometría de la pieza funcional. En su diseño se tuvo en cuenta la facilidad de montaje y desmontaje, así como la imposibilidad de comprometer o interferir en la geometría funcional.

La pieza diseñada consiste en una geometría de sección cuadrada de dimensiones 40,9mm x 40,9mm (largo x ancho) con un escalón saliente de 1,25mm x 1,20mm (alto x ancho), para dificultar la posibilidad de crecimiento hacia los bordes. Dispone de un rebaje para adaptarse al tallo de fijación de la pieza funcional. Se le aplicó una tolerancia dimensional (H7/h6) para ajuste fino, con tipo de asiento deslizante para conseguir el encaje a mano. Sus dimensiones interiores se ajustaron hasta 38,5mm x 38,5mm (largo x ancho).

La figura 3.63 muestra una imagen de su modelado.

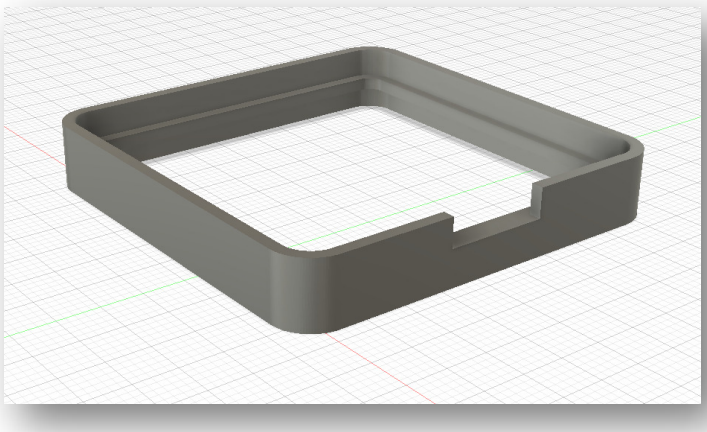


Fig. 3.63. Modelado de la máscara protectora del modelo.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,16mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: No.
- Tiempo de impresión: 17 minutos
- Cantidad de material: 3g – 0,90m

La figura 3.64 muestra una imagen de la posición sobre la placa de impresión.

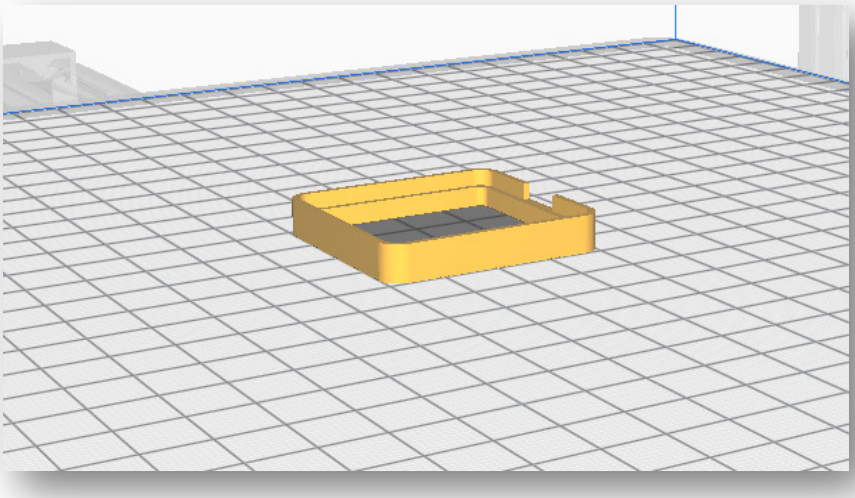


Fig. 3.64. Posición de la máscara sobre la placa de impresión.

El resultado de la aplicación del elemento diseñado tuvo efecto inmediato. En la siguiente serie de ensayos se pudo comprobar que la máscara bloqueaba el crecimiento de la deposición hacia las áreas no deseadas. Con las mismas condiciones de ensayo se obtenía una considerable mejora en la definición de las piezas terminadas. El efecto disuasor del escalón integrado en la máscara permitía que las condiciones del baño concentraran toda su capacidad productiva sobre la superficie funcional.

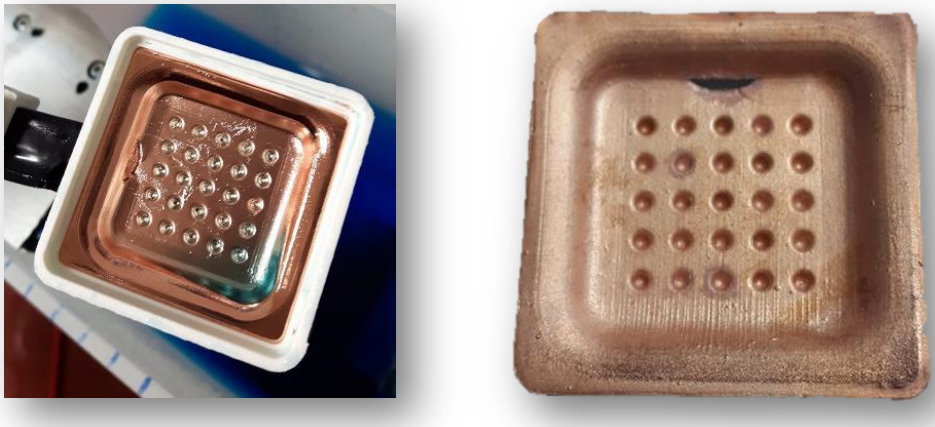
Esta mejora afecta también a la optimización de la producción. Se pudo comprobar mediante medición que se mantenía la cantidad de masa depositada, lo que indica que el material antes desperdiciado, aumenta ahora el espesor de las piezas terminadas.

Como beneficio añadido, una vez terminado el proceso de deposición, la extracción de las piezas se conseguía de manera más limpia. En algunos casos se llegó a producir una separación espontánea entre la cáscara y el modelo funcional.

La figura 3.65 muestra una imagen del protector instalado sobre la superficie funcional, en la previa a la realización de un experimento.

Fig. 3.65. Preparación del modelo funcional con máscara previo a la deposición.

La figura 3.66b permite apreciar la excelente definición de los bordes de las piezas terminadas. Gracias a la aportación del protector, apenas aparecen indefiniciones o defectos de paralelismo entre sus caras.



(a) (b)

Fig. 3.66. Resultado de aplicación de la máscara. (a) Pieza funcional con máscara. (b) Pieza finalizada.

3.3.9. CÁMARA DE VIGILANCIA.

La posibilidad de disponer de un soporte visual del avance del proceso de deposición se planteó como una potente innovación al desarrollo de los experimentos, no explorada hasta ahora en la bibliografía consultada. Poder visualizar en tiempo real el estado de las deposiciones, hacer capturas de imágenes e incluso revisar el archivo con la grabación completa de todo el proceso, generó la atrayente idea de añadir este componente al equipo de ensayos.

3.3.9.1. Descripción del equipo.

Para desarrollar esta función se pensó en la operatividad de un equipo de vigilancia. La enorme evolución de la tecnología para este tipo de aplicaciones ha conseguido equipos con unas prestaciones muy potentes.

La mejora en la resolución de las cámaras, la reducción de sus tamaños y de sus costes, las han colocado en una posición muy ventajosa en cuanto a su accesibilidad.

En aplicación al desarrollo de los experimentos se seleccionó la cámara "*Mi Home Security Camera 360 ° 1080P*" del fabricante chino Xiaomi. Es un aparato que se adapta perfectamente a las necesidades del proceso. La resolución de la imagen (1080P) y el ángulo de visión (110°), ofrecen una imagen nítida de la zona de ensayos.

Sus reducidas dimensiones en altura permiten una excelente orientación para el enfoque. Dispone de zoom y giro de 360° lo que proporciona versatilidad y adaptabilidad en función del campo de visión a explorar.

La posibilidad de conexión remota y de control a través de aplicación para smartphone, permite que el investigador pueda visualizar en tiempo real el desarrollo de los experimentos, planteamiento hasta el momento muy alejado de los sistemas de ensayo tradicionales en procesos de electro conformado.

La figura 3.65 muestra una imagen del equipo utilizado.

Fig. 3.67. Cámara de vigilancia Mi Home 360° 1080P

Especificaciones técnicas destacables: [137]

- Dimensiones: 78 x 78 x 118mm (largo x ancho x alto)
- Tensión de trabajo:5V
- Consumo: 2A
- Angulo de visión: 110°
- Resolución: 1080P
- Focal length:3,9mm
- Conectividad: Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n 2.4 GHz
- Memoria: tarjeta MicroSD – (Se implementó una tarjeta de 64GB)
- Sistemas operativos Compatibles: Android 4.4, IOS 9.0 o posterior
- Visión nocturna: Si, mediante visión infrarroja.
- Audio: comunicación en las dos direcciones.

3.3.9.2. Funcionamiento.

El funcionamiento de la cámara es totalmente automático. Mientras esté encendida realiza una grabación continua de lo que está visualizando. Para su correcta instalación, necesita de una red WIFI a la que conectarse.

Una vez configurada y conectada, el operador puede interactuar con ella de forma remota a través de una aplicación móvil.

Como funciones más relevantes en aplicación a los experimentos, el operador puede encender o apagar la cámara, detener o reanudar la grabación, hacer zoom, girar la cámara, hacer capturas en forma de imagen, revisar la grabación en tiempo real e incluso compartirla con otro u otros usuarios. Es también posible establecer comunicación de audio a través de la cámara, lo cual resulta muy útil en experimentos con equipos de trabajo en remoto.

Todas las grabaciones y capturas de imagen disponen de una barra con representación temporal de fecha y hora en tiempo real. Esto resulta muy útil ya que, las visualizaciones pueden ser contrastadas en puntos temporales con respecto a la información de los parámetros eléctricos que recaba el equipo de medición. La figura 3.68 muestra la calidad de la imagen, capturada a través de la cámara en condiciones de servicio.

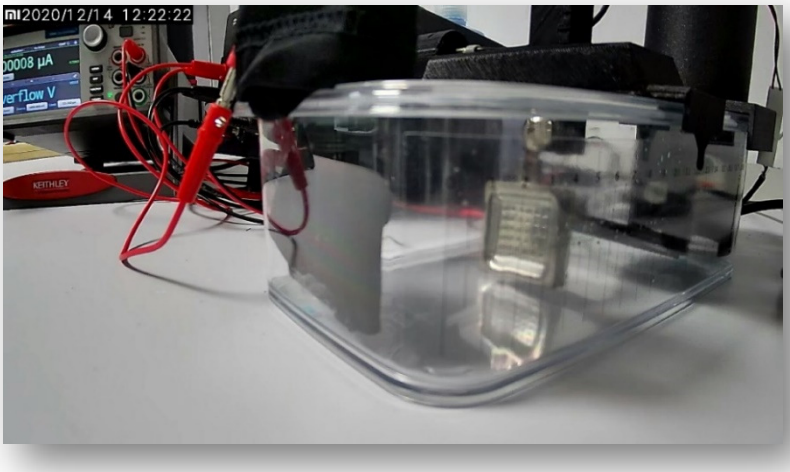


Fig. 3.68. Imagen real captada por la cámara de vigilancia.

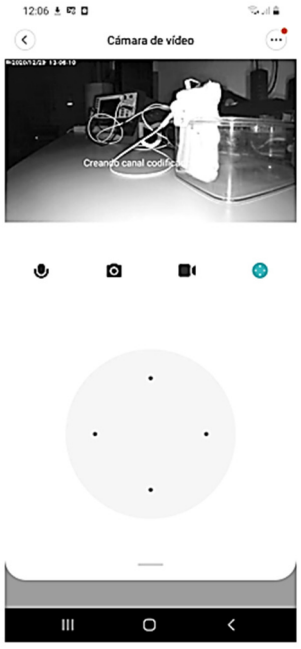


Fig. 3.69. Pantalla de visualización de la aplicación para smartphone.

3.4. CONCLUSIONES.

Se ha desarrollado y completado un equipo laboratorio para llevar a cabo procesos de electroconformado que permite al investigador trabajar de forma sencilla con un gran número de parámetros configurables.

Se ha diseñado, desarrollado, fabricado y puesto en servicio un equipo (DCAB), que permite modificar de forma controlada la agitación del baño electrolítico, permitiendo al investigador establecer el modo de funcionamiento que más se adapte a las condiciones de sus ensayos.

Se ha conseguido integrar la instrumentación de altas prestaciones disponible (*KEITHLEY 2460* SuourceMeter®) de tal manera que se convierta en un elemento indispensable para dotar al investigador de control, adaptabilidad, gestión, información y retroalimentación de los parámetros eléctricos del proceso.

Se han diseñado, fabricado e implementado elementos de interacción entre el baño electrolítico y los modelos funcionales, inicialmente en función de las geometrías base de esta línea de investigación, pero totalmente adaptables a otras tipologías, a base de tecnología de fabricación de bajo coste.

Se ha implementado un novedoso sistema de retroiluminación que permite interactuar de forma visual con el proceso, pudiendo realizar observaciones hasta ahora no conocidas. Igualmente se ha implementado un sistema de vigilancia de alta resolución, novedoso en su aplicación, que permite al investigador hacer un seguimiento en tiempo real del experimento, así como contar un sistema de grabación continua, que permite consultar lo acontecido en cualquier espacio temporal durante el desarrollo de los experimentos.

En definitiva, nos encontramos ante un equipo de laboratorio, que pone al servicio del investigador herramientas que le permiten variar las condiciones del sistema, tanto desde el punto de vista de sus parámetros geométricos como eléctricos.

Dispone, por tanto, de un abanico de posibilidades para abordar las problemáticas más habituales relacionadas con esta tecnología de fabricación y que han sido ampliamente expuestas por la comunidad científica en el desarrollo de sus investigaciones.

Durante todo el proceso se ha tenido en cuenta la viabilidad de la reproducción de lo desarrollado, de tal manera que otros investigadores tengan la posibilidad de aprovechar lo aquí expuesto para generar sus equipos propios.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Como ya se ha expresado en la introducción, uno de los objetivos del presente trabajo es la validación de las capacidades del equipo desarrollado. Para ello es necesario testarlo en aplicación práctica a la fabricación de piezas electro conformadas. En concreto cubriendo la necesidad que dio origen a esta línea de investigación: la fabricación de cáscaras funcionales para su posterior utilización como herramientas para el texturizado de superficies estructuradas.

En este capítulo se llevará a cabo la descripción del procedimiento de ensayo. Se explicará cada una de las fases necesarias para la fabricación de piezas electroconformadas, mediante el uso del equipo desarrollado en la presente Tesis. Se pretende que pueda ser una guía de consulta para la realización de experimentos posteriores.

La combinación de diferentes procesos de fabricación: fabricación aditiva, pulverización catódica y electro conformado, a priori poco o nada relacionados, planteaba ciertas dificultades en la obtención de la pieza final. Se ha necesitado de un exhaustivo trabajo de análisis y estudio de compatibilidad, así como de adaptación hasta conseguir un procedimiento óptimo y eficaz, capaz de generar buenos resultados.

El procedimiento de fabricación combinado ha quedado finalmente configurado en 4 fases:

- Fabricación del modelo funcional.
- Metalizado.
- Electro conformado.
- Inspección y medición de las piezas fabricadas.

4.2. FASE 1: FABRICACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.

El primer paso del procedimiento es conformar la pieza que contendrá la geometría que se quiere reproducir, lo que se denominará modelo funcional. Si bien el diseño del modelo funcional no es objeto de esta tesis doctoral, su desarrollo paralelo a necesitado de una notable implicación en su definición geométrica. Por ello, se realizarán alusiones a algunos aspectos tenidos en cuenta, dada su influencia posterior en el desarrollo del equipo de electro conformado.

Todos los esfuerzos para la validación del procedimiento se centraron en una geometría dotada de un patrón a escala milimétrica con detalles a escala micrométrica, cuyos parámetros se determinaron a partir del proyecto de investigación coordinado con el grupo de Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la Universidad de Cádiz (DPI2017-84935-R). La figura 4.1 muestra una imagen del modelado de la geometría.

Fig. 4.1. Modelo funcional

Dispone de una forma cuadrada de dimensiones exteriores 38mm x 38mm con un patrón interior formado por 25 unidades de geometrías semiesféricas bajo relieve de 1mm de radio,

distribuidas en 5 filas y 5 columnas con una separación de 1mm entre ellas y 1mm respecto a los bordes. Toda la geometría central se encuentra 4mm en depresión respecto a la cara superior.

Para su conformación se utilizó tecnología de fabricación aditiva por fotopolimerización en tanque en su variante de procesamiento por luz digital, mediante el uso de pantalla LCD, también conocido proceso SLA/DLP-LCD (del inglés: Stereo Lithography Apparatus/ Digital Light Processing - Liquid Crystal Display). La selección de este proceso de fabricación se determinó por su adaptabilidad a las especificaciones del modelo. Sus altas capacidades para la reproducción de detalles, su bajo coste y su disponibilidad se presentaron como opción de gran interés para la evaluación de esta tecnología en este tipo de aplicaciones.

Para conformar las piezas se ha utilizado una máquina de impresión 3D sobre resina (Wanhao Duplicator 7 (D7), Wanhao 3D printer, Jinhua, China). Entre sus especificaciones técnicas más relevantes destacan: [140]

- Dimensiones de impresión: 120,6mm x 68,5mm x180mm (largo x ancho x alto)
- Emisor: luz ultravioleta - longitud de onda 405nm.
- Velocidad de impresión: 30mm/h
- Tamaño de proyección: 5,5” LCD
- Resolución: 47µm
- Espesor de capa: 30µm -100µm.
- Material de impresión: Resina.
- Nivel de protección: Carcasa totalmente opaca.

La figura 4.2 muestra una imagen del equipo utilizado.

Fig. 4.2. Máquina de impresión 3D Wanhao Duplicator 7.

El funcionamiento de esta máquina consiste en la proyección de imágenes en negativo de la geometría a reproducir a través de una pantalla LED. La proyección de luz digital foto polimeriza y solidifica una resina fotosensible (material de trabajo), que se encuentra en estado líquido en el interior del tanque. Tras un tiempo establecido para la solidificación o curado, la pantalla proyecta la siguiente imagen, repitiendo sucesivamente el proceso hasta finalizar la impresión.

El curado de las diferentes capas de resina se lleva a cabo sobre una placa de impresión, que se desplaza en eje vertical y en dirección ascendente capa a capa. Esta forma de trabajo tiene la particularidad que la conformación de la pieza se va desarrollando en posición invertida, por lo que la pieza queda suspendida y sujeta a la placa por el efecto de adhesión de la primera capa proyectada.

Las imágenes son la reproducción fiel de la geometría y son realizadas por un software, denominado *slicer,* que transforma el objeto modelado en diferentes capas, para luego agruparlas en un paquete de imágenes.

Para aprovechar al máximo las prestaciones de la máquina, la construcción del modelo se realizó con el menor espesor de capa disponible: 30µm.

Su conformación se realizó en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Wanhao Duplicator 7
- Material: Resina Monocure 3d Clear transparente
- Altura de capa: 30 µm
- Número de capas: 371
- Tiempo base de exposición: 10,50s
- Tiempo de exposición de sobre curado: 1,055s
- Soporte: Si, tocando la placa.
- Tiempo de impresión: 2 h 19´ 54”
- Volumen de material: 8,37ml

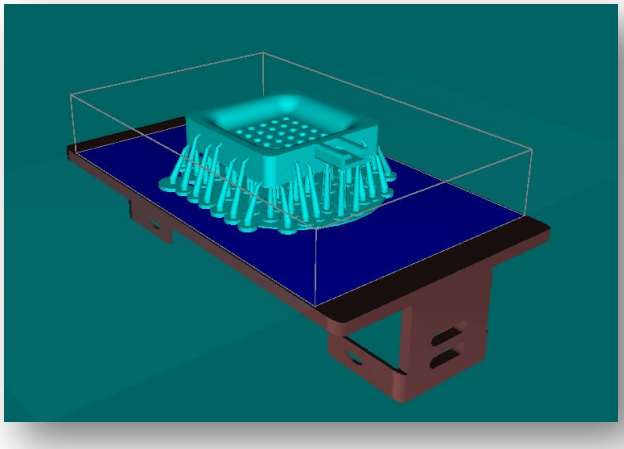
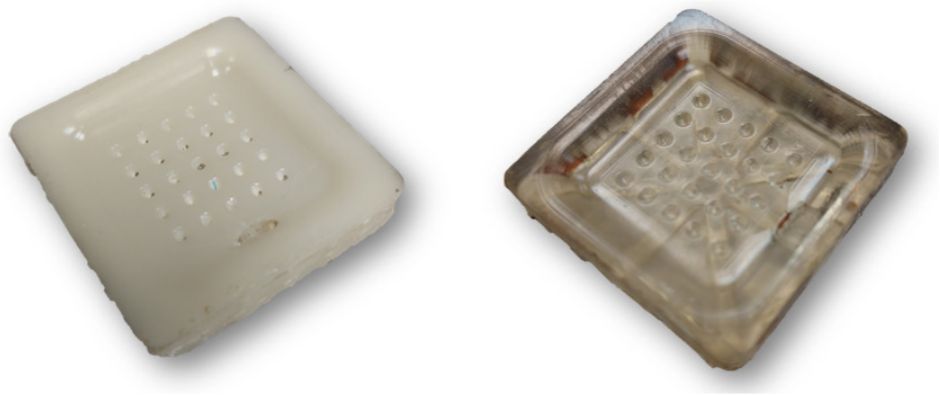


Fig. 4.3. Posición del modelo funcional sobre la placa de impresión.

La resina que se utilizó para la fabricación de los modelos funcionales fue la Monocure 3D Clear (Monocure 3D Rapid, Monocure Pty Ltd., Sydney, Australia) [141]. Según el fabricante las características más relevantes de esta resina son:

- Rango de reactividad (luz UV): 225nm ≤ λ_{uv} ≤ 420nm.
- Dureza Shore D: 80
- Viscosidad: 500 a 600 cps a 25°C.
- Contracción: 0.5%.
- Limpieza: Alcohol isopropílico.

Inicialmente se hicieron pruebas con dos de sus acabados: transparente y blanco. Si bien la respuesta resultó muy parecida, la transparente aportaba ventajas muy importantes desde el punto de vista de la operativa del proceso. Tal y como se expuso en el capítulo anterior, el uso de este acabado en combinación con la retroiluminación permite la observación del crecimiento de las cáscaras durante el transcurso de los ensayos. La figura 4.4 muestra resultados de la impresión con ambas resinas.



(a) (b)

Fig. 4.4. Modelo funcional fabricado. (a) Monocure 3D blanca. (b) Monocure 3D transparente.

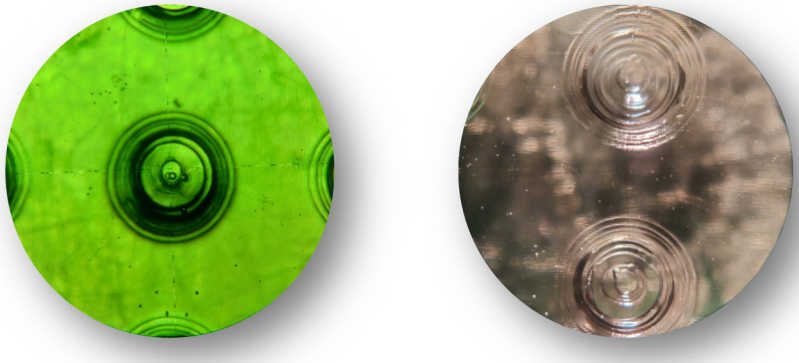
Una vez finalizado el procedimiento, se extrae la pieza separándola de la placa de impresión y se procede a su limpieza. Siguiendo las recomendaciones del fabricante se utiliza alcohol isopropílico para eliminar los restos de resina. Una vez limpias se retiran los soportes de impresión para disponer de la pieza definitiva. La figura 4.5 muestra el resultado tras la extracción.

(a) (b)

Fig. 4.5. Modelo funcional. (a) Resultado. (b) detalle de los soportes.

Teniendo en cuenta que las piezas, en esta tecnología de impresión, se conforman en posición suspendida, se realizó la preparación del modelo colocando la cara funcional hacia abajo. Con esta disposición se pretendía aprovechar la gravedad para facilitar la salida de la resina no curada de las cavidades semiesféricas. No obstante, dada la excesiva densidad de la resina, esta no desaparecía de forma espontánea, por lo que se en ocasiones se generaban atrapamientos en las zonas de máximo interés para la reproducción de detalles.

La figura 4.6 muestra imágenes con detalles de dichos atrapamientos. Para la inspección se utilizó un microscopio de medición con un aumento 20x (MitutoyoTM-1005B, Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japón).



(a) (b)

Fig. 4.6. Atrapamientos de resina vistos al microscopio (a) Fondo claro. (b) Fondo oscuro.

Inicialmente fue necesario un exhaustivo trabajo de limpieza en esas zonas, aplicando alcohol en forma pulverizada y con la ayuda de aire comprimido, para forzar la salida de la resina atrapada. El estado semicurado del modelo funcional, recién salido del proceso de impresión, dificultaba aún más las tareas de manipulación y limpieza. Debían extremarse las precauciones ante la posibilidad de incurrir en marcas, arañazos o cualquier otro tipo de defecto superficial, que pudiera afectar a la calidad de la pieza terminada. La figura 4.7 muestra detalles de restos de resina una vez finalizada la impresión.

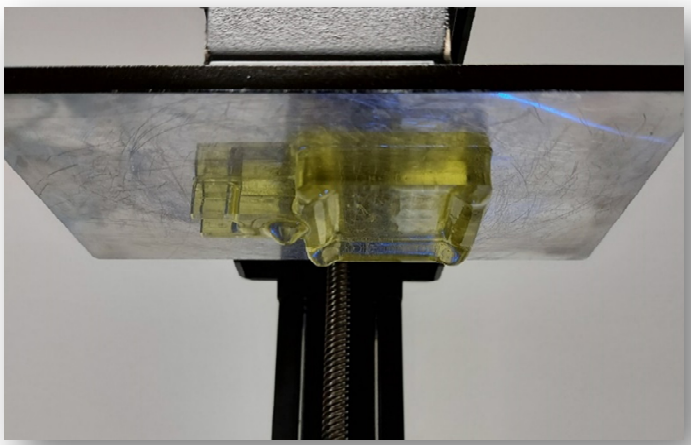


Fig. 4.7. Pieza sobre la placa de impresión. Detalle de atrapamientos de resina.

Para minimizar los problemas de atrapamiento y facilitar la limpieza y extracción de la resina, se decidió realizar una evolución del modelo funcional. Se incorporó un sistema de conductos con el objetivo de mejorar y facilitar la extracción de la resina no curada de las zonas de interés. El desarrollo se explicará en el apartado 4.2.1. de este mismo documento.

La pieza fabricada debe pasar por una fase final de curado. Para ello se utilizó una cámara de curado de 360° (XYZprinting UV Curing Chamber, XYZprinting Inc., New Taipei City, Taiwan). Este equipo emite una luz ultravioleta de forma constante y uniforme sobre impresiones realizadas con resinas de fotopolímero. El objetivo de este curado es aumentar la dureza y rigidez de las piezas impresas. El tiempo de curado se estableció en 1 minuto en base a diferentes pruebas. Tiempos de curado superiores generaban fragilidad en las piezas, lo que planteaba problemas durante su manipulación en las siguientes etapas del proceso combinado. La figura 4.8 muestra una imagen del equipo en condiciones de servicio.

Fig. 4.8. Cámara de curado.

Sus especificaciones técnicas más relevantes son las siguientes:

- Material compatible: resina de fotopolímero
- Curado: por luz ultravioleta
- Fuente de luz: 375nm ≤ λ_{uv} ≤ 405nm
- Carga máx sobre plataforma: 1,5kg
- Dimensiones: 255mm x 255mm x 352mm (largo x ancho x alto)
- Dimensiones funcionales: 180mm x 200mm (Ø x alto)
- Tiempo de curado: 1min a 60min (temporizado)
- Temperatura de funcionamiento: 15°C a 30°C

4.2.1. EVOLUCIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.

La pieza modelo ha sufrido una evolución en su geometría durante el desarrollo de los diferentes experimentos. Esta evolución es fruto de una búsqueda constante en la optimización del procedimiento y la mejora en la calidad de las piezas fabricadas.

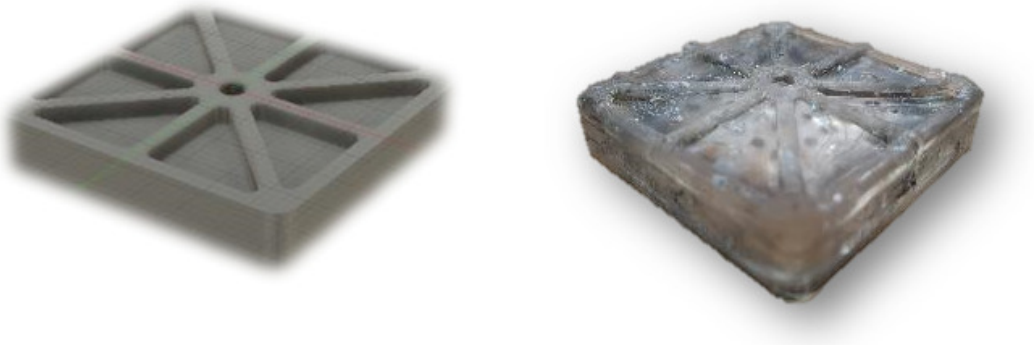
Las modificaciones tuvieron dos líneas de mejora. Por un lado, la necesidad de conseguir un modelo que reprodujera fielmente la geometría funcional pretendida. Esto afectaba exclusivamente a su optimización en el proceso de fabricación aditiva. Y por otro la necesidad de obtener unas piezas electro conformadas de calidad suficiente como para ser aceptadas, lo que se relacionaba con una optimización de cara al proceso de electro conformado.

- Evolución 1: durante el proceso de fabricación por tecnología aditiva, se producía un importante alaveo en la geometría del modelo funcional. La distorsión reflejaba una falta de paralelismo entre las caras anterior y posterior de la pieza, que no permitía mantener su estabilidad geométrica. Esta distorsión era provocada por la importante retracción que

sufría la resina durante el proceso de curado. La figura 4.9 muestra los efectos de este fenómeno.

Fig. 4.9. Primer modelo funcional plano.

Para evitar un aumento de espesor generalizado en la pieza que pudiera provocar mayores distorsiones, se decidió implementar una solución basada en el uso de rigidizadores en forma de nervios, que arriostraban los bordes de toda la pieza. Esta forma de aportar rigidez, sin aumentar espesor, es un recurso habitualmente utilizado en la conformación de estructuras metálicas, lo que sirvió de inspiración. La mejora resultó satisfactoria, por lo que pasó a formar parte del diseño del modelo funcional. La figura 4.5b muestra, a pesar de la mejora, inevitables distorsiones implícitas al proceso de fabricación.



(a) (b)

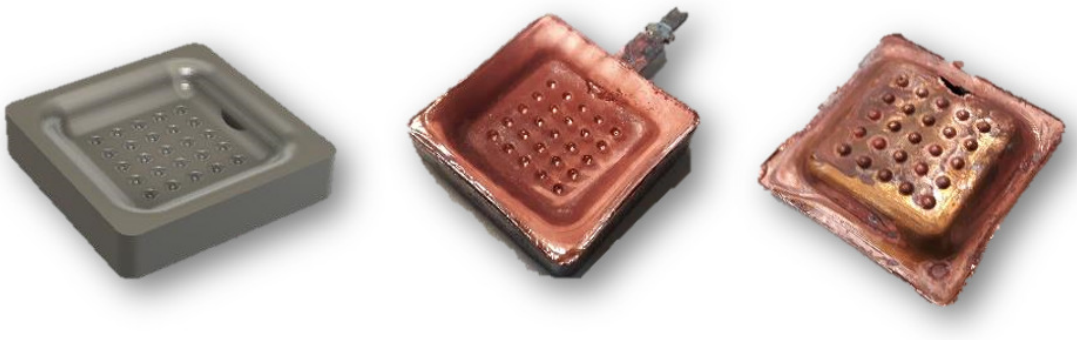
Fig. 4.10. Modelo funcional Evo 1. (a) Modelado. (b) Pieza fabricada.

Para realizar la conexión eléctrica con el resto del circuito se planteó realizar un alojamiento para un inserto metálico. Se escogió un terminal macho plano de dimensiones 8mm x 6mm x1mm (largo x ancho x alto). Este conector es de formato comercial y es utilizado habitualmente en las conexiones rápidas al aire entre cables en equipos electrónicos. La figura 4.11 muestra uno de los conectores utilizados durante el desarrollo de los experimentos.

Fig. 4.11. Conector

Este primer diseño, con sistema de unión por forma mediante inserción, resultó válido como punto de partida. Permitió realizar varias series de ensayos enfocados en determinar el nivel de reproducción de las piezas.

La figura 4.11C muestra la marca del conector en una pieza electroconformada finalizada.



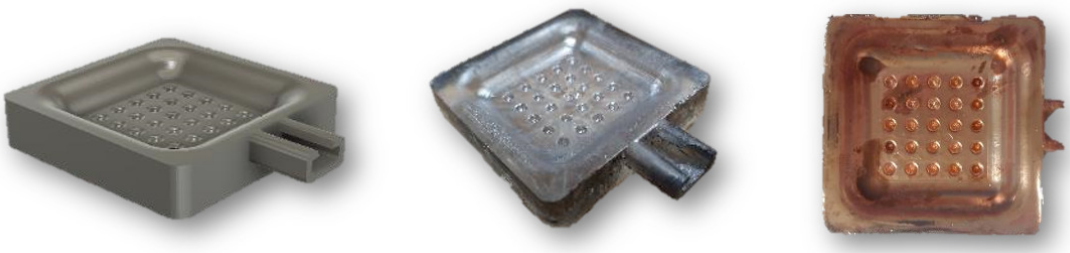
(a) (b) (c)

Fig. 4.12. Modelo funcional Evo 1. (a) Modelado. (b) Inserto metálico. (c) Cáscara obtenida.

- Evolución 2: una de las principales dificultades a las que se enfrentó el diseño del modelo funcional era asegurar la conductividad eléctrica. El sistema de conexión del modelo funcional Evo 1, si bien permitía la electrodeposición con buenos resultados, su uso generaba un defecto relevante en la cáscara de cobre que afectaba a la zona funcional. Además, la inserción del elemento metálico en los sucesivos usos iba perdiendo entidad por desgaste, lo que ponía en duda su solvencia a partir de un número de ensayos por determinar.

Se decidió modificar la geometría del modelo funcional, generando en una de sus caras un alojamiento hembra para el mismo conector plano. Este alojamiento se denominará en lo sucesivo brazo conector. Esta modificación añadía una dificultad extra al procedimiento de fabricación aditiva ya de por sí complejo. La inclusión de un voladizo excéntrico planteó nuevos desafíos que necesitaron de un arduo trabajo de mejora en los soportes de impresión.

No obstante, se consiguió optimizar el proceso y conseguir buenos resultados. La figura 4.13 muestra imágenes del modelo funcional Evo 2.



(a) (b) (c)

Fig. 4.13. Modelo funcional Evo 2. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida.

A partir de esta evolución se realizaron la mayor parte de los ensayos de validación del equipo.

- Evolución 3: la evolución 2 resultó una solución solvente que se utilizó en gran parte de los ensayos posteriores. No obstante, se produjeron algunos experimentos fallidos. Tras analizar las posibles causas, se detectó un fallo en la continuidad del conector. La inserción del conector plano en el alojamiento del modelo funcional generaba desgaste durante los usos continuados. A partir de cierto número de ensayos resultaba no confiable.

Se decidió, por tanto, realizar una nueva evolución que garantizara la integridad de la unión. Para ello se estimó necesaria la sustitución del sistema de contacto con unión por forma (inserción) para pasar a un contacto por unión mecánica. Nuevamente el modelo funcional debía de asumir los cambios, viendo modificada la geometría del voladizo.

La introducción de esta evolución consiguió asegurar la integridad del contacto eléctrico durante sucesivos experimentos, al eliminar la posibilidad de desgaste por manipulación. Como beneficio añadido se mejoró el resultado de la electrodeposición. La desaparición del encaje de forma generó igualdad geométrica en todos los bordes de la pieza, eliminando la necesidad de mecanizado para igualar dichos bordes.

La figura 4.14 muestra imágenes del modelo funcional Evo 3.

(a) (b) (c)

Fig. 4.14. Modelo funcional Evo 3. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida.

- Evolución 4: esta evolución surge tras la necesidad de eliminar los restos de resina no curada, en las zonas más sensibles del modelo funcional, principalmente los fondos de las cavidades semiesféricas. La excesiva densidad de la resina generaba atrapamientos muy difíciles de extraer. En algunos casos estos atrapamientos pasaban a formar parte del material, formando burbujas y por tanto imperfecciones que invalidaban las piezas.

  Se planteó incorporar un sistema que permitiera la expulsión forzada mediante aire soplado. Para ello, se practicaron unas micro perforaciones de Ø250µm en el fondo de las cavidades semiesféricas, que se desarrollaban en profundidad y de forma cónica hacia la cara posterior del modelo funcional.

  Se generó, por tanto, un sistema de conductos de ventilación con un orificio de salida de 1mm de diámetro, que conectaban la cara funcional con la cara no funcional. De esta manera se podía insuflar aire a presión desde la parte trasera de la pieza, facilitando la expulsión de toda la resina no curada acumulada. La figura 4.15 muestra imágenes del modelo funcional Evo 4.

(a) (b) (c)

Fig. 4.15. Modelo funcional Evo 4. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida.

- Modelo plano: durante el desarrollo de los experimentos se planteó la posibilidad de generar un modelo no funcional, un modelo sin patrones. Se pretendía que sirviera como elemento de comparación para verificar algunas de las variantes de experimentos que permite el equipo, de manera que se pudiera establecer y contrastar la posible influencia de la forma del modelo en los parámetros de trabajo del sistema de electroconformado.

Este modelo se puede considerar como una involución en su aplicación sobre la cara funcional del modelo, al tratarse de una geometría más sencilla. Es un elemento que mantiene las mismas dimensiones generales, pero presentando una cara frontal totalmente plana.

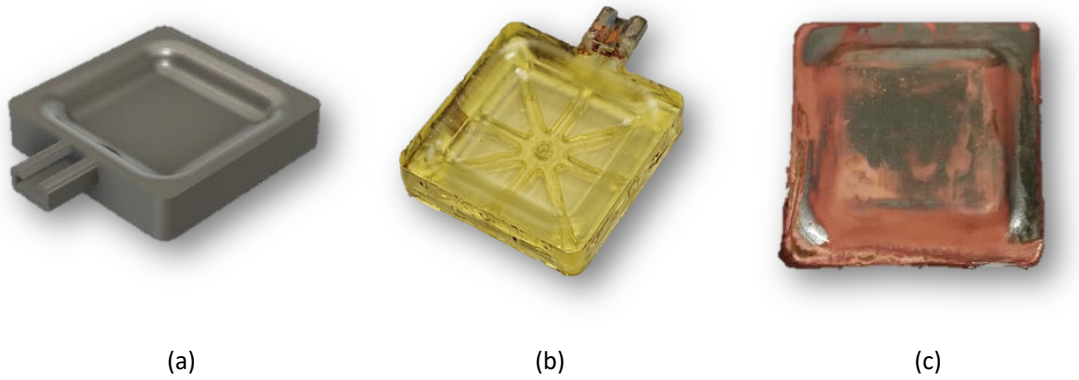
No obstante, cuenta con un potencial de uso, más allá de la simple comparación, ya que la cara plana se muestra como un exponente de la capacidad de reproducción de la huella de impresión, en base a la resolución máxima de la máquina utilizada.

La figura 4.16 muestra imágenes del modelo plano.

(a) (b) (c)

Fig. 4.16. Modelo plano. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida.

- Evolución 0: con el mismo objetivo del modelo plano se decide implementar otro modelo básico, esta vez funcional. Mantiene las dimensiones y geometría de sus homólogos, pero desaparece el patrón semiesférico. Las series de experimentos con este modelo estarían enfocadas a establecer el nivel de influencia de los patrones. La figura 4.17 muestra imágenes del modelo funcional Evo 0.



(a) (b) (c)

Fig. 4.17. Modelo funcional Evo 0. (a) Modelado. (b) Modelo fabricado. (c) Cáscara obtenida.

4.3. FASE 2: METALIZADO.

Para que el proceso de electro conformado pueda realizarse, la corriente eléctrica debe circular por el cátodo. Este debe ser, por tanto, conductor. En la fase 1 el modelo funcional ha sido exitosamente fabricado sobre una resina foto polimérica, que sin embargo tiene como inconveniente su falta de conductividad.

El siguiente paso del proceso combinado es conseguir que el modelo de resina sea conductor. De forma sencilla se puede recurrir a preparar la superficie mediante la aplicación de una capa de pintura conductora. Opciones como la tinta de grafito conductiva, o la tinta de plata utilizadas habitualmente para la reparación o preparación de placas de circuito impreso (PCB), se presentan como una buena alternativa. De forma más artesanal, tintas generadas a base de la

mezcla de polvo de aluminio, polvo de cobre o polvo de grafito con acetona y esmalte, se plantean como soluciones todavía más económicas.

En este caso y gracias a la disponibilidad del equipo, se ha utilizado un proceso más tecnológico y fiable. Para realizar el tratamiento de la superficie funcional se ha utilizado un proceso de pulverización catódica de oro-paladio. Este proceso se ha llevado a cabo en un equipo de laboratorio utilizado específicamente para el tratamiento de superficies (SC7620 Mini Sputter Coater, Quorum Technologies Ltd., Kent, UK). La figura 4.18 muestra una imagen del equipo utilizado.

Fig. 4.18. SC7620 Mini Sputter Coater/Glow Discharge System. [142]

Como ya se expresó en el capítulo introductorio de esta Tesis, la pulverización catódica o sputtering es un proceso físico causado por la extracción de átomos de la superficie de un sólido, mediante el bombardeo de partículas de gran energía. Los iones necesarios para este proceso se obtienen de un plasma que se genera en el interior del equipo de pulverización. El intercambio entre partículas producido por las colisiones modifica la morfología de la superficie

atacada. Este proceso es habitualmente utilizado para el análisis de la capa superficial de un material, para eliminar átomos de la superficie y la posterior deposición de películas delgadas o para el mecanizado de superficies.

El SC7620 es un equipo de revestimiento por pulverización catódica y descarga luminiscente (megatron sputtering), que utiliza Argón como gas de inyección. Su principal aplicación es la preparación de muestras no conductoras para su posterior observación en un microscopio electrónico de barrido (SEM) [142].

Este equipo opera a un potencial fijo de entre 800 voltios y 1200 voltios DC dependiendo de la corriente de plasma. Durante el proceso, se aplica una diferencia de potencial de alto voltaje entre el objetivo (cátodo) y la placa base (ánodo), que es el potencial a tierra. Un enclavamiento de presión asegura que el suministro de alta tensión no se pueda activar hasta que la presión de la cámara de vacío se igual o inferior a 10^{-1} mbar. El gas inerte a baja presión (Argón) se filtra en la cámara de vacío para proporcionar un medio para la ionización. Los electrones emitidos por el cátodo, concentrados en las proximidades del objetivo por el campo magnético, chocan con las moléculas de gas, produciendo iones positivos (debido a emisión de electrones). Los Iones positivos atraídos por el potencial negativo del cátodo, bombardean el objetivo, provocando la erosión del material objetivo. Los átomos desalojados del objetivo, que caen hacia la muestra, siguen múltiples trayectorias debido a colisiones con el gas ionizado, recubrimiento la muestra en todas las caras expuestas. En la cámara de descarga que está compuesta por un vidrio transparente se puede ver un resplandor de descarga de gas centrado alrededor del cátodo.

Tras analizar la tecnología y el equipo, se planteó la posibilidad de utilizar sus capacidades para la preparación de las superficies para el proceso de electro conformado. Las características geométricas de la cámara de descarga, un cilindro de diámetro 100mm y 100mm de altura, se

adaptaban perfectamente a las dimensiones de la pieza funcional. La figura 4.19 muestra en imágenes la cámara de descarga del equipo con uno de los modelos funcionales en su interior.

Fig. 4.19. Modelo funcional en la cámara de descarga

Una vez contrastada la compatibilidad se iniciaron las primeras pruebas, obteniendo buenos resultados en el recubrimiento de las superficies.

Según el fabricante en aplicaciones de preparación para el SEM se recomiendan espesores de capa uniformes de entre 50 Å y 300 Å. La estimación de los valores de espesor depositado se puede obtener de forma teórica mediante la siguiente ecuación [143]:

$$d = K \cdot I \cdot V \cdot t$$

donde:

- d: espesor depositado en Angstrom.

- K: constante experimental basada en el metal y gas utilizados en el procedimiento a una distancia aproximada de 45mm hasta la pieza. Para procedimientos con oro y argón, K= 0,17
- I: corriente de plasma en mA
- V: voltaje aplicado en kV
- t: tiempo de deposición en segundos.

Para el recubrimiento del modelo funcional se utilizaron los parámetros recomendados por el fabricante, es decir una corriente de plasma de 18mA a una tensión de 1kV durante 120 segundos. Sustituyendo estos valores en la fórmula resulta:

$$d = 0{,}17 \times 18 \times 1 \times 120 = 367\ \text{Å}$$

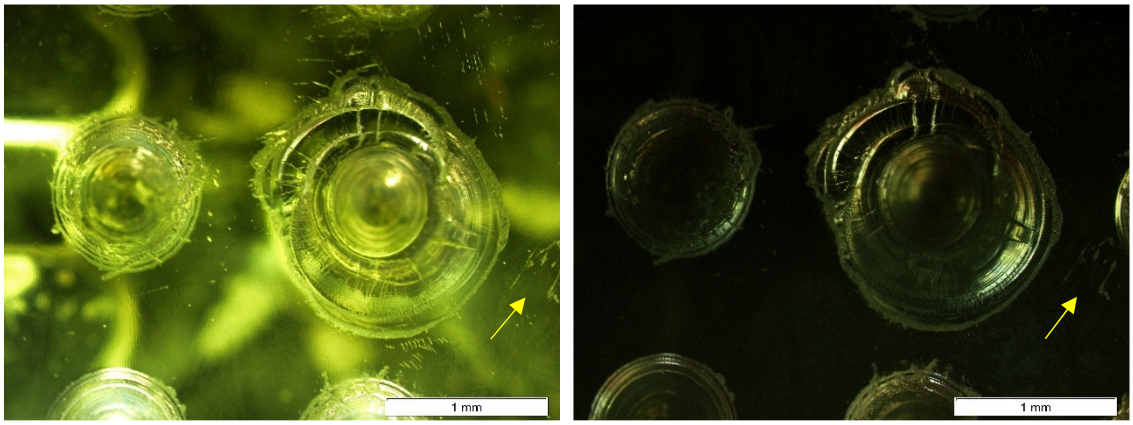
Durante el desarrollo de los experimentos y para garantizar el correcto recubrimiento de toda la geometría funcional, se decidió establecer en tres el número de deposiciones. El espesor teórico de la capa depositada es aproximadamente 101nm. La figura 4.20 muestra imágenes del resultado de este procedimiento.

(a) (b)

Fig. 4.20. Metalizado. (a) Modelo en cámara de descarga. (b) Resultado para Evo2.

Con la utilización de este procedimiento se asegura que no se verán afectados los detalles de la geometría original, ya que la escala dimensional del espesor de capa depositado es muy inferior a la de los detalles geométricos que se pretenden reproducir. Esto genera una ventaja tecnológica respecto a otras formas de aportar conductividad expuestos al inicio de este apartado.

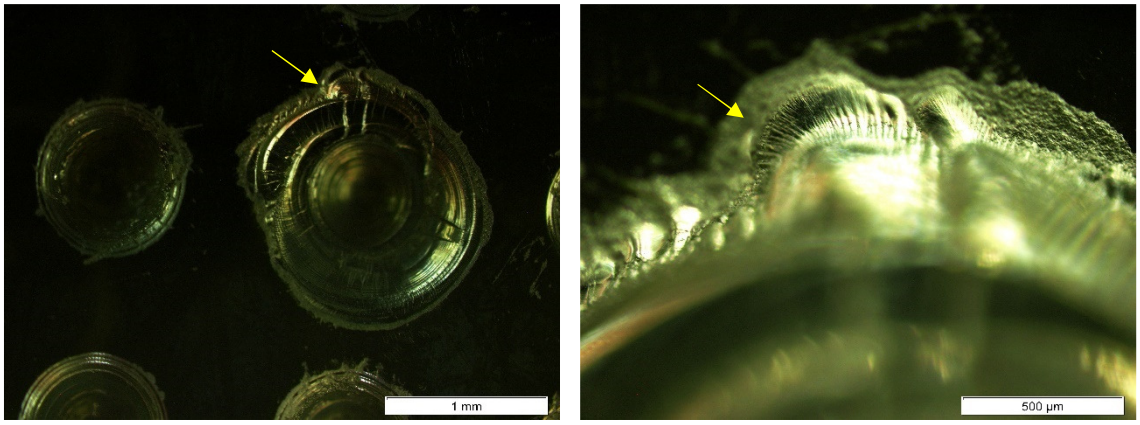
No obstante, y para confirmar la uniformidad de la deposición a lo largo de toda la geometría, se hicieron revisiones exhaustivas al microscopio, (Olympus BX51, Olympus Corporation, Tokyo, Japón) obteniendo resultados excelentes. La figura 4.21 muestra en imágenes como incluso pequeñas imperfecciones, derivadas de la manipulación de las piezas, se mantienen inalteradas después del tratamiento superficial.



(a) (b)

Fig. 4.21. Inspección de la superficie. (a) Antes de metalizar. (b) Después del metalizado.

La figura 4.22 muestra en imágenes la calidad conseguida con el proceso de metalizado. Como se puede observar con un mayor aumento, los detalles geométricos, en este caso defectos de fabricación, se mantienen inalterados incluso a escala micrométrica.



(a) (b)

Fig. 4.22. Vista al microscopio de detalles del metalizado. (a) Aumento x20. (b) Aumento x40

4.3.1. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.

En este apartado se describe el procedimiento de trabajo realizado con el equipo, en base a las recomendaciones del fabricante.

4.3.1.1. Identificación del equipo.

El sistema de metalizado está compuesto por tres elementos:

1. Botella de gas.
2. Bomba de vacío.
3. Equipo de pulverización catódica.

La figura 4.23 muestra una imagen de estos componentes en condiciones de servicio.

Fig. 4.23. Equipo de metalizado

4.3.1.2. Identificación del panel frontal del SC7620.

A continuación, para una mejor comprensión de las diferentes etapas de trabajo que se realizan durante el proceso de sputtering, se va a realizar una breve identificación de los controles e indicadores presentes en el panel de control del equipo de pulverización catódica. La figura 4.24 muestra una imagen del panel frontal del SC7620.

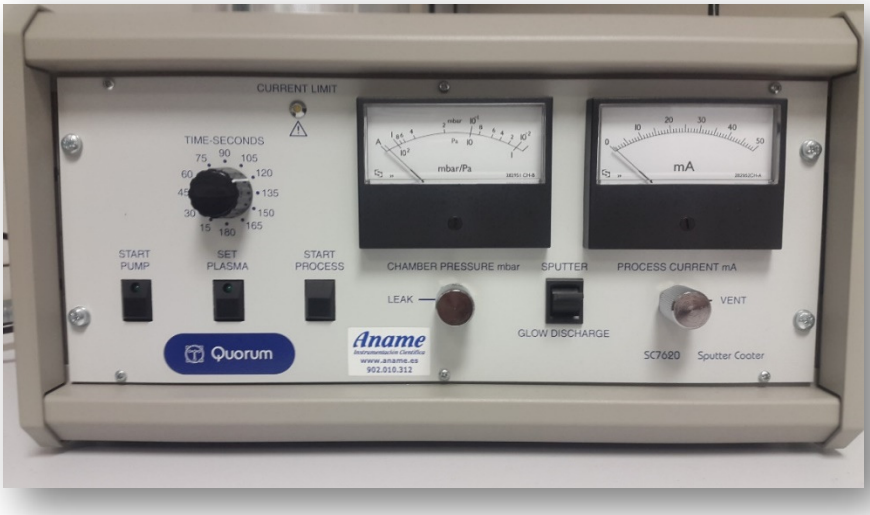


Fig. 4.24. SC7620. Panel de control

Los elementos presentes en el panel de control son:

- *TIME – SECONDS*: botón selector con 12 posiciones que permite seleccionar el tiempo de exposición.
- *CURRENT LIMIT*: Led Luminoso que indica fallo en el proceso. Para su reinicio es necesario apagar el equipo.
- *CHAMBER PRESSURE mbar*: medidor de presión analógico que da lectura de la depresión existente en la cámara.
- *PROCESS CURRENT mA*: amperímetro analógico que da lectura del flujo de corriente de plasma.
- *START PUMP*: botón de encendido/apagado de la bomba de vacío.
- *SET PLASMA:* interruptor para la selección de la corriente de plasma. Durante su operación debe mantenerse pulsado.
- *START PROCESS:* interruptor para el inicio del proceso de pulverizado.

- *LEAK*: botón regulador que permite el control de la válvula de fuga de gas en la cámara para el control de la corriente de plasma.
- *SPUTTER/GLOW DISCHARGE*: interruptor de selección de los tipos de funcionamiento. Por defecto en posición SPUTTER.
- *VENT*: botón regulador de control de la válvula de admisión de gas.

4.3.1.3. Operativa del procedimiento de metalizado.

1) Conectar el equipo a la alimentación.
2) Encendido del equipo. Para ello se deberá pulsar el interruptor disponible en la parte trasera del equipo. La figura 4.25 muestra la ubicación del interruptor.

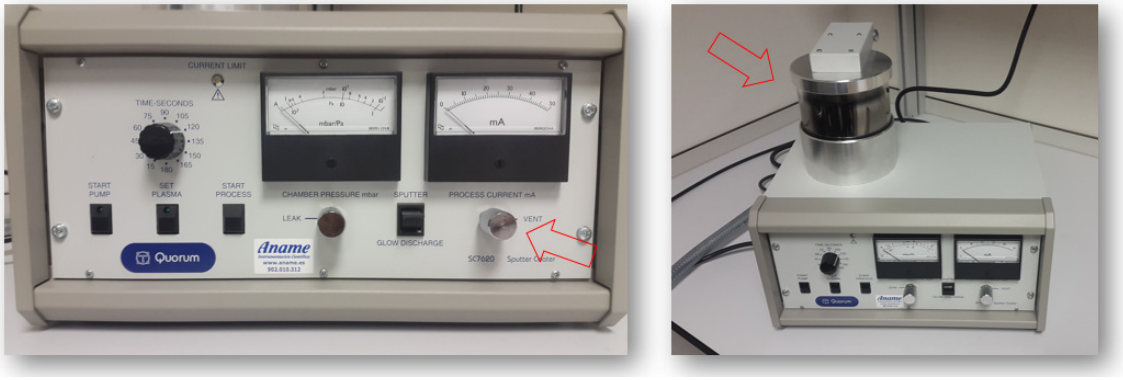
Fig. 4.25. Manejo del SC7620: encendido del equipo.

3) Apertura del paso de gas hacia el sistema. Para ello se deberá girar en sentido antihorario, la válvula situada en la parte alta de la botella de gas argón, hasta conseguir una presión de salida de 0.5bar. La botella contiene gas Argón (RT ARGON BIP – X50S). La figura 4.26 muestra la ubicación de la válvula.

Fig. 4.26. Manejo del SC7620: control del paso de gas.

4) Apertura de la cámara de pulverización. Para ello será necesario eliminar la presión de vacío que permanece en su interior. Esta presión negativa, se genera al final de cada uso del equipo para mantener la cámara aislada del ambiente durante los espacios de tiempo no operativos.

Se deberá actuar sobre el botón regulador *VENT,* girando en sentido antihorario hasta oír un pequeño sonido metálico. En ese momento se podrá manipular la tapa para tener acceso a la cámara. Una vez abierta, cerrar el paso de gas girando el botón regulador *VENT* en sentido horario. La figura 4.27 muestra la ubicación de la cámara de descarga y del botón regulador de la válvula de control *VENT*.



(a) (b)

Fig. 4.27. Manejo del SC7620: (a) Control VENT. (b) Cámara de pulverización.

5) Ubicación del modelo funcional. Para ello se debe abrir la tapa de la cámara de descarga y colocar el modelo funcional en el centro de esta. Durante diferentes experimentos, no se han observado diferencias relevantes en el acabado de las piezas en función de la orientación. De forma general y comparando el circulo de la cámara de descarga con el aro exterior de un reloj de agujas, las piezas se han colocado con el alojamiento para el conector orientado a las 12. La figura 4.28 muestra la ubicación del modelo en la cámara de descarga.

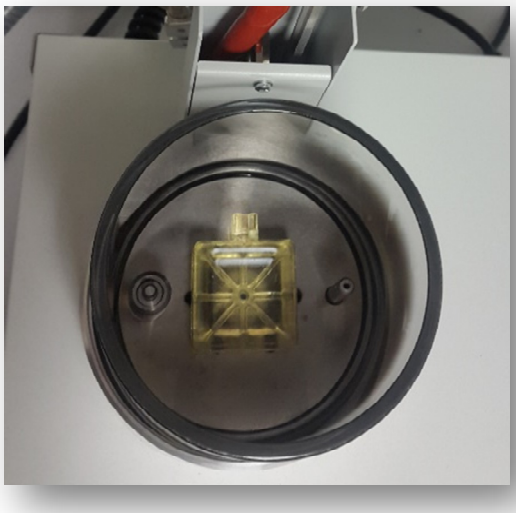


Fig. 4.28. Manejo del SC7620: colocación del modelo en la cámara de pulverizado.

6) Comprobación de válvulas *LEAK* y *VENT.* Se debe comprobar que ambas están cerradas. Para ello se debe asegurar el giro de los controles en sentido horario hasta para verificar que no hay posibilidad de rotación. La figura 4.29 muestra la ubicación de ambos controles.

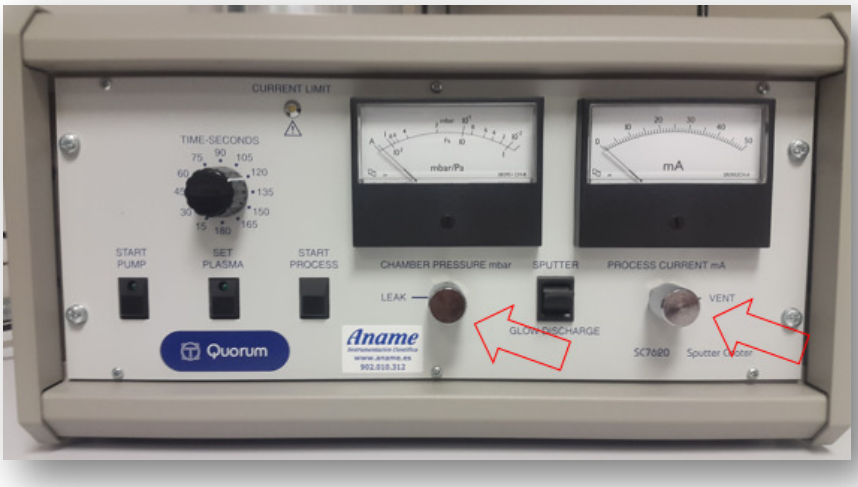


Fig. 4.29. Manejo del SC7620: ubicación de controles de válvulas LEAK y VENT.

7) Ajustar tiempo de recubrimiento. Para ello girar el selector *TIME SECONDS* hasta la posición deseada. Por defecto se utiliza recomendación del fabricante, que es de 120s. La figura 4.30 muestra la ubicación del selector mencionado.

Fig. 4.30. Manejo del SC7620: ajuste tiempo de operación.

8) Generación de vacío en la cámara de descarga. Para ello es necesario encender la bomba de vacío pulsando el botón *START PUMP* del cuadro de mandos. En ese momento se empezará a generar presión negativa. La aguja del indicador de presión *CHAMBER PREASURE mbar* se desplazará hacia la derecha. Para completar esta etapa será necesarios alcanzar 0,1mbar, lo que aproximadamente necesita de 3minutos. La figura 4.31 muestra imagen del indicador de presión.

Fig. 4.31. Manejo del SC7620: generación de vacío.

9) Apertura del paso de gas hacia la cámara de descarga. Una vez alcanzada la presión negativa prescrita, se deberá abrir válvula de *LEAK* para permitir el paso del gas. Para ello manipular el botón regulador en sentido antihorario y mantener en esa posición un intervalo de tiempo que oscila entre 10s y 15s. Se podrá comprobar como aumenta la presión, la aguja del indicador se desplazará hacia la izquierda. La figura 4.32 muestra la posición de la aguja en el indicador durante el transcurso del intervalo de tiempo.

Fig. 4.32. Manejo del SC7620: configuración con válvula *LEAK* abierta.

10) Cerrar la entrada de gas hacia la cámara de descarga. Se deberá actuar de forma contraria a lo especificado en el punto anterior. Para ello se debe actuar sobre el botón regulador *LEAK* girando en sentido horario. En ese momento volverá a comenzar la generación de vacío en la cámara de descarga. La aguja del indicador se desplazará hacia la derecha. Para completar el proceso será necesario llegar hasta los $4x10^{-2}$ mbar. La figura 4.33 muestra la posición de la aguja en el indicador de presión al finalizar esta etapa.

Fig. 4.33. Manejo del SC7620: lectura de presión en la cámara al final de la etapa.

11) Ajuste de la intensidad de corriente del proceso. Una vez alcanzada la presión de vacío, se debe ajustar la intensidad de corriente del proceso. Para ello es necesario abrir la válvula *LEAK* girando el botón regulador en sentido antihorario y de forma progresiva, mientras se mantiene presionado el botón *SET PLASMA*. Se comprobará que se produce un aumento de presión, la aguja del indicador de presión se desplaza de nuevo hacia la derecha. A la misma vez, irá aumentando la intensidad de corriente de descarga, la aguja del indicador *PROCESS CURRENT mA* también se desplaza hacia la derecha. Se deberá ajustar el giro del botón regulador *LEAK* hasta conseguir un valor de descarga de 18mA. La figura 4.34 muestra una imagen de la manipulación durante esta etapa.

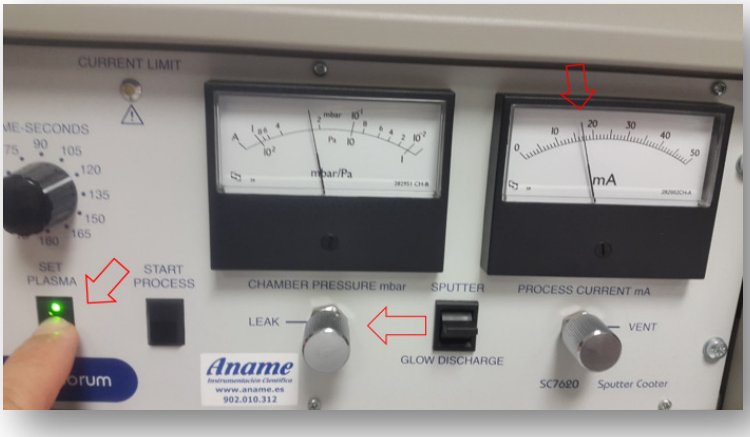


Fig. 4.34. Manejo del SC7620: selección de la corriente de descarga.

12) Activar el proceso de descarga. Para ello será necesario dejar de pulsar el botón *SET PLASMA* y a continuación pulsar el botón *START PROCESS,* manteniendo la válvula *LEAK* abierta. A partir de ese momento se producirá el inicio del proceso de metalizado. Se podrá comprobar cómo se genera un destello de color violeta intenso en el interior de la cámara de descarga. Este color es característico de un gas en estado plasmático. La duración del proceso

coincidirá con el tiempo programado en el paso 7, finalizando de forma automática. La figura 4.35 muestra imágenes del proceso.

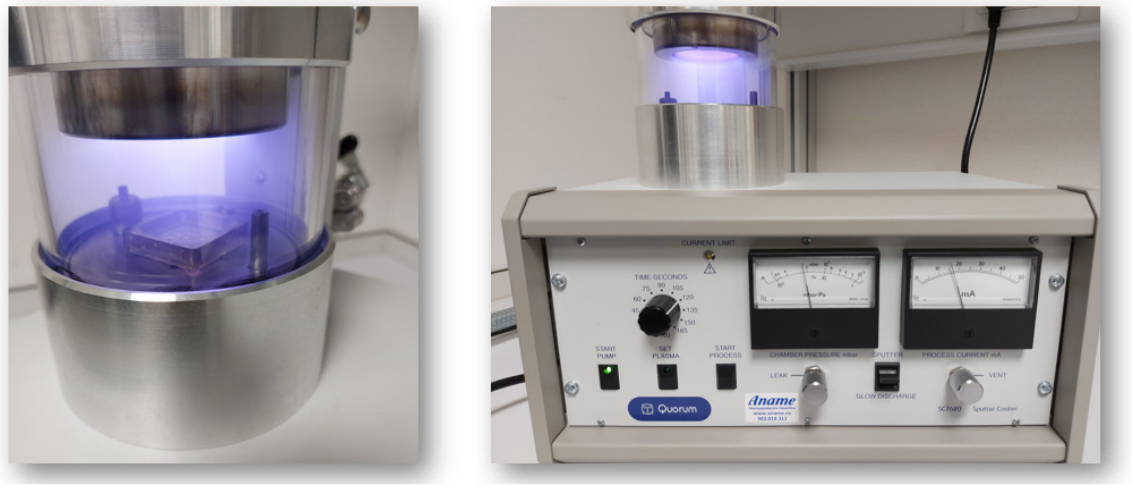


Fig. 4.35. Manejo del SC7620: inicio del proceso de metalizado.

13) Finalización del proceso. Una vez transcurrido el tiempo de proceso, desaparece la luz intensa y la aguja del indicador de corriente se va la posición cero. El proceso de metalizado ha finalizado. Es necesario cerrar la válvula *LEAK* para completar el procedimiento.

Una vez finalizada la metalización podemos repetir el procedimiento cuantas veces consideremos oportunas. Cerrada la válvula *LEAK* la presión comenzará a disminuir y podremos realizar otra deposición, repitiendo el procedimiento desde el apartado 10.

14) Extracción de la pieza. Para ello inicialmente debemos pulsar el botón *START PUMP* para detener la bomba de vacío. A continuación, girar el botón regulador *VENT* para eliminar la presión negativa de la cámara e igualarla a la presión atmosférica. De nuevo se repetirá el sonido metálico que indica que se puede abrir la tapa de la cámara de descarga y extraer la muestra de su interior. La figura 4.36 muestra un modelo funcional tras finalizar el proceso de metalizado.

Fig. 4.36. Modelo funcional metalizado.

3.3.1.1. Pesaje del modelo funcional.

Los modelos funcionales se pesaban antes y después del proceso de metalizado para establecer una comparación. Para realizar la medición se utilizó una báscula de precisión calibrada (Mettler-Toledo AB204-S, Mettler-Toledo LLC, Columbus, OH, USA), con número de identificación MA02110. Este equipo es capaz de medir un mínimo de 10mg con una división de escala de 1mg.

Una vez realizada la medición se pudo que el modelo funcional perdía masa durante el procedimiento de metalizado. Esto, sin duda es objeto de contradicción, ya que se ha utilizado un proceso de adición de material. No obstante, y tras analizar los datos de una serie de ensayos, realizados en las mismas condiciones, se pudo comprobar que el patrón de pérdida de masa se repetía. Los valores oscilaban entre 0,120g y 0,180g.

La explicación se ha planteado en base al proceso de vacío generado en la cámara de pulverización. La cámara de descarga actúa como un sistema de autoclave. La disminución de presión termina de compactar la pieza de resina, eliminando parte del aire atrapado durante su conformación, de tal manera que la pérdida de masa es superior a la ganancia de masa depositada. Igualmente, el proceso de pulverización lleva implícito la eliminación de material de

la pieza substrato, lo que también provoca pérdida de masa. Las figuras 4.29 a y 4.29 b muestran imágenes del pesado de un modelo funcional antes y después del metalizado, donde se puede apreciar la diferencia de masas.

(a) (b)

Fig. 4.37. Pesado del modelo funcional. (a) Antes del metalizado. (b). Después del metalizado.

Antes de dar por finalizada esta fase se realiza una última revisión para verificar la conductividad de toda la superficie expuesta. Esta comprobación se realiza en todas las partes sensibles de la pieza: bordes, alojamiento del conector, fondos de cavidades y superficie central.

El valor de la resistencia fue cuantificado y se obtuvieron valores entre 160Ω y 230Ω. Las diferencias entre las distintas partes de la pieza no son relevantes, por lo que, en principio, no deberán afectar al fenómeno de deposición más de lo que lo hace la propia componente geométrica de la pieza. La figura 4,38 muestra imágenes del proceso de verificación.

(a) (b) (c)

Fig. 4.38. Verificación de conductividad. (a) Alojamiento. (b) fondos. (c) bordes.

4.4. FASE 3: ELECTROCONFORMADO.

En esta fase se lleva a cabo la aplicación práctica del equipo desarrollado, con la participación de todos sus componentes. A continuación, se indican las diferentes etapas y configuraciones que se han de realizar para la correcta fabricación de las piezas.

Este procedimiento se ha desarrollado en base a la experiencia adquirida tras la realización de diferentes series de ensayos y tras un posterior proceso de optimización.

4.4.1. ENMASCARADO DEL MODELO FUNCIONAL.

El procedimiento de sputtering una deposición sólo en la cara expuesta, para transformarla en una superficie activa. Sin embargo, tras la realización de varias series de experimentos, se pudo comprobar que la nube de partículas generada dentro de la cámara de pulverización también deposita, aunque en menor medida, en las caras laterales o perpendiculares a la superficie expuesta, convirtiéndolas también en superficies activas.

Este hecho provoca que al realizar el proceso de electro conformado se produzcan crecimientos en zonas no deseadas, que influye negativamente en la calidad de las piezas.

Como ya se adelantó en el capítulo anterior, en algunos casos, este crecimiento evolucionaba incluso hacia las zonas no conductoras situadas en la parte trasera de los modelos funcionales.

El primer paso de esta tercera fase consiste, por tanto, en la preparación del modelo funcional para evitar la aparición de estos fenómenos de deposición indeseados. Para ello, se utiliza el protector diseñado al efecto, cuyo desarrollo se ha explicado en el capítulo 3.

A pesar de que el ajuste entre el protector y el modelo funcional presentaba bastante solvencia, los materiales y las tecnologías empleadas, así como la operativa de la fijación no permitían una unión totalmente estanca. Diferentes experimentos determinaron diminutos crecimientos en las zonas de ajuste, que nuevamente afectaban a la calidad de las piezas y complicaban la separación entre cáscara y modelo funcional.

Para facilitar el desmoldeo e impedir estos micro crecimientos se decidió aislar las zonas de contacto. Los métodos más efectivos y de más fácil aplicación consistieron en el esmaltado de las superficies o la colocación de un aislamiento con cinta aislante. Los mejores resultados se consiguieron con la segunda opción, ya que proporcionaba mayor operatividad y rapidez, a la vez que aseguraba una separación espontánea entre cáscara y modelo funcional. La figura 4.39 muestra el resultado de esta etapa de preparación.

(a) (b)

Fig. 4.39. Modelo funcional. (a) Con aislamiento. (b) Con aislamiento + protector.

4.4.2. PREPARACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ALIMENTACIÓN Y MEDIDA.

Las prestaciones del *KEITHLEY 2460 SourceMeter®*, son una de las grandes aportaciones al desarrollo de esta tesis doctoral. Su capacidad para ejercer como fuente de poder a la misma vez que para realizar mediciones resultaron, de una ayuda inestimable. El *KEITHLEY 2460 SourceMeter®* es un instrumento que ofrece la posibilidad de programar sus modos de funcionamiento y operarlos de forma automática.

Para entender el modo de funcionamiento automático, es necesario introducir el concepto de Scripts [135]. Los Scripts son instrucciones que permiten controlar los modos de funcionamiento del equipo. Estas instrucciones pueden ser más o menos complejas y se pueden programar para su posterior ejecución.

En la pantalla principal se dispone de un menú de herramientas que permiten acceder a opciones para seleccionar, ejecutar, gestionar y personalizar los Scripts. La figura 4.40 muestra la posición del menú de acceso a esta opción en la pantalla principal del equipo.

Fig. 4.40.KEITHLEY 2460 SourceMeter®: Menú Scripts.

Los scripts se pueden programar directamente sobre la pantalla táctil del equipo, de tal manera que con el uso de un sistema de diagramas de flujo se pueden implementar instrucciones de funcionamiento sencillas. La figura 4.41 muestra a modo de ejemplo, un diagrama de flujo, con una programación para variar el caudal de la bomba de agitación del baño electrolítico. Esta programación se utilizó durante las primeras pruebas de funcionamiento.

Fig. 4.41. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de programación.

Para instrucciones más complejas es necesario recurrir a una programación más tradicional a base de líneas de comando. Para ello el fabricante dispone de un software de programación específico denominado *TestScriptBuilder*.

Para poder explotar las capacidades del instrumento se hizo necesario la familiarización e interacción con este software. La programación de las instrucciones consiguió una aportación relevante en el uso del instrumento y la mejora de las prestaciones del equipo de micro-electroconformado.

Para el desarrollo de los experimentos y a modo de prueba de validación de las capacidades y el potencial del uso de este modo de trabajo, se llevó a cabo la programación de un *Script*. De esta manera, se generó un código de instrucciones que permitió gobernar el funcionamiento del equipo de forma automática. Esta programación le indica al equipo que tipo de pulsos de corriente debe generar y su duración. Al mismo tiempo crea buffers de almacenamiento de datos y parametriza el almacenamiento de las lecturas de los parámetros eléctricos del proceso, durante el desarrollo del experimento. El código del programa desarrollado se puede consultar en el Anexo II.

No obstante, el equipo también permite una forma de trabajo manual. El operador puede dar salida de energía y tomar lecturas de forma rápida, sin tener que recurrir al uso de los *Scripts*. Este tipo de funcionamiento puede ser de utilidad para la reproducción de experimentos con necesidades más básicas desde el punto de vista eléctrico.

Una vez preparado el equipo y seleccionado el modo de funcionamiento solo resta su activación. Para ello se comienza en la pantalla principal desde la que se selecciona el botón *Run***.** Se accede a la pantalla *Run Scripts***,** desde la que se selecciona el *Script* que se desea y de esta manera el programa de instrucciones queda cargado por para su ejecución.

En el momento que se vaya a comenzar el experimento sólo es necesario pulsar el botón *Run Selected* y se desencadenará el listado de instrucciones programadas. El procedimiento de electroconformado pasa a ser autónomo. La figura 4.42 muestra imágenes de la ubicación de los diferentes botones en la pantalla del equipo.

(a) (b)

Fig. 4.42. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: (a) Pantalla principal. (b) Pantalla *RUN SCRIPTS.*

4.4.3. PREPARACIÓN DEL DCAB.

Tal y como se explicó en el capítulo 3, el DCAB es el dispositivo de control automático que maneja la agitación del baño electrolítico, y se puede utilizar en modo manual o en modo automático.

Para comenzar con un experimento se debe seleccionar el modo de funcionamiento y activar el DCAB previo a la activación del instrumento de alimentación y medida.

En caso de selección de modo manual deberá establecerse el valor de potencia de trabajo de la bomba. En caso de selección de modo automático deberá verificarse el valor de consigna de la intensidad de corriente de comparación, para garantizar la correcta aportación del equipo al desarrollo del experimento. El valor programado por defecto es 0,10A.

4.4.4. PREPARACIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA.

El sistema de vigilancia tiene como función el seguimiento del desarrollo del experimento. A pesar de que su funcionamiento es totalmente automático, y la grabación es continua, es importante realizar una revisión previa para establecer que el enfoque y el ángulo de visión son los adecuados.

En ocasiones se hacen modificaciones de estos parámetros por necesidades de experimentos anteriores, y pueden quedar desconfigurados. Sobre todo, en las fases iniciales del experimento resulta interesante mantener una visión global de la pieza para identificar el progreso de la deposición. La figura 4.43 muestra una vista del sistema de vigilancia en condiciones de servicio.

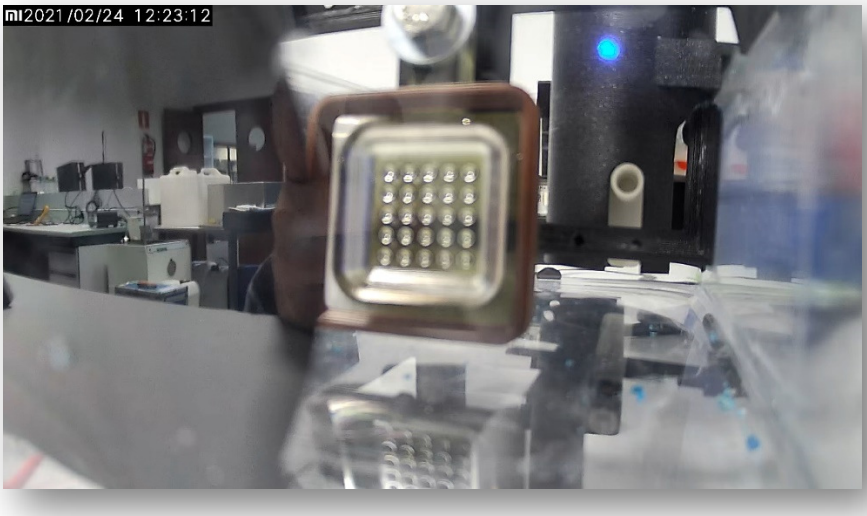


Fig. 4.43. Preparación y ajuste del sistema de vigilancia.

4.4.5. PREPARACIÓN DE CONEXIONES Y ULTIMAS COMPROBACIONES.

Una vez realizadas las preparaciones de toda la parte instrumental y electrónica del proceso, resta la conexión física de los diferentes componentes y su comprobación. Para la conexión eléctrica del conjunto se utilizan los cables según el código de colores: negro para las conexiones del circuito en el lado cátodo y rojo para las conexiones del circuito en el lado ánodo.

Antes de comenzar con el experimento es conveniente hacer una medida de continuidad, para garantizar que el circuito está cerrado, así como verificar el correcto nivel del baño electrolítico. La figura 4.44 muestra una imagen del conjunto en condiciones de servicio.

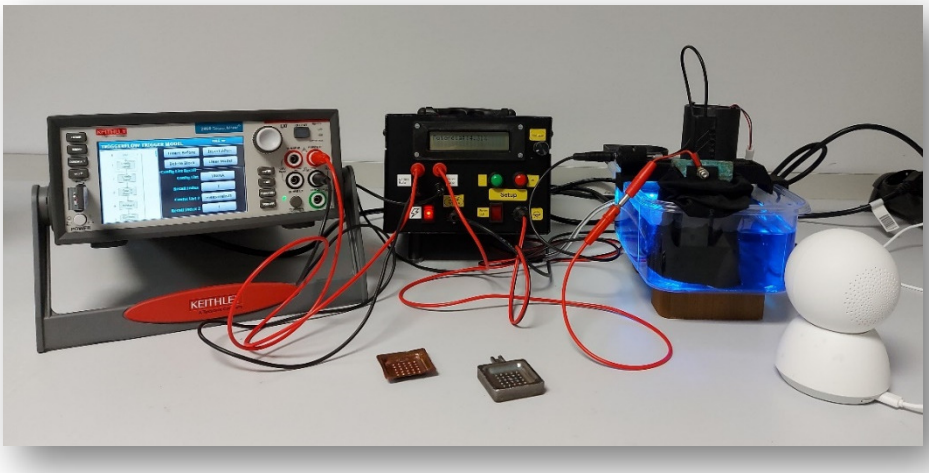


Fig. 4.44. Equipo de micro-elecroconformado en condiciones de servicio.

4.4.6. DESCARGA DE DATOS.

El proceso de micro-electroconformado termina con la descarga de datos, procedentes de las mediciones realizadas por el *KEITHLEY 2460 SourceMeter®*. Ya sea de forma manual o programada los valores obtenidos se almacenan en los buffers del equipo. El equipo genera un archivo con todos estos datos, que puede ser descargado.

Para utilizar este sistema de descarga, primero se deben crear los almacenamientos o buffers, que se vayan a necesitar. Para crear un buffer se debe establecer nombre, capacidad y tipología.

Se pueden crear cuantos buffers se necesiten hasta el límite de memoria del instrumento. La capacidad máxima de todos los buffers almacenados es de 6.875.000 para lecturas estándar y 27.500.000 para lecturas comprimidas. La diferencia entre una y otra radica en que la primera almacena las lecturas con el formato máximo de resolución, y la segunda con una resolución de 6.5 dígitos.

El instrumento dispone de dos buffers denominados *defbuffer1* y *defbuffer2.* Si no se selecciona ninguno el instrumento graba por defecto en *defbuffer1* con una capacidad para 100.000 lecturas en estilo estándar. Es importante resaltar que los buffers pierden todos los datos almacenados cuando se utiliza la instrucción *reset()* o cuando el equipo se apaga. Así mismo, se debe tener en cuenta que en un buffer que haya sido configurado como almacenamiento continuo, una vez superada su capacidad las siguientes lecturas se sobrescriben. La figura 4.45 muestra la pantalla de gestión de buffers.

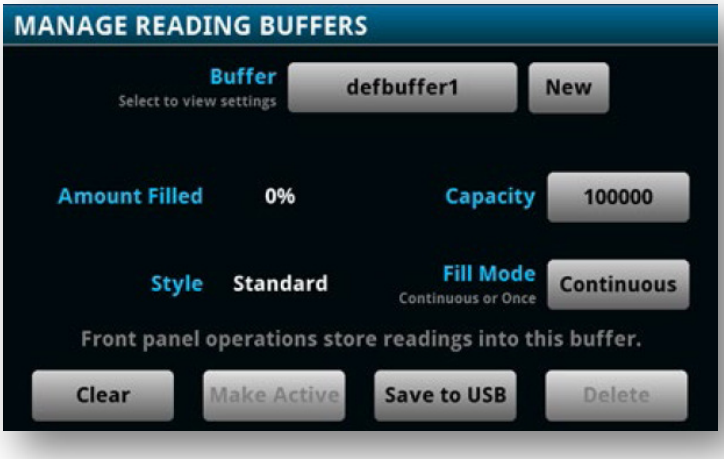


Fig. 4.45. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de gestión de buffers [9].

Para generar un nuevo buffer, se debe acudir a la pantalla de iconos pulsando el botón *MENU*, a continuación, en la pantalla táctil se selecciona el icono *Reading Buffer*. La figura 4.46 muestra la ubicación del botón *MENU* en la pantalla del instrumento.

Fig. 4.46. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: botón para acceso a los buffers.

Una vez realizada la selección *Reading Buffer*, aparecerá una pantalla emergente en la que se debe seleccionar el botón *New*, para crear un nuevo almacenamiento, cuyo nombre se puede editar.

Una vez creado el nuevo buffer, se debe seleccionar el botón *Make Active*, para que el equipo lo reconozca como buffer activo y quede operativo. Utilizando el botón *Capacity* se puede establecer la capacidad de datos a almacenar. La figura 4.47 muestra la pantalla de gestión de buffers.

Fig. 4.47. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: pantalla de gestión de buffers.

En modo automático, la creación de estos buffers se puede programar. Para ello se utiliza la función *Buffer.make*, que se inserta en el programa de instrucciones. La figura 4.48 muestra esta instrucción en las líneas de comando 9,10,11 y 12 del programa creado.

En aplicación a los experimentos desarrollados durante el transcurso de esta Tesis, el programa de instrucciones realizado ordena al equipo que genere los almacenamientos: buffer1, buffer2, buffer3 y buffer4, a los que posteriormente se les asignaran la guarda de las correspondientes mediciones. El código completo del programa de instrucciones se puede consultar en el anexo II.

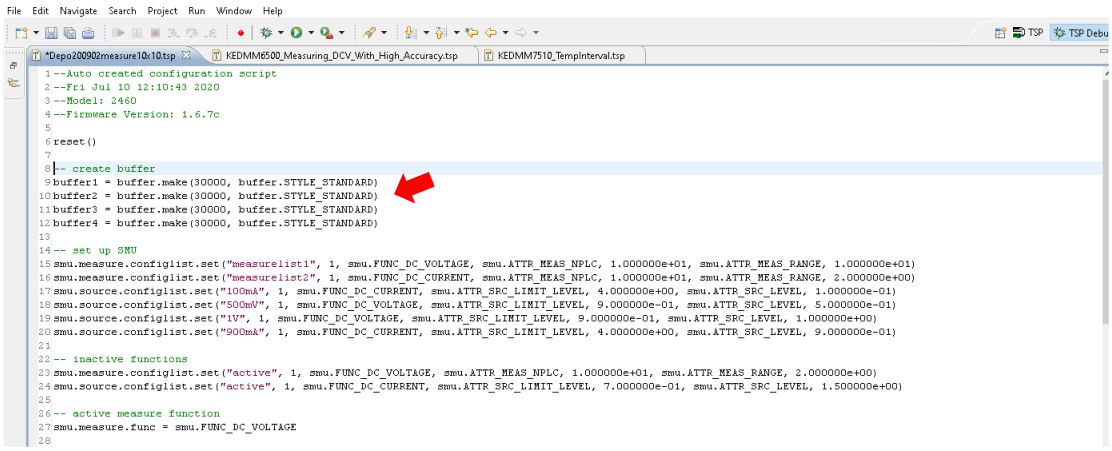


Fig. 4.48. Software *TestScriptBuilder*. Extracto del código de programación.

Todos los datos almacenados en los buffers durante el desarrollo de los experimentos se pueden descargar. Para ello, se puede acceder a la pantalla de control de buffers repitiendo la secuencia anteriormente explicada, se pulsa el botón *Buffer* y se selecciona de la lista desplegable el buffer que se quiere descargar. A continuación, se pulsa el botón *descargar a USB* y sólo resta esperar por la descarga. La figura 4.49 muestra la secuencia del procedimiento.

(a) (b)

Fig. 4.49. KEITHLEY 2460 SourceMeter®: (a) Pantalla de gestión de buffers.
(b) Pantalla de selección de buffers.

Será necesario repetir el proceso con todos y cada uno de los buffers que se hayan generado para la descarga de datos del experimento. Durante el proceso se pueden renombrar los archivos antes de la descarga, para una mejor identificación de la procedencia de los datos. En aplicación al desarrollo de los experimentos se utilizaron los siguientes:

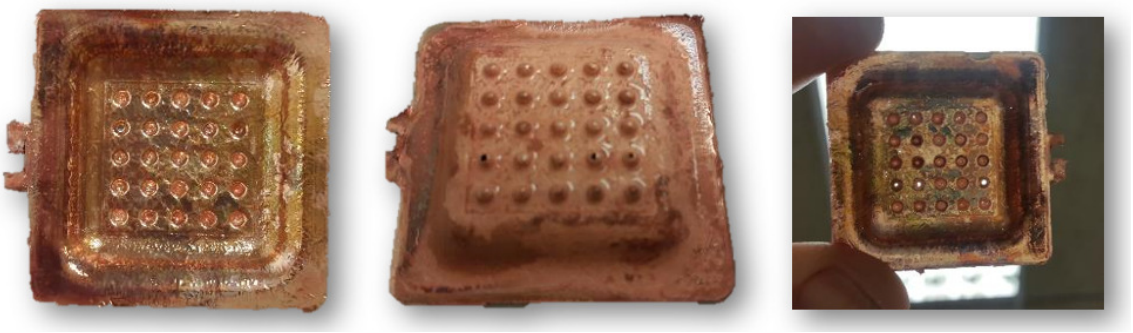
- Depo200715Buffer1*
- Depo200715Buffer2
- Depo200715Buffer3
- Depo200715Buffer4

*El código numérico se corresponde con la fecha de realización del experimento.

4.5. FASE 4. INSPECCIÓN Y MEDICIÓN

4.5.1. INSPECCIÓN

Durante esta fase se realiza un análisis exhaustivo de la pieza terminada para establecer si cumple con los requerimientos establecidos. Se realiza una primera inspección visual para verificar el acabado de la pieza. Se buscan defectos de forma o de falta de deposición que a simple vista las invaliden. La figura 4.50 presenta imágenes de piezas terminadas.



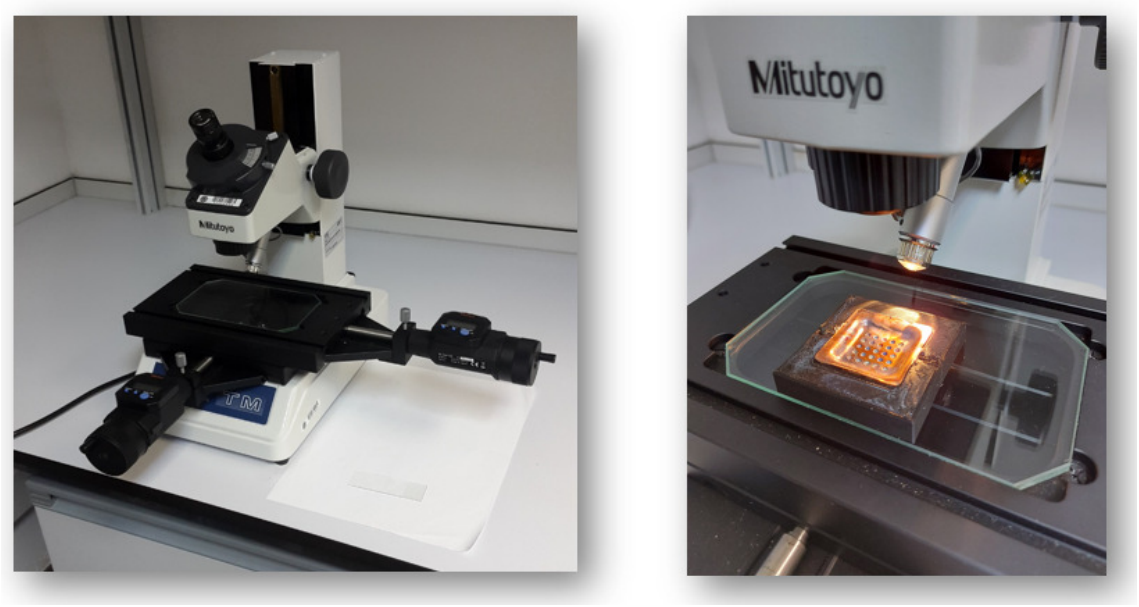
(a) (b) (c)

Fig. 4.50. Inspección visual: (a) Superficie delantera o no funcional. (b) Superficie trasera o funcional. (c) Defecto de falta de deposición.

Una vez superada esta primera inspección se realiza una segunda en mayor profundidad con la ayuda de un microscopio de medición (MitutoyoTM-1005B, Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japón), que cuenta con código de identificación D102224 y pertenece al laboratorio del Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Este equipo cuenta con una óptica monocular de tipo vertical con un ángulo de 60 ° con capacidad para elevarse hasta un máximo de 107mm. Dispone de una lente de aumento ocular x15 y un objetivo estándar de aumento x2. El enfoque es manual para un rango de medición de 100mm x 50mm (largo x ancho) [144]. La figura 4.51a muestra el equipo utilizado.

Para facilitar la correcta inspección de las piezas se utilizó un útil de alojamiento que permitía alinearlas con los ejes de movimiento del microscopio. Se aprovechó el diseño y fabricación de un componente que será expuesto en el apartado 3.4 del Capítulo 5. La figura 4.51b muestra el equipo en condiciones de servicio.



(a) (b)

Fig. 4.51. (a) Microscopio de medición (b) Proceso de inspección con útil de alojamiento.

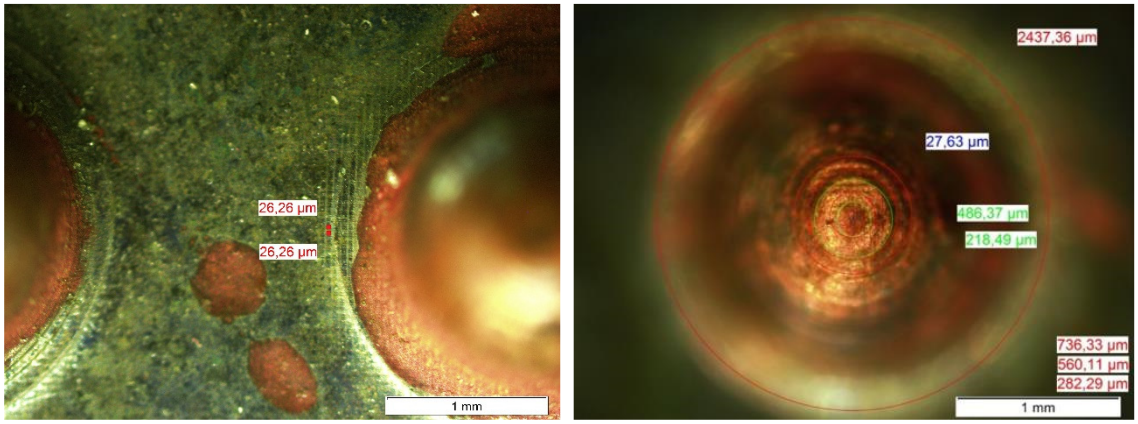
Fig. 4.52. Vista del fondo de cavidad semiesférica al microscopio (x30).

Finalmente se realiza una revisión de la calidad de los detalles a escala micrométrica. Para ello se utiliza un microscopio de medición (Olympus BX51, Olympus Corporation, Tokyo, Japón). La revisión se lleva a cabo con reflejo en campo oscuro utilizando aumentos oculares x2 y x5. La figura 4.53 muestra imágenes del proceso de inspección.

(a) (b)

Fig. 4.53. (a) Microscopio de medición Olympus BX51. (b) Proceso de inspección.

La figura 4.54 muestra imágenes del resultado de la inspección al microscopio. Se reprodujeron varios detalles de dimensiones a escala micrométrica, como los píxeles de la pantalla LCD o los aros que determinan las deposiciones de las diferentes capas de resina.



(a) (b)

Fig. 4.54. Medición de detalles. (a) Superficie. (b) Fondos.

4.5.2. MEDICIÓN.

Una vez realizada la inspección desde el punto de vista geométrico y de la calidad superficial, es necesaria la validación desde el punto de vista funcional. Para ello, se deben verificar las dimensiones de la pieza para confirmar que se han alcanzado los valores de espesor solicitados, así como la uniformidad de estos. Es importante, además, establecer si existen defectos de planitud que puedan invalidar la pieza.

Para realizar esta fase se recurrió al equipamiento y las instalaciones disponibles en el laboratorio del Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (SMC).

Las mediciones se realizaron en las mismas condiciones ambientales en las que el SMC realiza los ensayos para la calibración y verificación de equipos de medida, esto es temperatura de 21°C y humedad relativa inferior al 70%.

La toma de medidas se realizó con un comparador mecánico (Mitutoyo ID-C112B, Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japón), con número de identificación DC03100, montado sobre un banco de verificación de comparadores con número de identificación DC08007. Este equipo ha sido calibrado y cuenta con certificado de calibración (Nº862), emitido por el Servicio de metrología y Calibración (SMC) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. El banco de verificación de comparadores cuenta también con su correspondiente certificado (Nº616) con trazabilidad interna. La figura 4.55 muestra el conjunto en condiciones de servicio.

Las especificaciones técnicas más relevantes del comparador son las siguientes:

- Resolución: 1µm
- Error máximo permitido: 2µm

- Presentación del mesurando: digital (altura de carácter = 9mm)
- Método de medición: manual
- Presión de medida: ≤ 1,5N
- Diámetro del vástago: 8mm
- Origen: con puesta a cero ABS.

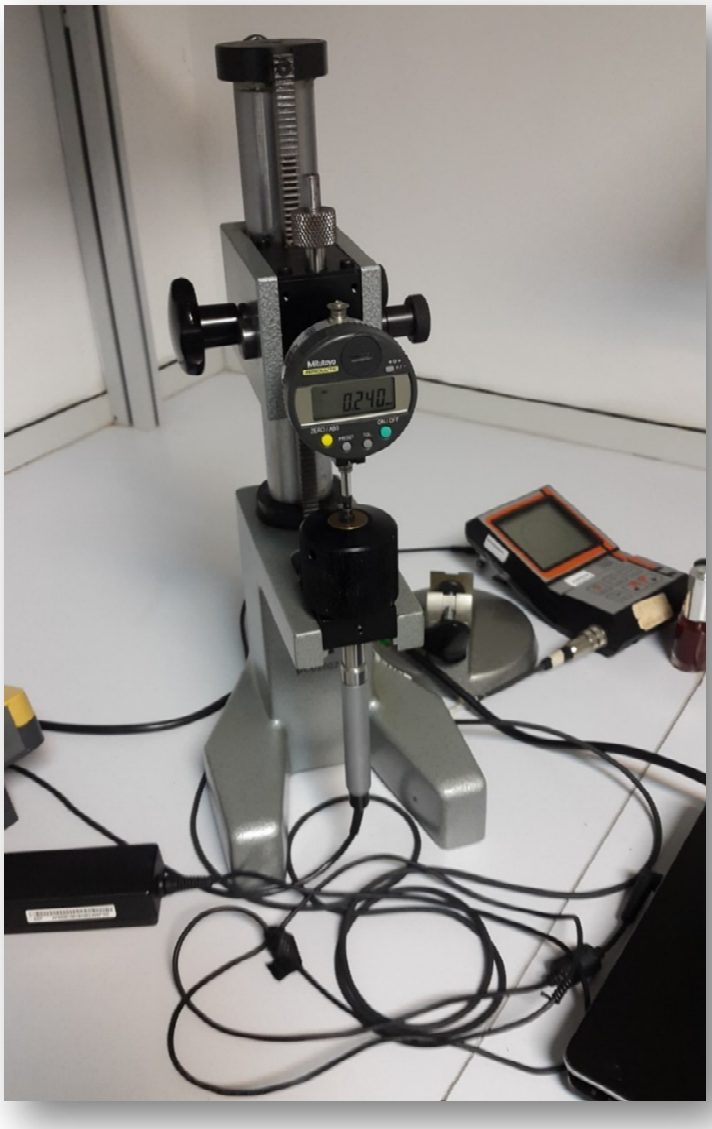
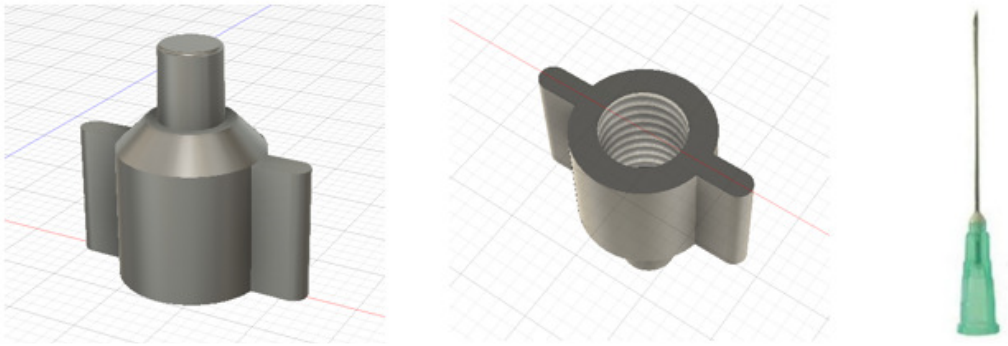


Fig. 4.55. Equipo de medición.

Durante el proceso de medición aparecieron algunos inconvenientes derivados de la necesidad de medir detalles a diferentes escalas. Las pequeñas dimensiones de las cavidades semiesféricas, con diámetros inferiores a 1mm, imposibilitaban el contacto de la superficie conformada con el vástago del comparador. No era posible, por tanto, realizar las mediciones de espesor en los fondos de dichas cavidades.

Para abordar el inconveniente se planteó el desarrollo de un útil de medición que se adaptara al soporte inferior del comparador. Se diseñó un conector con una geometría doblemente adaptada. En su parte inferior se incorporó una rosca interna que permitiera la unión mecánica con el soporte de medición. En su parte superior se añadió un acoplamiento cilíndrico para recibir el palpador de contacto con la pieza.

Al sobrepasar el límite tecnológico de los accesorios de medición disponibles en el SMC, se decidió implementar, a modo de elemento de contacto o palpador, una aguja hipodérmica de uso sanitario, de dimensiones Ø0,8mm x 40mm. La figura 4.56 muestra el elemento diseñado y el palpador implementado.



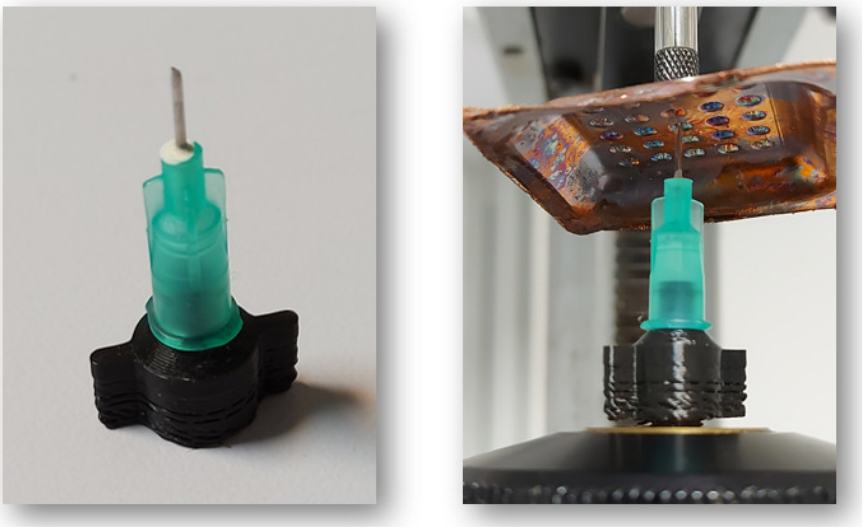
(a) (b) (c)

Fig. 4.56. (a) Modelado de conector vista superior. (b) Modelado de conector vista inferior. (c) Aguja hipodérmica.

Para la conformación del conector se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: ARTILLERY SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: No.
- Tiempo de impresión: 9 minutos
- Cantidad de material: 1g – 0,31m

La figura 4.57 muestra imágenes del resultado y de su funcionamiento.

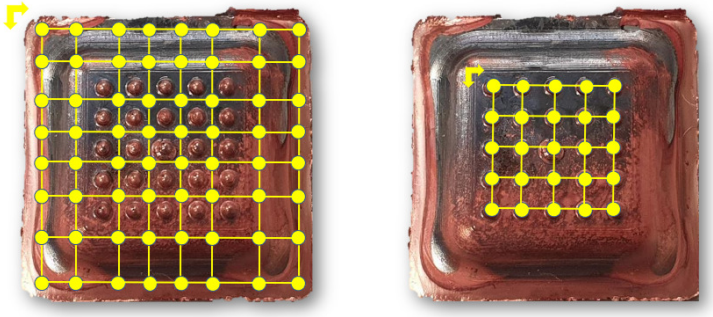


(a) (b)

Fig. 4.57. (a) Útil de medición. (b) Medición de fondos.

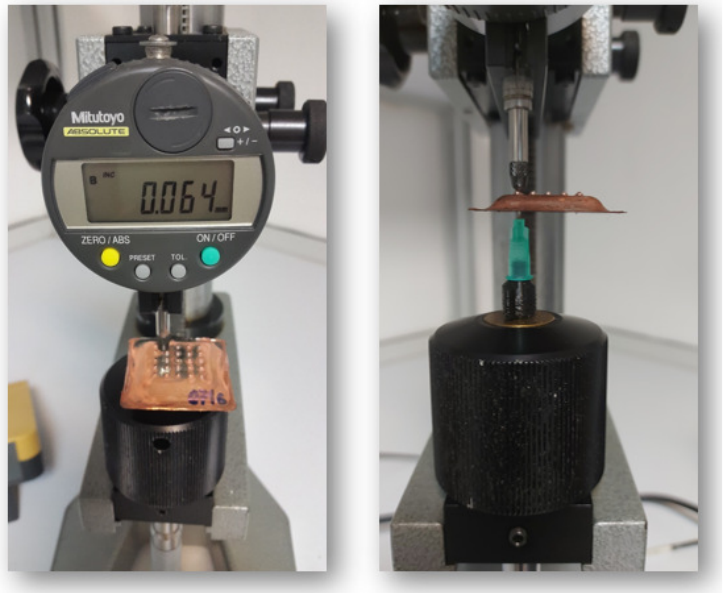
Para hacer un barrido completo de las diferentes zonas de la pieza, se estableció una matriz de puntos de medición compuesta por 8 filas y 8 columnas, que incluían localizaciones en bordes, zona de transición y zona funcional. Igualmente se trazó otro mapa de puntos para los fondos de las cavidades semiesféricas, compuesto por 5 filas y 5 columnas.

La medición se realiza con la pieza en posición invertida para que el palpador del comparador pueda hacer contacto con la cara funcional. Las figuras 4.58 y 4.59 muestran imágenes del mapeado de la superficie y del proceso de medición respectivamente.



(a) (b)

Fig. 4.58. Mapa de puntos de medición. (a) Superficie (b) Fondos cavidades semiesféricas.



(a) (b)

Fig. 4.59. Proceso de medición de espesores. (a) Superficie funcional. (b) Fondos de cavidades

Para aportar rigor al procedimiento de medición y asegurar la trazabilidad de los valores obtenidos, el resultado se corrigió añadiendo la información metrológica del proceso. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$X = (\bar{X} + C_m) \pm I_u$$

Donde:

- X: resultado de la medida trazable.
- $\bar{X}$: media del resultado de las 10 medidas realizadas.
- $C_{m:}$ corrección de calibración del comparador. Según certificado de calibración Nº862 Emitido por SMC para el equipo utilizado y en el rango de dimensiones de las medidas a realizar → C_m = 0mm.
- $S_{x:}$ desviación típica media de las lecturas realizadas → $s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$
- I_u: incertidumbre de la medida. Cuyas contribuciones son la incertidumbre de calibración del comparador y la desviación típica de la muestra que, según la ley de propagación de varianzas, para un K=2 asegura un coeficiente de confianza de 95,35% en una distribución normal. La expresión matemática (correlación de varianza) que la define es la siguiente:

$$I_u = 2 \times \sqrt{\frac{I_m}{k} + \frac{s_x}{\sqrt{3}}}$$

Donde:

I_m= ±0,0048 mm según certificado de calibración Nº862 Emitido por SMC para el equipo utilizado.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran, a modo de ejemplo, los valores de X para cada uno de los puntos de medición en la pieza 202727.

Tabla 4-1. Pieza 200727. Espesores en puntos de la superficie.

Posición	5	10	15	20	25	30	35	40	Promedio
5	264	276	209	207	232	249	210	316	245,38
10	313	115	122	138	150	140	126	297	175,13
15	289	140	148	138	142	143	118	284	175,25
20	323	152	144	136	140	145	134	305	184,88
25	306	146	133	134	132	144	136	301	179,00
30	336	126	129	141	143	141	149	321	185,75
35	353	128	133	145	126	138	132	328	185,38
40	385	266	377	394	308	396	373	371	358,75
Promedio	321,13	168,63	174,38	179,13	171,63	187,00	172,25	315,38	211,19

Tabla 4-2. Pieza 200727. Espesores en el fondo de las cavidades semiesféricas.

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Promedio
Fila1	205	112	63	83	89	110,4
Fila2	0	0	0	75	82	31,4
Fila3	178	0	16	90	62	69,2
Fila4	149	118	106	81	70	104,8
Fila5	0	0	65	56	73	38,8
Promedio	106,4	46,0	50,0	77,0	75,2	70,9

Las figuras 4.60, 4.61 y 4.62 muestran una representación gráfica de los datos obtenidos para la pieza ejemplo 200727.

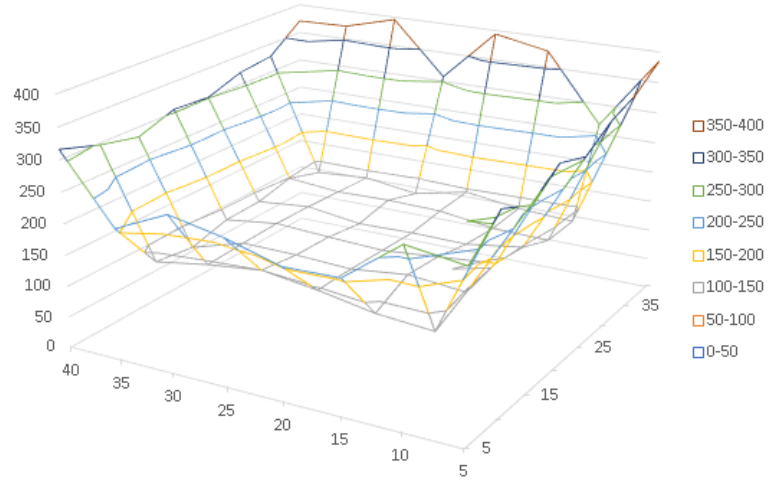


Fig. 4.60. Pieza 200727: representación 3D de distribución de espesores en la superficie.

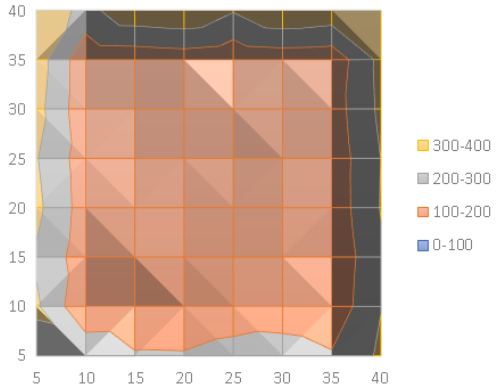


Fig. 4.61. Pieza 200727: representación 2D de distribución de espesores en la superficie.

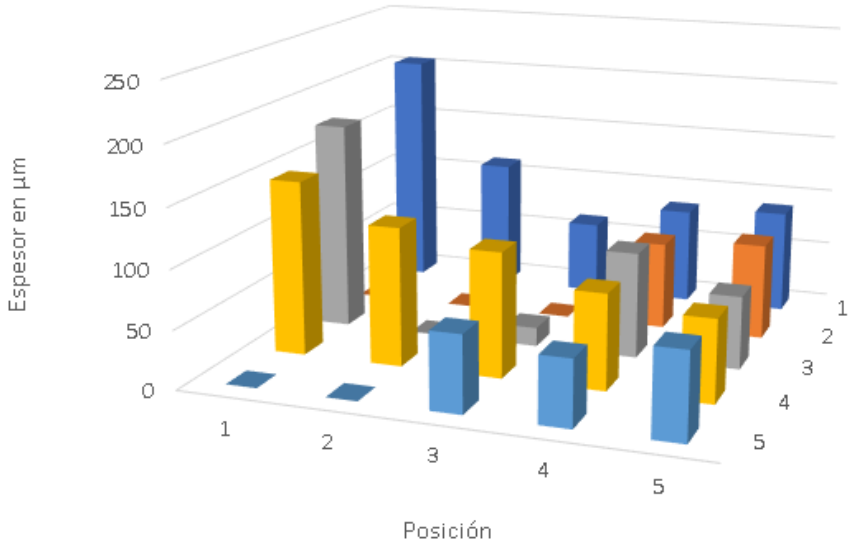


Fig. 4.62. Pieza 200727: representación de espesores en el fondo de las cavidades.

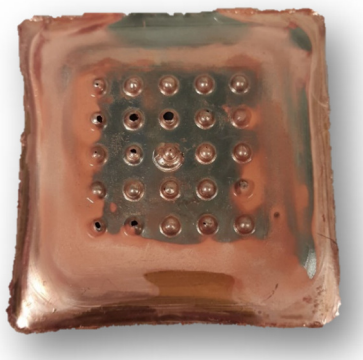


Fig. 4.63. Pieza 200727 finalizada.

4.6. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el diseño de un procedimiento de ensayo que engloba tres procesos de fabricación a priori poco relacionados, como son: la fabricación aditiva sobre resina fotosensible, el sputtering y el electroconformado.

Se han hecho adaptaciones para asegurar la viabilidad de esta combinación y se ha validado la compatibilidad de su uso combinado, obteniendo excelentes resultados.

La capacidad de réplica del proceso de electroconformado ha mostrado potencial para la reproducción de piezas con detalles a escala micrométrica. Mediante el proceso de inspección, se ha verificado la existencia de dichos detalles en las piezas obtenidas. Podemos concluir, por tanto, que nos encontramos ante un proceso de micro-electroconformado.

Se ha desarrollado un proceso de medición que permite establecer el nivel de uniformidad del espesor de capa depositado, incluso consiguiendo lecturas en los interiores de las cavidades bajo relieve.

Una vez establecido el protocolo de funcionamiento y validadas las capacidades y resultados del uso de este procedimiento combinado, podemos establecer que estamos ante un proceso de notable solvencia y con gran potencial de desarrollo en cuanto a su aplicación a diferentes geometrías y usos a nivel industrial.

Es por ello por lo que, siguiendo la senda de otros autores, se ha decidido añadir una denominación que identifique a este proceso combinado, al que se ha “bautizado” con el término “AMSME”, de sus siglas en inglés Aditive Manufacturing, Sputtering & Micro Electroforming.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN Y RESPUESTA EXPERIMTENTAL DEL EQUIPO DESARROLLADO

Capítulo 5. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL EQUIPO DESARROLLADO.

5.1. INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se va a realizar una exposición de la aplicación práctica del equipo de micro-electroconformado desarrollado. Se pretende contrastar su versatilidad en respuesta a las necesidades del investigador, para el control del proceso de electro conformado, verificando si sus diferentes opciones ayudan a conseguir buenos resultados en la fabricación de las diferentes tipologías de cáscaras.

Si bien la temática de esta tesis se centra en la aplicación a piezas funcionales, basadas en geometrías complejas en cuanto al nivel de detalle, se han incorporado ensayos con geometrías más simples, de tal manera que aportaran información sobre la respuesta del equipo.

Como ya se adelantó en el capítulo 4, la serie de ensayos más numerosa se enfocó en conseguir piezas funcionales de forma cuadrada 38mm x 38mm, con un patrón geométrico de 25 huecos semiesféricos de diámetro 1mm. El objetivo era conseguir buenos resultados de deposición, para generar un electrodo solvente, que pudiera utilizarse en el texturizado de superficies mediante proceso EDM. Debía completarse, sin defectos y con todos los detalles a escala micrométrica correctamente definidos, una serie de piezas que contaran con el patrón geométrico en la superficie funcional y con un espesor de cáscara superior a 250µm.

Arthur y Dickens en su estudio sobre el desgaste y fallo de electrodos en proceso EDM, llevaron a cabo un mecanizado completo, utilizando electrodos con un espesor de capa de cobre de 100 a 300µm. En aplicación a esta investigación, se estableció que un valor intermedio, podría ser una buena referencia de comienzo [145].

5.2. CONDICIONES DE ENSAYO.

Durante la realización de los diferentes ensayos para determinar la respuesta del equipo, se mantuvieron constantes varias de las condiciones operativas. Algunas forman parte de parámetros de configuración, cuya variación ofrece posibilidades de aplicación a otros estudios experimentales. No obstante, en el desarrollo de esta investigación fueron aisladas para focalizar el objetivo. Sin embargo, los parámetros eléctricos, las condiciones de agitación del baño y el tiempo de deposición, se establecieron como parámetros relevantes para el estudio y su personalizaron, estará presente en la exposición de los diferentes experimentos.

A continuación, se indican las condiciones de ensayo comunes para el conjunto de experimentos:

- Todos los ensayos se realizaron en las instalaciones del laboratorio del Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, garantizando la estabilidad de las condiciones ambientales, temperatura 21°C y humedad relativa inferior al 70%.
- Para el baño electrolítico se utilizó una solución ácida de sulfato de cobre de formato comercial, (Bright copper plating bath CU 501, Heimerle-Meule Group, Pforzheim, Alemania). Según el fabricante la aplicación principal de este de solución es conseguir capas de cobre con acabado suave y de alto brillo [146]. Como recomendación para el máximo rendimiento de la solución, el fabricante propone valores de tensión de alimentación de 0,5V a 4V y valores de densidad de corriente de 1 A/dm^2 a 5 A/dm^2.
- En adaptación a las dimensiones del modelo funcional y para garantizar su total inmersión, se utilizó un volumen de 1,1 litros de solución.

- El pH de la solución se puede considerar en un valor medio de 1,23. Si bien se realizaron mediciones al inicio de cada uno de los ensayos, las lecturas no advirtieron variaciones relevantes, manteniéndose en un intervalo de 1,09 a 1,36.
- Como ánodo se utilizó una pieza monolítica de CU-P, de geometría rectangular de dimensiones 100mm x 50mm x 10mm (largo x ancho x espesor) compuesto por cobre y fósforo. Para evitar la transmisión de los depósitos de fósforo al baño, el ánodo se colocó en el interior de un saco para ánodos solubles, antes de su fijación en el soporte del tanque.
- Desde el punto de vista geométrico se adoptó una disposición entre ánodo y cátodo con orientación de 0°, tanto en eje horizontal como en eje vertical y una distancia de separación de 100mm.
- El modelo funcional se colocó en el tanque de micro-electroconformado en posición semisumergida, de tal manera que, sólo el voladizo correspondiente al brazo conector quedara fuera del baño.

5.3. TIPOLOGÍAS DE ENSAYO.

Para verificar las capacidades del equipo se plantearon cuatro modelos de ensayo dirigidos a establecer la:

1. Influencia en la capacidad de reproducción de detalles.
2. Influencia del sistema de agitación.
3. Influencia en los espesores depositados.
4. Influencia del flujo turbulento.

Teniendo en cuenta el objetivo de esta tesis, la realización los estos ensayos, se plantean desde el punto de vista de la validación del equipo, no de la calidad de las piezas obtenidas.

Se pretende establecer si es una herramienta de trabajo con potencial, para el posterior desarrollo de estudios más exhaustivos, en estas líneas de influencia inicialmente planteadas u otras que puedan plantearse a futuro.

De forma transversal, en cada experimento se analiza la funcionalidad del equipo en su interacción con el investigador. Son analizadas sus capacidades en cuanto a su facilidad de manipulación, preparación del experimento, facilidad de conexión, facilidad de ubicación y extracción de las piezas, ergonomía del espacio de trabajo, adaptabilidad a las geometrías pretendidas y practicidad en la extracción de resultados, tanto numéricos como visuales.

5.3.1. ENSAYO TIPO 1.

5.3.1.1. Descripción.

Para el desarrollo de este tipo de ensayo se decidió realizar una serie de experimentos en condiciones de repetitividad, donde se aprovechaban las aportaciones del *KEITHLEY 2460 SourceMeter®,* principalmente su capacidad para generar potencia en diferentes modos, ya fueran manuales o automáticos programables.

Los parámetros eléctricos se fueron ajustando a medida que se analizaban los resultados de experimentos anteriores. Se empezó trabajando con valores fijos en función de las recomendaciones de uso para el baño electrolítico consultadas [91]. La mayoría de las referencias establecen intervalos de tensión de 0,5V a 4V y de densidad de corriente de 1A/dm^2 a 5A/dm^2. Teniendo en cuenta que todos los modelos funcionales, utilizados en los experimentos, presentan un área de 0,16dm^2, la intensidad de corriente a aplicar se corresponde con intervalos de 160mA a 800mA.

En base a esto y dado que los primeros resultados no terminaban de ser aceptables, se empezó a utilizar la programación del equipo y a trabajar con salidas de potencia variables. Se alternaban ciclos en los que se fijaban los valores de intensidad de corriente o valores de tensión, en función de las lecturas obtenidas en ensayos precedentes.

La tabla 5-1 muestra un tipo de ciclo de trabajo utilizado en una de las series de experimentos. En este caso se realizaron 4 etapas. Se fijó la intensidad en dos de ellas y la tensión en las otras dos, según la secuencia mostrada.

Tabla 5-1. Ejemplo de ciclo de trabajo.

Etapa	I (intensidad)	V(tensión)
1	100 mA	variable
2	variable	0,5 V
3	variable	1 V
4	900 mA	variable

El parámetro no prefijado en cada una de las etapas adopta valores variables que cambian con la propia evolución del experimento. Esta variabilidad se convierte en una traza única que identifica a cada pieza. Las lecturas de estos valores son almacenadas por el equipo y pueden ser posteriormente analizadas para establecer puntos de coincidencia. La figura 5.1 muestra la pantalla de datos del instrumento.

Inicialmente los valores de tensión e intensidad se mantuvieron dentro del intervalo recomendado, posteriormente y sobre todo en la etapa inicial se programaron con cuantías diferentes. Resultados en sucesivos experimentos determinaron que intensidades iniciales de 160mA o tensiones de 0,5V no rellenaban las cavidades semiesféricas. El proceso de electro conformado concentraba los crecimientos en zonas menos complejas, abandonando las zonas con detalles, lo que ocurría en los primeros minutos de la deposición.

Se decidió por tanto reducir los valores de estos parámetros en la primera etapa.

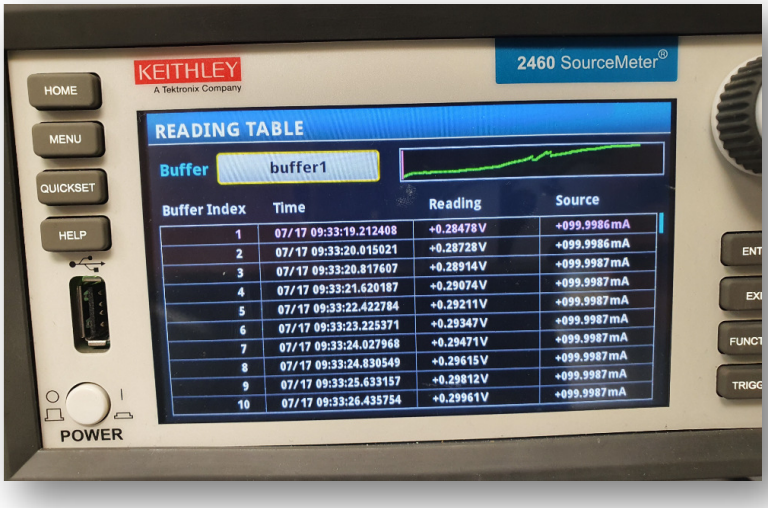


Fig. 5.1. *KEITHLEY 2460 SourceMeter®*: lectura de datos en la etapa 1

Se realizaron un total de 30 experimentos en los que se fueron modificando los parámetros eléctricos y los ciclos de trabajo, hasta la consecución de piezas con la calidad requerida. A continuación, a modo de muestra se expondrán un extracto con 6 de los experimentos más relevantes en cuanto a la diferencia de los resultados obtenidos, de tal manera que se pueda apreciar la evolución. Las tablas 5-2, 5-3 y 5-4 muestran las condiciones operativas de estos experimentos.

Tabla 5-2. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (a)

	Ensayo 1.1	**Ensayo 1.6**
Cod. Identificación:	191105	191113
Modelo funcional:	Evo 1	Evo 1
Masa modelo metalizado:	12,8499 g	11,8321 g
Sistema de Agitación:	Activado	Activado
Flujo:	Laminar	Laminar
Configuración DCAB:	Manual	Manual
Caudal recirculación:	1,89 l/min	1,89 l/min
pH:	1,17	1,36

Volumen de solución:	1,1 L	1,1 L
Temperatura:	21°C	21°C
Distancia ánodo-cátodo:	100mm	100mm
Configuración KEITHLEY2460:	Manual	Manual
Tiempo de deposición:	3 h	4 h
Usos del modelo funcional:	0	6

Ciclo de trabajo

	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$	I	V	t
Etapa 1:	100mA	0,5V	180min	100mA	0,6 V	60min
Etapa 2:	-	-	-	500mA	1,2 V	60min
Etapa 3:	-	-	-	1000mA	2 V	120min
Etapa 4:	-	-	-	-	-	-

Tabla 5-3. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (b)

	Ensayo 1.9	**Ensayo 1.12**
Cod. Identificación:	191204	191212
Modelo funcional:	Evo 1	Evo 1
Masa modelo metalizado:	11,2922 g	11,1852 g
Sistema de Agitación:	Activado	Activado
Flujo:	Laminar	Laminar
Configuración DCAB:	Manual	Manual
Caudal recirculación:	1,89 l/min	1,89 l/min
pH:	1,12	1,09
Volumen de solución:	1,1 L	1,1 L
Temperatura:	21°C	21°C
Distancia ánodo-cátodo:	100mm	100mm
Configuración KEITHLEY2460:	Manual	Manual
Tiempo de deposición:	25 h 15´	25 h 15´
Usos del modelo funcional:	9	4

Ciclo de trabajo

	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$	I	V	t
Etapa 1:	10mA	variable	1200min	100mA	variable	15min
Etapa 2:	25/50/100mA	variable	60min	variable	0,5 V	1260min
Etapa 3:	500mA	variable	60min	variable	1 V	120min
Etapa 4:	1000mA	variable	60min	variable	1,5V	120min

Tabla 5-4. Condiciones operativas para el ensayo tipo 1 (c)

	Ensayo 1.18			**Ensayo 1.28**		
Cod. Identificación:	200706			200922		
Modelo funcional:	Evo 2			Evo 2		
Masa modelo metalizado:	9,8079 g			9,7450 g		
Sistema de Agitación:	Activado			Activado		
Flujo:	Laminar			Laminar		
Configuración DCAB:	Manual			Manual		
Caudal recirculación:	1,89 l/min			1,89 l/min		
pH:	1,27			1,23		
Volumen de solución:	1,1 L			1,1 L		
Temperatura:	21°C			21°C		
Distancia ánodo-cátodo:	100mm			100mm		
Configuración KEITHLEY2460:	Automática			Automática		
Tiempo de deposición:	5 h 5´			6 h 5´		
Usos del modelo funcional:	1			3		
Ciclo de trabajo						
	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$	I	V	t
Etapa 1:	100mA	variable	5min	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5 V	60min	variable	0,5 V	180min
Etapa 3:	variable	1 V	120min	variable	1 V	120min
Etapa 4:	900mA	variable	120min	900mA	variable	60min

5.3.1.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 1.

Para poder establecer una comparación entre los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se tendrán en cuenta tres aspectos:

1. Masa de las piezas electro conformadas.
2. Calidad geométrica y superficial de la pieza.
3. Espesor de cáscara en bordes, zona funcional y fondos de cavidades semiesféricas.

La tabla 5.4 muestra los resultados para los diferentes experimentos

Tabla 5-5. Resultados obtenidos ensayos tipo 1

	Ensayo 1.1	Ensayo 1.6	Ensayo 1.9	Ensayo 1.12	Ensayo 1.18	Ensayo 1.28
Id.	191105	191113	191204	191212	200706	200922
Masa pieza electroconformada						
Masa pieza:	15,6805g	14,4098g	13,5204g	13,9747g	13,609g	11,285g
Masa cáscara:	0,2724g	2,4305g	2,0761g	2,261g	3,0811g	1,0336g
Calidad geométrica						
Dimensiones:	Correctas	Correctas	Correctas	Correctas	Correctas	Correctas
Geometría:	Completada	Completada	Incompleta	Completada	Incompleta	Completada
Distorsión:	Excesiva	Admisible	Buena	Buena	Buena	Buena
Acabado superficial:	Correcto	Correcto	Deficiente	Correcto	Bueno	Excelente
Observaciones:	Cáscara fina	7 poros	Agujeros	2 poros	Agujeros	Sin poros
Espesor						
Bordes (valor medio):	29µm	282µm	238µm	267µm	382µm	115µm
Zona funcional (valor medio):	17µm	124µm	139µm	156µm	169µm	54µm
Zona funcional (valor máx.):	44µm	433µm	377µm	365µm	456µm	164µm
Zona funcional (valor min.):	11µm	105µm	93µm	136µm	0µm	34µm
Fondos (valor medio):	15µm	73µm	180µm	154µm	245µm	67µm
Fondos (valor máx.):	24µm	85µm	79µm	191µm	385µm	113µm
Fondos (valor min.):	12µm	62µm	0µm	105µm	0µm	30µm

A la vista de los resultados, es importante establecer que las etapas con poca intensidad se muestran indispensables para la formación de detalles. A menor intensidad se produce un crecimiento más lento y progresivo. La menor capacidad de deposición no fuerza el crecimiento hacia las zonas más favorables y permite cubrir los detalles. Analizando los datos con experimentos a tensión constante, se observa que el baño se alimenta de intensidades de corriente bajas en los primeros minutos de la electrodeposición. El análisis de esos valores se tomó como referencia y utilizando intensidades de 100mA se consiguieron buenos resultados.

El ensayo 1.1 es un buen ejemplo. Con una deposición a 100mA durante 180 minutos consiguió completar toda la geometría con poco espesor, pero de manera muy uniforme. Apenas hay diferencia de las lecturas de espesor entre agujeros y superficie.

Los resultados de los experimentos establecen la importancia de realizar las deposiciones con diferentes etapas si se quieren conseguir detalles a pequeña escala. Tanto es así, que invitan a diferenciar etapas que podríamos denominar de formación de detalles y etapas de crecimiento o generación de espesor. El orden y la duración de estas parece establecerse de forma clara, siendo los primeros minutos del proceso claves en la deposición. Detalles no completados al inicio del proceso, difícilmente son resueltos con posterioridad.

De igual manera los valores de intensidad parecen quedar referenciados. Valores en torno a los 100mA generan buenos comportamientos en la formación de detalles y valores alrededor de 1000mA generan crecimiento.

El ensayo 1.9 muestra que la aplicación de las intensidades necesita unos valores mínimos y que es independiente del tiempo de exposición. En este caso, intensidades de 10mA aplicadas durante 20 horas no garantizaron la finalización de la geometría. Muy al contrario, en el momento que se activan las etapas con las intensidades más altas, el proceso tiende de forma espontánea a focalizar su acción en las zonas con menos resistencia (zonas con deposición) y abandona las geometrías incompletas.

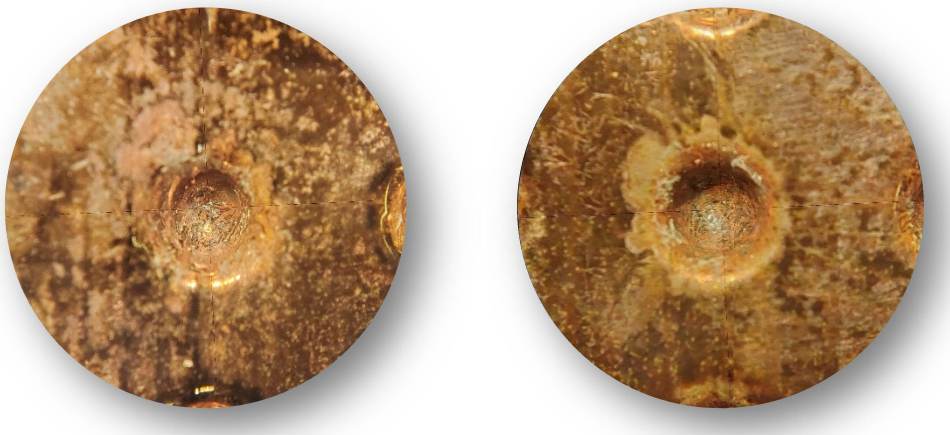
Si bien es cierto, que en algunos casos detalles a escala micrométrica se terminan completando, esto sucede por avance del frente de crecimiento no por reproducción de la geometría. La calidad y espesor en esas zonas queda afectada y no resulta aceptable.

Un ejemplo de este fenómeno se puede observar en las lecturas de espesor de los fondos de las cavidades semiesféricas, resultantes del ensayo 1.18. Los espesores de huecos finalmente completados presentan valores muy inferiores al resto.

Tabla 5-6. Ensayo 1.18. Espesores en los fondos de las cavidades.

Posición	1	2	3	4	5
1	167µm	159µm	126µm	155µm	185µm
2	159µm	195µm	0µm	11µm	196µm
3	135µm	154µm	0µm	70µm	0µm
4	187µm	0µm	0µm	173µm	185µm
5	170µm	161µm	167µm	224µm	0µm

La figura 5.2 muestra una revisión más exhaustiva al microscopio donde se aprecia la diferencia de acabados.



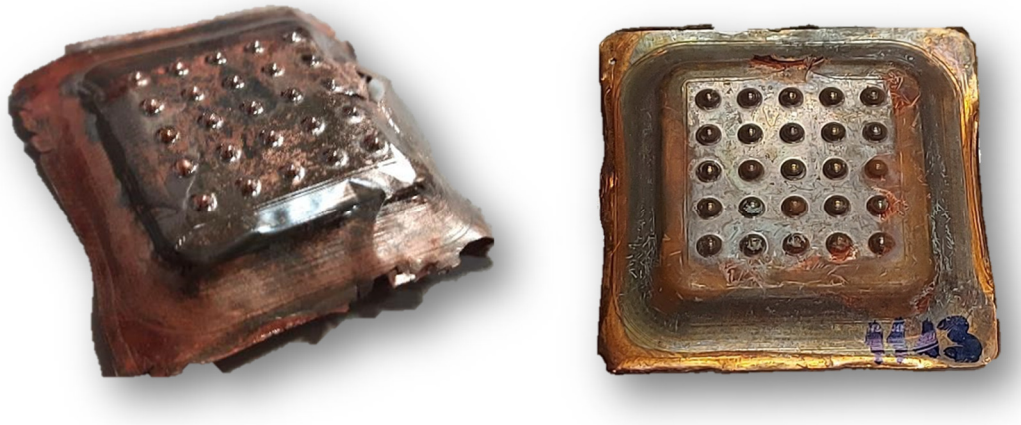
(a) (b)

Fig. 5.2. Ensayo 1.18 al microscopio. (a) Cavidad 1.1. (b) Cavidad 2.4

Los resultados muestran que la influencia del tiempo de deposición está muy determinada por los parámetros eléctricos aplicados y las etapas en las que se aplique. Así, por ejemplo, el

ensayo 1.6 (4h de deposición) y el ensayo 1.9 (25h de deposición) muestran cantidades de masa depositada muy similares con unas diferencias muy importantes en horas de trabajo. En la misma línea, el ensayo 1.18 (5h 5´ de deposición) y el ensayo 1.28 (6h 5´ de deposición) muestran una mayor masa depositada en el primero de los casos. La mayor duración de la etapa final, con intensidades altas, genera gran influencia en el espesor obtenido. Esto nos permite ahondar más en el concepto de *etapa de generación de detalles Vs etapa de crecimiento.*

Por último, hay que indicar que los experimentos con mejores resultados fueron aquellos donde se realizaron ciclos de trabajo con alternancia de etapas. En unas etapas se fijaba la intensidad de corriente y en otras la tensión. La etapa inicial *(etapa de generación de detalles)* reaccionó mejor cuando se fijaba el valor de la intensidad, mientras las etapas intermedias *(etapas de crecimiento)* parecieron mejorar con valores fijos de tensión, donde el desarrollo del proceso de deposición adaptaba a su necesidad los valores de intensidad. Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 muestra imágenes de las piezas finalizadas.



(a) (b)

Fig. 5.3. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.1. (b) Ensayo 1.6

(a) (b)

Fig. 5.4. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.9. (b) Ensayo 1.12

(a) (b)

Fig. 5.5. Cáscaras micro electroconformadas. (a) Ensayo 1.18. (b) Ensayo 1.28

Teniendo en cuenta que el objeto de esta tesis es la aplicación práctica del equipo desarrollado y la validación de sus capacidades, una vez obtenidas cáscaras micro-electroconformadas que resultaron satisfactorias, no se siguió profundizando en el ajuste de los ciclos de trabajo. No obstante, se abre una interesante línea de investigación en cuanto a la mejora y optimización de estos.

5.3.1.3. Conclusiones del ensayo tipo 1.

La información que aporta el *KEITHLEY 2460 SourceMeter®* es de gran utilidad en la evolución de los experimentos. La retroalimentación de las lecturas permite analizar el comportamiento del proceso desde el punto de vista eléctrico. Al fijar, por ejemplo, el valor de tensión, se puede hacer un seguimiento en intervalos de 1µs de la intensidad de corriente que el experimento utiliza para su evolución. Esta información una vez analizada, aporta una hoja de ruta a seguir en experimentos sucesivos para conseguir buenos resultados.

La posibilidad de programar ciclos de trabajo fijando y/o variando los parámetros eléctricos que gobiernan el proceso son una herramienta indispensable para conseguir la reproducción de detalles a escala micro. El control de la duración de cada una de las etapas permite, optimizar las horas de trabajo necesarias para completar las piezas de forma satisfactoria. Además, la oportunidad que ofrece de analizar las lecturas permite comprender y aprender del comportamiento de cada experimento.

Se puede afirmar por tanto que la inclusión de este instrumento en el equipo de micro-electroconformado genera un avance importantísimo en el control de este proceso de fabricación.

5.3.2. ENSAYO TIPO 2.

5.3.2.1. Descripción.

Para el desarrollo de este modelo de ensayo se decidió realizar dos experimentos en condiciones de repetitividad, con la única diferencia de la puesta en marcha o no del sistema de agitación.

Para el control de los parámetros eléctricos se utilizó un ciclo de trabajo programado con el *KEITHLEY 2460 SourceMeter®,* en base a los ya utilizados en los experimentos del modelo de ensayo 1. La tabla 5-7 muestra las condiciones operativas del proceso.

Tabla 5-7. Condiciones operativas para los ensayos tipo 2

	Ensayo 2.1	**Ensayo 2.2**
Cod. Identificación:	200714	200715
Modelo funcional:	Evo 0	Evo 0
Masa modelo metalizado:	9,6747g	9,6665g
Sistema de Agitación:	Activado	Desactivado
Flujo:	Laminar	-
Configuración DCAB:	Manual	Desactivado
Caudal recirculación:	1,89 l/min	0 l/min
pH:	1,14	1,19
Volumen de solución:	1,1L	1,1L
Temperatura:	21°C	21°C
Distancia ánodo-cátodo:	100mm	100mm
Configuración KEITHLEY2460:	Automática	Automática
Tiempo de deposición:	5 h	5 h
Usos del baño:	1	2
Usos del modelo funcional:	0	1

Ciclo de trabajo

	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$	I	V	t
Etapa 1:	100mA	variable	5min	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5V	60 min	variable	0,5 V	60min
Etapa 3:	variable	1V	120min	variable	1 V	120min
Etapa 4:	900mA	variable	120 min	900mA	variable	120min

5.3.2.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2.

Para poder establecer una referencia entre los resultados obtenidos, se comparan tres aspectos:

1. Masa de las piezas electro conformadas.

2. Calidad geométrica y superficial de la pieza.

3. Patrón de distribución del espesor de cáscara.

La tabla 5.8 muestra los resultados de los dos experimentos.

Tabla 5-8. Resultados obtenidos en los ensayos tipo 2.

	Ensayo 2.1	**Ensayo 2.2**
Masa pieza electroconformada		
Masa pieza:	12,6183g	13,6764g
Masa Cáscara:	2,5920g	3,2992g
Calidad geométrica		
Dimensiones:	Correctas	Correctas
Geometría:	Completada	Completada
Distorsión:	Admisible	Admisible
Acabado superficial:	Bueno	deficiente
Observaciones:	Separación espontánea	Excesiva rugosidad
Espesor		
Bordes (valor medio):	284µm	429µm
Zona funcional (valor medio):	160µm	265µm
Máximo:	351µm	577µm
Mínimo:	121µm	174µm

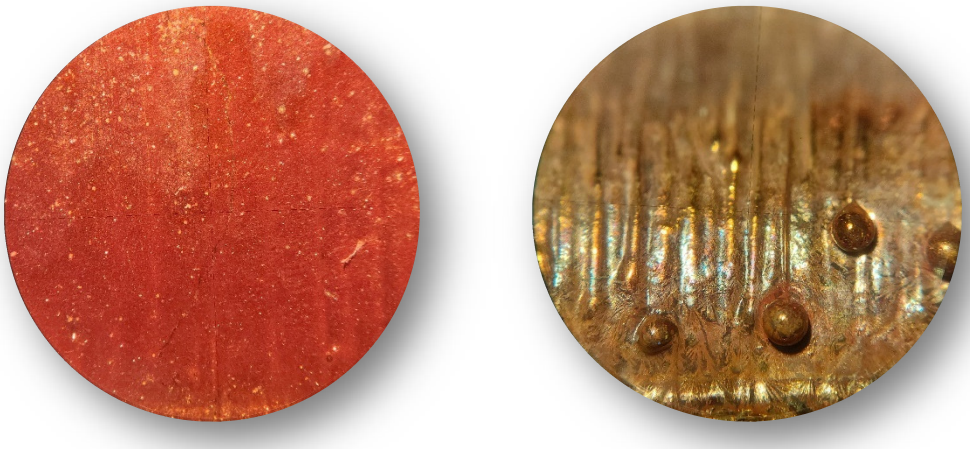
Los resultados obtenidos son clarificadores. La pieza electroconformada correspondiente al ensayo 2.2, muestra un acabado superficial muy rugoso y deficiente. Presenta una textura con un patrón muy marcado a base de rayas, con desarrollo sobre el eje vertical en la cara frontal o cara no funcional de la pieza. La figura 5.6b permite observar este patrón de deposición.

La pieza electroconformada correspondiente al ensayo 2.1 (agitación activada), presenta una calidad superficial muy superior a su homóloga. Si bien persiste el patrón de rayado vertical, este es mucho más suave y con menos imperfecciones en la pieza.

(a) (b)

Fig. 5.6. Resultado de la deposición. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2

Una inspección más exhaustiva al microscopio muestra estas diferencias con mayor detalle. Se aprecia no solo una diferencia en textura sino también en color. La pieza realizada con agitación presenta mayor uniformidad y un color más rojizo. La figura 5.7 muestra las imágenes resultantes de la inspección.



(a) (b)

Fig. 5.7. Diferencia de texturas al microscopio x2. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2

Durante el desarrollo del ensayo 2.2, se pudo apreciar una acumulación de burbujas en la parte inferior de la pieza. La figura 5.8 muestra una imagen de este efecto.

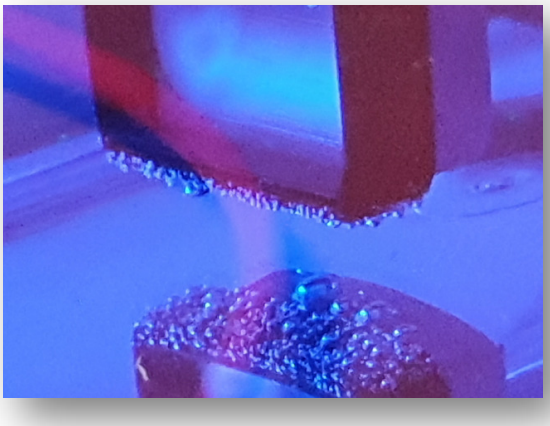
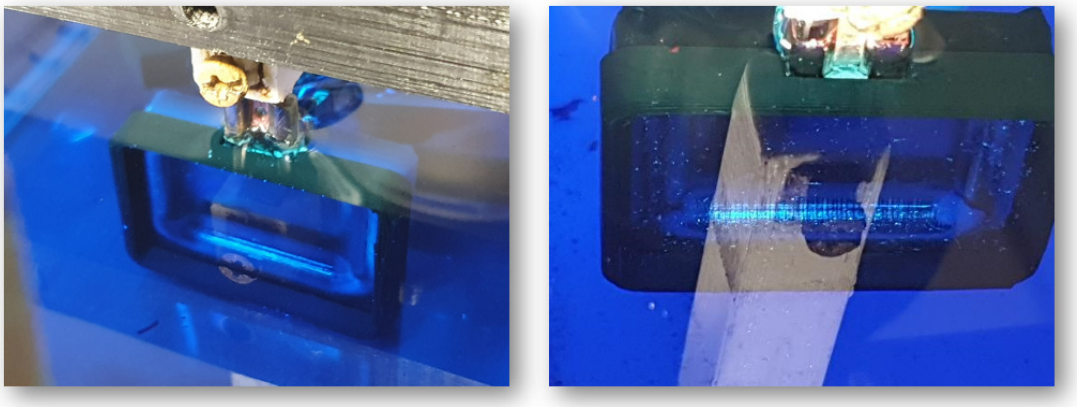


Fig. 5.8. Ensayo 2.2. Burbujeo en zona inferior de la pieza

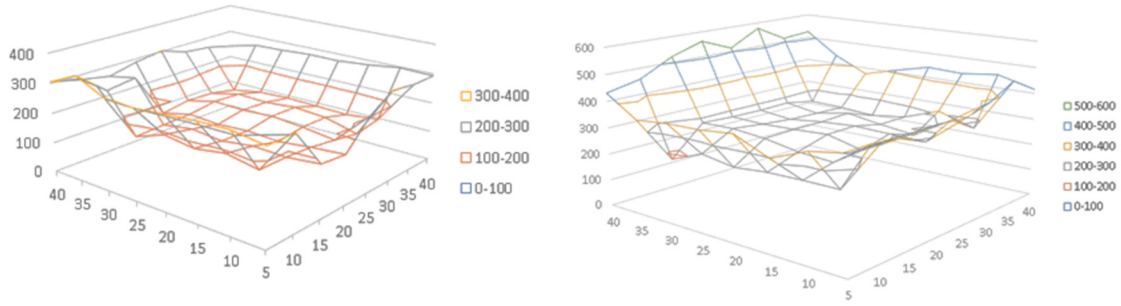
El posterior desplazamiento de estas burbujas hacia la superficie parece ser el causante de la estratificación. Durante el desarrollo del ensayo 2.1 en la zona de transferencia no se observaron esas burbujas, la influencia de la agitación no lo permite. La figura 5.7 permite apreciar las diferencias entre los dos ensayos.



(a) (b)

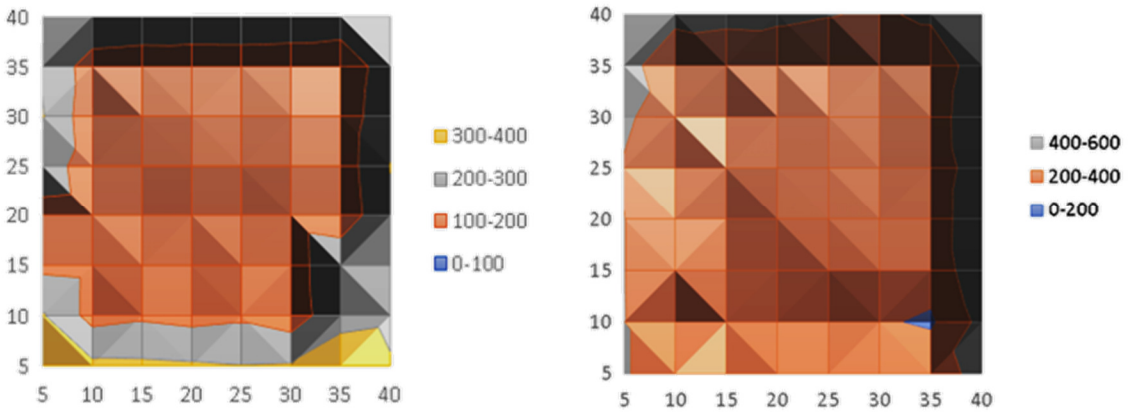
Fig. 5.9. Pieza sumergida durante el proceso de deposición. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2

Desde el punto de vista de los espesores de masa depositada, se puede apreciar un incremento sustancial en la pieza del ensayo 2.2. Existen aumentos que superan el 60% en algunos puntos de la pieza, principalmente en aquellas zonas donde la textura alcanza picos más localizados. No obstante, desde el punto de vista de la distribución de esos espesores, se mantiene cierta uniformidad, resultado esperado teniendo en cuenta que la geometría cuenta con una zona funcional plana. Las figuras 5.10 y 5.11 muestran la representación gráfica de esta distribución.



(a) (b)

Fig. 5.10. Mapa de espesores 3D. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2



(a) (b)

Fig. 5.11. Distribución superficial de espesores. (a) Ensayo 2.1. (b) Ensayo 2.2

5.3.2.3. Ensayo 2.2.h.

A la vista de los resultados del ensayo 2.2, con una estratificación muy marcada de la superficie en dirección vertical, surgió la incertidumbre sobre su origen. Podría deberse a un flujo de vertical de corriente, provocado por la disposición del conector, en la parte superior de la pieza, o bien a un flujo ascendente de los iones, desde el fondo del baño electrolítico.

Para disipar las dudas se decidió realizar un tercer ensayo. Para ello se realiza una modificación del sistema de sujeción de la pieza, de manera que el conector quede en posición horizontal. Un cambio en la direccionalidad de la textura bajo las mismas condiciones de ensayo validaría la primera de las hipótesis. Se utilizó el identificador 2.2 h, haciendo referencia a la orientación horizontal del conector. La tabla 5.9 muestra los parámetros operativos.

Tabla 5-9: Condiciones operativas para el ensayo 2.2 h

	Ensayo 2.2.h		
Cod. Identificación:	200717		
Modelo funcional:	Evo 0 (horizontal)		
Masa modelo metalizado:	9,7751g		
Sistema de Agitación:	desactivado		
Configuración DCAB:	Manual		
Caudal recirculación:	0 l/min		
pH:	1,17		
Volumen de solución:	1,1L		
Temperatura:	21°C		
Distancia ánodo-cátodo:	100mm		
Configuración KEITHLEY2460:	Automática		
Tiempo de deposición:	5 h		
Usos del baño:	3		
Usos del modelo funcional:	2		
Ciclo de trabajo	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$
	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$
Etapa 1:	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5 V	60min

Etapa 3:	variable	1 V	120min
Etapa 4:	900mA	variable	120min

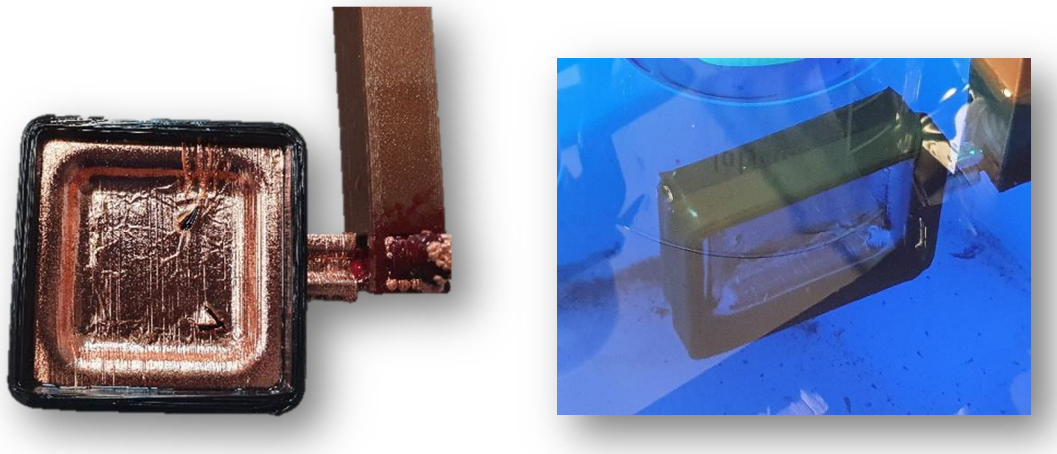
5.3.2.4. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2.2.h.

Al igual que en los ensayos precedentes como parámetros de comparación se revisan la cantidad de masa depositada, la calidad geométrica y superficial de la pieza y el patrón de distribución del espesor de cáscara. La tabla 5-10 muestra los resultados del experimento.

Tabla 5-10. Resultados obtenidos ensayo 2.2.h

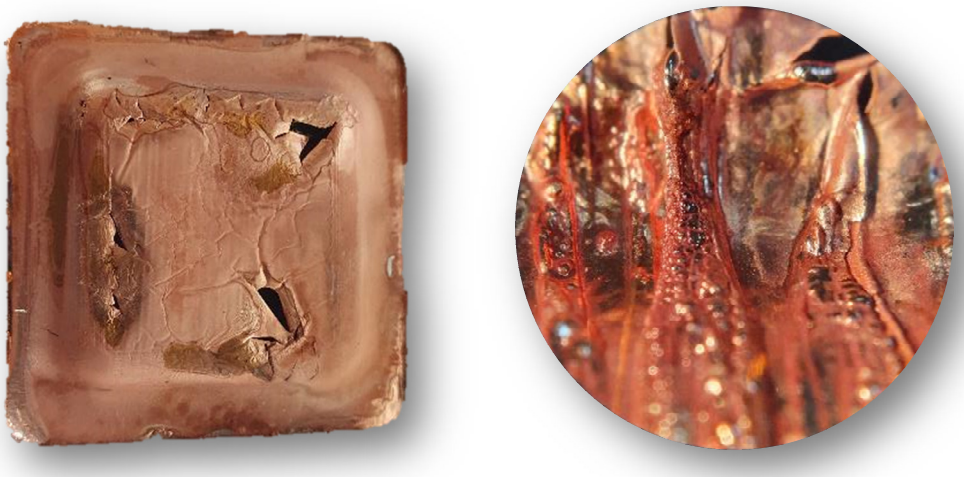
	Ensayo 2.2.h
Masa pieza electroconformada	
Masa pieza:	12,5609g
Masa Cáscara:	2,1248g
Calidad geométrica	
Dimensiones:	Correctas
Geometría:	Incompleta
Distorsión:	Admisible
Acabado superficial:	Deficiente
Observaciones:	Perforaciones
Espesor	
Bordes $_{(valor\ medio)}$:	337µm
Zona funcional $_{(valor\ medio)}$:	236µm
Máximo:	487µm
Mínimo:	0µm

En esta ocasión la pieza no se completa, aparecen zonas sin deposición. Sin embargo, desde el punto de vista del interés de este experimento, al igual que en el ensayo 2.2., aparece de nuevo la textura con el patrón de rayado vertical.



(a) (b)

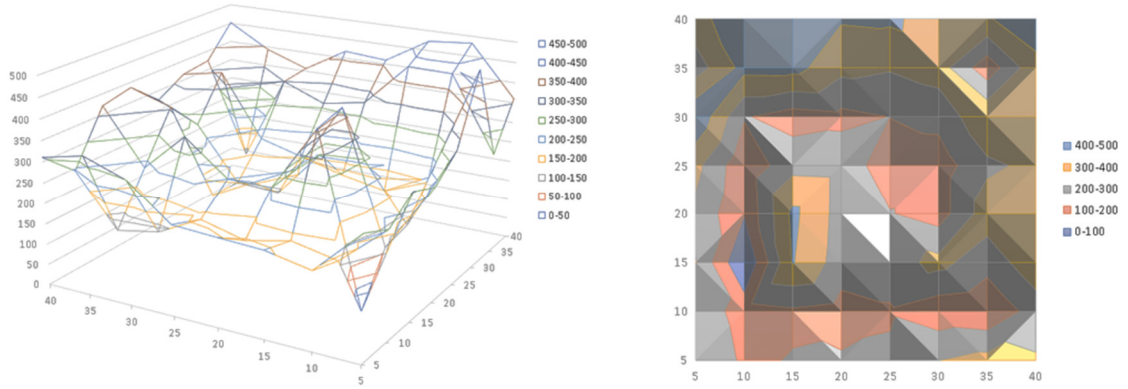
Fig. 5.12. Ensayo 2.2.h. (a) Resultado de la deposición. (b) Desarrollo del ensayo.



(a) (b)

Fig. 5.13. Ensayo 2.2.h. (a) Defectos en superficie funcional. (b) textura vista al microscopio.

Desde el punto de vista de los espesores de masa depositada se mantiene la tendencia de incremento respecto a la pieza del ensayo 2.1., aunque con valores que en este caso no superan el 50%. La distribución de esos espesores, sin embargo, se muestra más irregular. La figura 5.14 muestran la representación gráfica de esta distribución.



(a) (b)

Fig. 5.14. Ensayo 2.2.h. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores.

5.3.2.5. Ensayo 2.3.

Para finalizar con esta serie de experimentos se decidió acometer una última prueba. En este caso, repitiendo las condiciones del ensayo 2.1, se utilizaría el DCAB en modo de configuración automática. Se pretendía validar sus capacidades de trabajo de forma autónoma.

Paralelamente, se podría establecer si el modo automático proporcionaba alguna diferencia. La geometría plana, libre de detalles complejos, se mostraba a priori favorable para verificar estas posibles diferencias.

En modo manual, la agitación no se modifica independientemente de las condiciones instantáneas del proceso. Sin embargo, en modo automático, un descenso de la intensidad de corriente provoca un aumento del caudal para intentar reactivar las condiciones de la deposición. Como resultado, cabría esperar una mejora del acabado superficial a costa de una disminución en el espesor depositado.

Para referenciar este ensayo se utilizó el identificador 2.3. La tabla 5-11 muestra las condiciones operativas del experimento.

Tabla 5-11. Condiciones operativas para el ensayo 2.3

	Ensayo 2.3
Cod. Identificación:	210119
Modelo funcional:	Evo 0
Masa modelo metalizado:	9,6839g
Sistema de Agitación:	Activado
Configuración DCAB:	Automático
Caudal recirculación:	Variable
pH:	1,07
Volumen de solución:	1,1L
Temperatura:	21°C
Distancia ánodo-cátodo:	100mm
Configuración KEITHLEY2460:	Automática
Tiempo de deposición:	5 h
Usos del baño:	15
Usos del modelo funcional:	

Ciclo de trabajo			
	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$
Etapa 1:	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5 V	60min
Etapa 3:	variable	1 V	120min
Etapa 4:	900mA	variable	120min

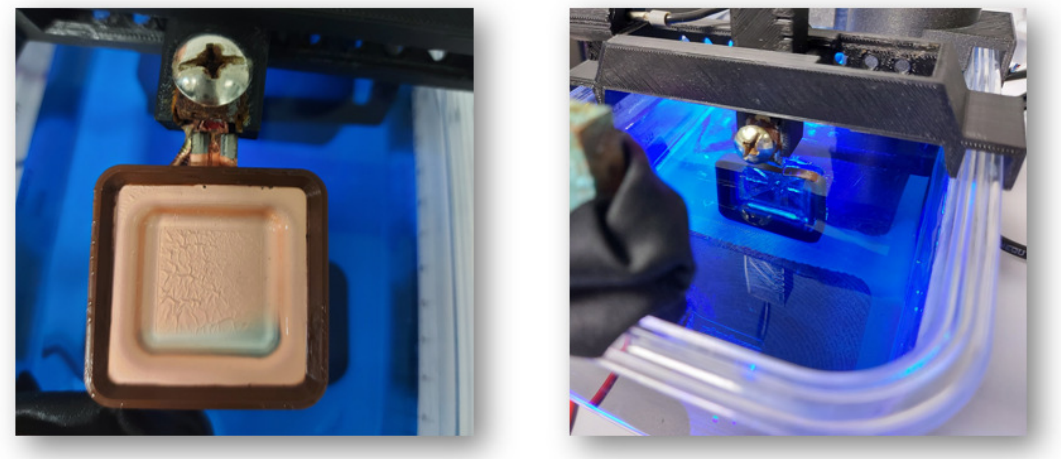
5.3.2.6. Resultados y discusiones del ensayo tipo 2.3.

Al igual que en el resto de este grupo de ensayos como parámetros de comparación se revisan la cantidad de masa depositada, la calidad geométrica y superficial de la pieza y el patrón de distribución del espesor de cáscara. La tabla 5-12 muestra los resultados del experimento bajo las nuevas condiciones.

Tabla 5-12. Resultados obtenidos ensayo 2.3

	Ensayo 2.3
Masa pieza electroconformada	
Masa pieza:	11,4941g
Masa Cáscara:	1,8102g
Calidad geométrica	
Dimensiones:	Correctas
Geometría:	Completa
Distorsión:	Admisible
Acabado superficial:	Bueno
Observaciones:	Separación espontánea
Espesor	
Bordes $_{(valor\ medio)}$:	232µm
Zona funcional $_{(valor\ medio)}$:	158µm
Máximo:	286µm
Mínimo:	109µm

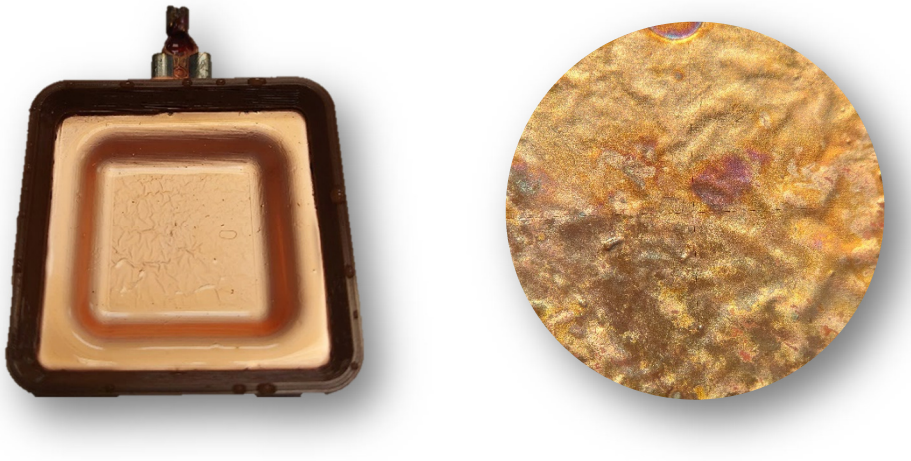
Las condiciones del baño permanecen bastante estables durante todo el experimento. La pieza se completa de forma correcta, con un acabado superficial de buena calidad, aunque con algunas zonas más rugosas. La figura 5.15 muestra imágenes del proceso.



(a) (b)

Fig. 5.15. Ensayo 2.3 (a) Resultado de la deposición. (b) Desarrollo del ensayo.

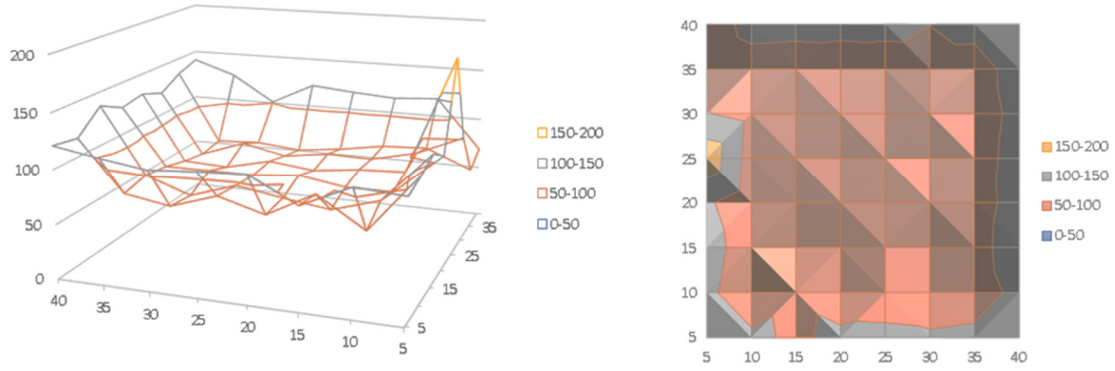
En una primera inspección visual, no se aprecia el patrón de rayado vertical. La mayor agitación del baño en las etapas de menor intensidad parece haber afectado a la estabilidad de la deposición. La inspección al microscopio muestra que el patrón vertical ha desaparecido, hay una mayor uniformidad en la distribución de la deposición. La figura 5.16 muestra el resultado de la inspección.



(a) (b)

Fig. 5.16 Ensayo 2.3. (a) Acabado de la superficie. (b) Textura vista al microscopio.

Atendiendo a los espesores de masa depositada no se aprecian excesivas diferencias con respecto a la pieza del ensayo 2.1. Si bien los valores son un poco inferiores, no resulta una cantidad relevante. La mejora en el acabado superficial es lo suficientemente importante como para justificar un aumento en el tiempo de deposición. Este aumento, concentrado en la última, etapa podrá conseguir espesores similares e incluso superiores a los del ensayo 2.1. La figura 5.17 muestra muestran la representación gráfica de los espesores depositados.



(a) (b)

Fig. 5.17. Ensayo 2.3. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores.

5.3.2.7. Conclusiones del ensayo tipo 2.

La inspección visual de las piezas no deja lugar a dudas. La pieza generada sin agitación presenta un acabado superficial deficiente en su cara no funcional. La aparición de una textura rayada, con un patrón vertical perfectamente marcado, identifica la presencia de una estratificación provocada por el ascenso del flujo de iones en la zona de transferencia.

Las imágenes del interior del tanque, durante el transcurso del experimento, muestran una corriente de burbujas desde el fondo, que puedan ser las causantes de este acabado superficial.

Por contra, el ensayo realizado con agitación del baño carece de este burbujeo, y la pieza depositada presenta un acabado superficial de mejor calidad, más uniforme y con una textura más suave.

Atendiendo a las mediciones, se puede apreciar una diferencia notable de espesores entre los ensayos 2.1 y 2.2. La agitación del baño impide la concentración del flujo y difumina la deposición. Esto genera menos crecimiento a la vez que mayor uniformidad. El patrón de distribución de la cáscara depositada es más equilibrado.

En cuanto al experimento 2.2h su resultado es concluyente. En ausencia de agitación, se produce una estratificación muy marcada en dirección vertical que es independiente de la posición del punto de conexión del modelo funcional.

Desde el punto de vista geométrico, la pieza del ensayo 2.2 h no se completó. La falta de deposición que se puede observar con la inspección visual coincide con la disminución observada en la lectura de masa depositada. Aunque el cambio en la posición del conector ha resultado desfavorable estéticamente, el resultado no es concluyente para la geometría. Sería necesario una serie de ensayos, para estudiar la posible influencia negativa de colocar el punto de conexión, y por tanto la dirección teórica del flujo de corriente, en dirección perpendicular al flujo de iones del baño electrolítico.

Se puede concluir que la influencia de la agitación del baño es muy relevante en el resultado de las piezas. Las posibilidades que ofrece el equipo desarrollado, para modificar y controlar los parámetros de agitación del baño, son una aportación de gran importancia para el desarrollo de los experimentos.

5.3.3. ENSAYO TIPO 3.

5.3.3.1. Descripción.

Los experimentos realizados con el ensayo tipo 1, han adelantado que, utilizando etapas con amperajes altos, se generan deposiciones con crecimientos importantes. No obstante, se decidió realizar un experimento especialmente enfocado en la consecución de crecimientos superiores a 250 µm en la zona funcional. Tal y como se expresó en el apartado 5.1 de este mismo capítulo, es un valor de interés para la posterior utilización de la cáscara como herramienta en el proceso EDM.

La tabla 5-13 muestra las condiciones operativas del experimento.

Tabla 5-13. Condiciones operativas para el ensayo tipo 3

	Ensayo 3.1		
Cod. Identificación:	191216		
Modelo funcional:	Evo 2		
Masa modelo metalizado:	11,7551g		
Sistema de Agitación:	Activado		
Flujo:	Laminar		
Configuración DCAB:	Manual		
Caudal recirculación:	1,83 l/min		
pH:	1,09		
Volumen de solución:	1,1 L		
Temperatura:	21°C		
Distancia ánodo-cátodo:	100mm		
Configuración KEITHLEY2460:	Automática		
Tiempo de deposición:	24 h		
Usos del modelo funcional:	4		
Ciclo de trabajo			
	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$
Etapa 1:	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5 V	120min
Etapa 3:	variable	1,5 V	120min
Etapa 4:	900mA	Variable	1080min

5.3.3.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 3.

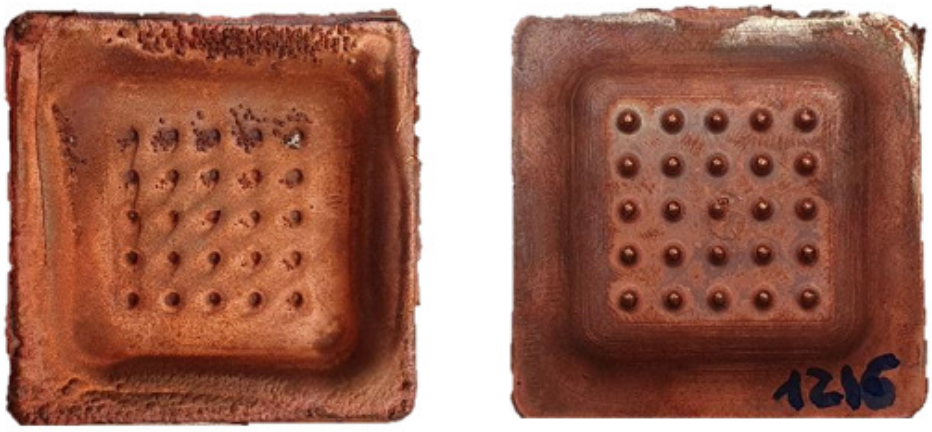
Al igual que en los ensayos precedentes como parámetros de comparación se revisan la cantidad de masa depositada, la calidad geométrica y la calidad superficial de la pieza. En este caso, se pone especial atención en las mediciones de espesor de la cáscara y su patrón de distribución. La tabla 5-14 muestra los resultados del ensayo.

Tabla 5-14. Resultados obtenidos en ensayo tipo 3

	Ensayo 3.1
Masa pieza electroconformada	
Masa pieza:	25, 5636g
Masa Cáscara:	11,9775g
Calidad geométrica	
Dimensiones:	Correctas
Geometría:	Completa
Distorsión:	Buena
Acabado superficial:	Excelente en la cara funcional
Observaciones:	Buen resultado general
Espesor	
Bordes $_{(valor\ medio)}$:	1590µm
Zona funcional $_{(valor\ medio)}$:	520µm
Fondos $_{(valor\ medio)}$:	407µm
Máximo$_{(superficie)}$:	2522µm
Mínimo$_{(superficie)}$:	383µm
Máximo$_{(fondos)}$:	533µm
Mínimo$_{(fondos)}$:	328µm

Tal y como se esperaba, la utilización de un ciclo de trabajo con una última etapa con intensidades altas *(etapa de crecimiento)* extendida en el tiempo, generó un crecimiento muy relevante en todas las zonas de la pieza. La comparación de los resultados con los obtenidos en el ensayo 1.18, realizado con parámetros eléctricos parecidos en el ciclo de trabajo, presentan un aumento de material tres veces superior. Este experimento vuelve a confirmar la importancia de la etapa inicial *(etapa de generación de detalles)* con amperajes bajos, cuya aplicación en condiciones de agitación, resulta fundamental para conseguir geometrías completas con detalles a escala micro.

Las figuras 5.18 y 5.19 muestran imágenes de la pieza 191216 terminada.



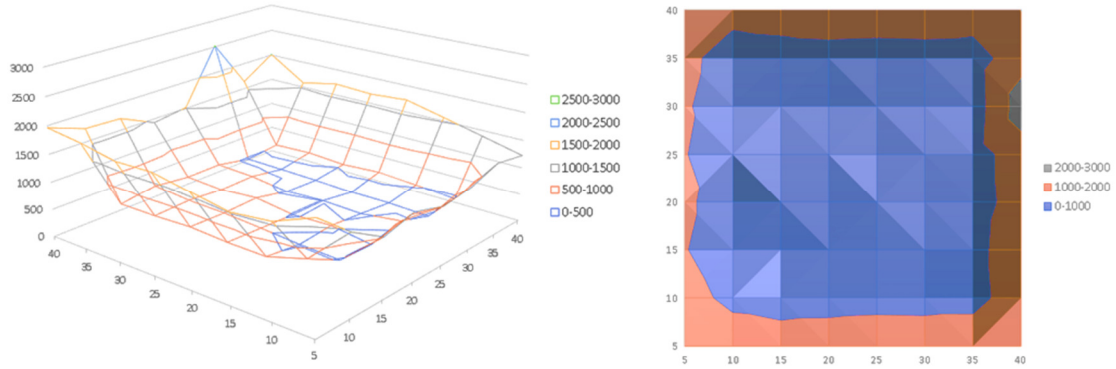
(a) (b)

Fig. 5.18. Ensayo 3.1. Cáscara depositada. (a) Cara frontal. (b) Cara trasera o funcional

Fig. 5.19. Ensayo 3.1. Cáscara electro conformada.

En este caso, la importancia de los buenos resultados conseguidos, cobran mayor relevancia gracias a la buena uniformidad de espesor conseguido, tanto en la superficie funcional como en los fondos de las cavidades semiesféricas. Además, la lectura de datos procedentes del proceso de micro-electroconformado proporciona una valiosa información de la evolución de la pieza, que puede ser estudiada en profundidad.

Las figuras 5.20 y 5.21 muestran esta uniformidad de forma gráfica.



(a) (b)

Fig. 5.20. Ensayo 3.1. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores.

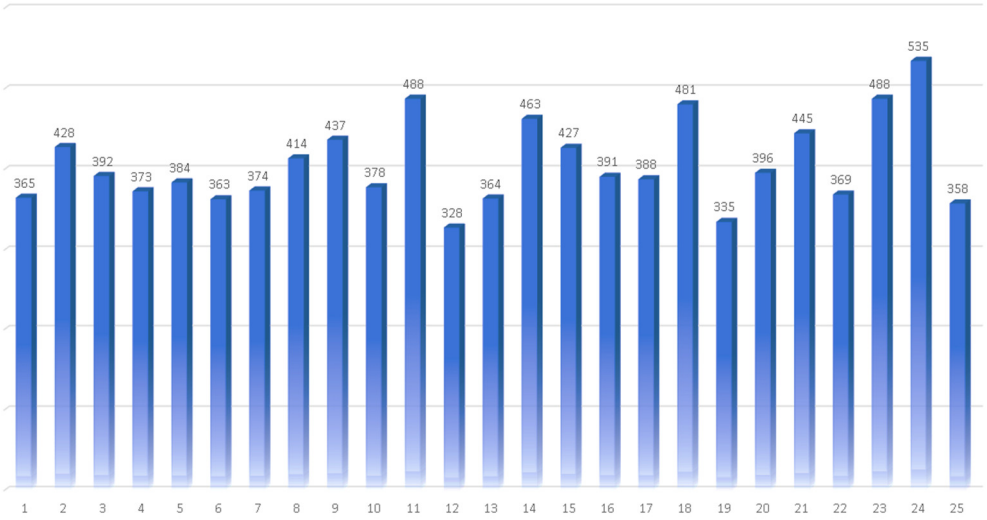


Fig. 5.21. Ensayo 3.1. Espesor en los fondos de las cavidades.

5.3.3.3. Conclusiones del ensayo tipo 3.

Los resultados de este modelo de experimento han resultado concluyentes. Extender la etapa de crecimiento en condiciones de densidades de corriente incrementa los espesores depositados. La agitación del baño se muestra indispensable para controlar este crecimiento de manera uniforme, dada la complejidad geométrica del modelo funcional. Esta es una geometría a priori muy propensa a concentraciones dispares en la deposición debido a la gran cantidad de

cambios de relieve presentes en la misma. La aportación del equipo desarrollado se ha mostrado eficaz en la consecución del objetivo.

La posibilidad de control del proceso de forma autónoma, así como la disponibilidad de los datos generados durante tantas horas de procesado, trasladan confianza al investigador en la consecución de los objetivos. Equipamientos más simples tendrían serían difíciles para generar los mismos resultados.

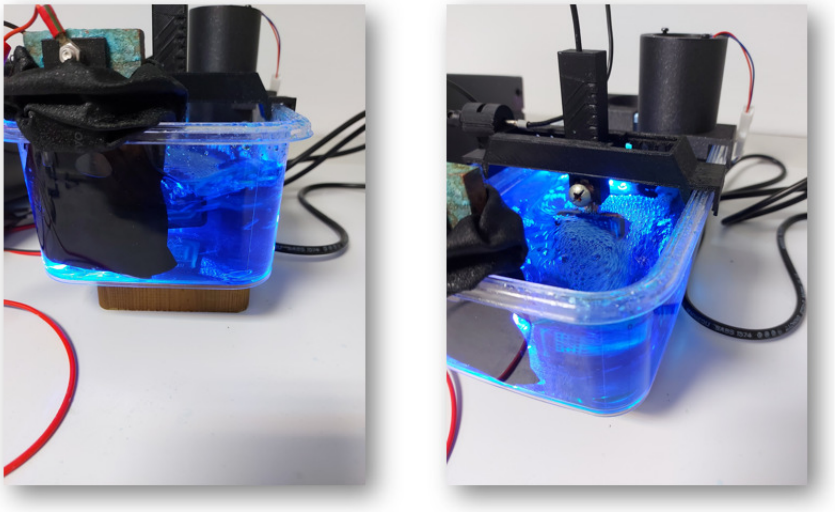
5.3.4. ENSAYO TIPO 4.

5.3.4.1. Descripción.

El objetivo de este experimento es establecer las posibles diferencias entre un sistema de agitación con flujo laminar o con flujo turbulento, así como las capacidades del equipo para aportar soporte a esta línea de ensayos. El diseño e implementación de un colector a la salida de la bomba de agitación, pretende eliminar los efectos perjudiciales de un flujo de solución electrolítica no controlado. De forma visual, es fácil identificar la aparición de remolinos y burbujeo en superficie, provocados por el golpeo del fluido contra las paredes del tanque de ensayos. Se pretende establecer la verdadera incidencia de estos fenómenos sobre el proceso de deposición.

La figura 5.22 muestra imágenes de la presencia de este fenómeno en condiciones de agitación sin colector.

La tabla 5-15 las condiciones operativas utilizadas para el desarrollo de este experimento.



(a) (b)

Fig. 5.22. Ensayo 4.1. Condiciones del baño durante el experimento.

Tabla 5-15. Condiciones operativas para el ensayo tipo 4

	Ensayo 4.1
Cod. Identificación:	210120
Modelo funcional:	Evo 2
Masa modelo metalizado:	9,6839g
Sistema de Agitación:	Activado
Flujo:	Turbulento
Configuración DCAB:	Automático
Caudal recirculación:	Variable
pH:	1,09
Volumen de solución:	1,1 L
Temperatura:	21°C
Distancia ánodo-cátodo:	100mm
Configuración KEITHLEY2460:	Automática
Tiempo de deposición:	5 h 5´
Usos del modelo funcional:	18

Ciclo de trabajo

	$I_{(intensidad)}$	$V_{(tensión)}$	$t_{(tiempo)}$
Etapa 1:	100mA	variable	5min
Etapa 2:	variable	0,5 V	180min
Etapa 3:	variable	1,5 V	120min
Etapa 4:	900mA	Variable	120min

5.3.4.2. Resultados y discusiones del ensayo tipo 4.

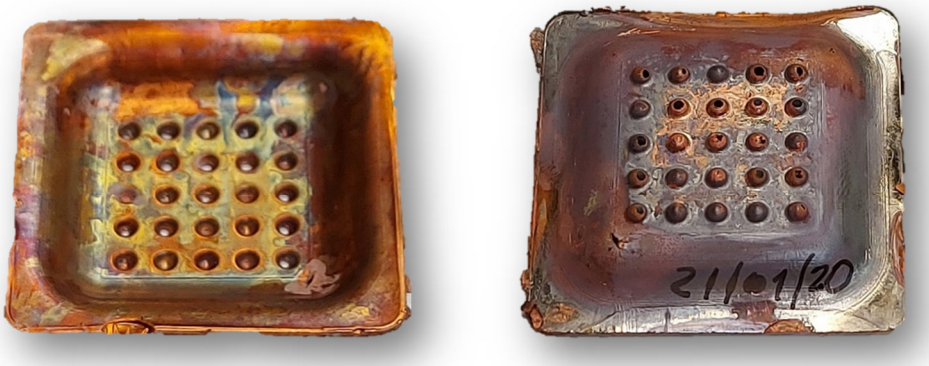
Como parámetros de comparación, y tal y como se ha venido realizando en los ensayos anteriores, se revisan la cantidad de masa depositada, la calidad geométrica y la calidad superficial de la pieza. La tabla 5-16 muestra los resultados obtenidos tras el proceso de deposición.

Tabla 5-16. Resultados obtenidos en ensayo tipo 4

	Ensayo 4.1
Masa pieza electroconformada	
Masa pieza:	11,9310 g
Masa Cáscara:	1,1024 g
Calidad geométrica	
Dimensiones:	Correctas
Geometría:	Incompleta
Distorsión:	Buena
Acabado superficial:	Correcto en la cara funcional
Observaciones:	Presencia de agujeros y poros
Espesor	
Bordes $_{(valor\ medio)}$:	126µm
Zona funcional $_{(valor\ medio)}$:	87µm
Fondos $_{(valor\ medio)}$:	35,2µm
Máximo$_{(superficie)}$:	181µm
Mínimo$_{(superficie)}$:	58µm
Máximo$_{(fondos)}$:	138µm
Mínimo$_{(fondos)}$:	0µm

La inspección visual determina malos resultados. Tan solo se completan 4 agujeros y otros 5 sólo de manera parcial. Si bien el acabado superficial es bueno, la geometría no resulta válida por estar inconclusa. Sobre todo, en las etapas de tensión constante y debido a la compensación de caudal llevada a cabo por el DCAB, se produjeron ciclos de excesiva turbulencia en el interior

del baño. Se detectaron incluso gran número de salpicaduras hacia el exterior del tanque de ensayos. La figura 5.23 muestra imágenes de la pieza terminada.



(a) (b)

Fig. 5.23. Ensayo 4.1. Cáscara depositada. (a) Cara frontal. (b) Cara trasera o funcional.

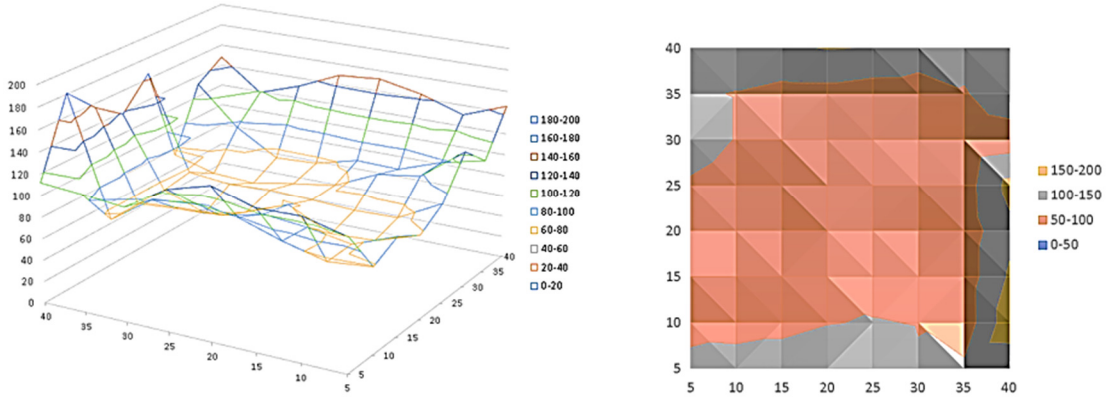
Como efecto más relevante de este ensayo, constatar la aparición de deposiciones no deseadas en las zonas laterales de la pieza, saltando incluso la barrera o máscara de protección.

La deposición presenta discontinuidad en la franja protegida durante la deposición, no habiendo conexión física entre el material depositado a uno y otro lado. No obstante, en las zonas depositadas, la calidad superficial resulta excelente, con una estructura de grano muy fino. Las figuras 5.24 y 5.25 muestran el resultado de la deposición.

Fig. 5.24. Ensayo 4.1. Efecto de salto de la barrera de protección.

Fig. 5.25. Ensayo 4.1. Vista de la superficie al microscopio (30x).

El resultado del proceso de medición presenta una cáscara de poco espesor, aunque con una distribución bastante uniforme del material depositado. Las figuras 5.226 y 5.27 muestran la representación gráfica de los resultados.



(a) (b)

Fig. 5.26. Ensayo 4.1. (a) Mapa de espesores 3D. (b) Distribución superficial de espesores.

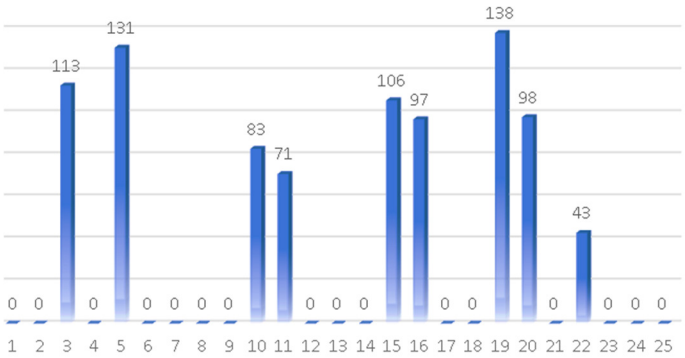


Fig. 5.27. Ensayo 4.1. Espesores en los fondos de las cavidades.

5.3.4.3. Conclusiones del ensayo tipo 4.

El uso del colector permite variar las condiciones de trabajo, pudiéndose realizar experimentos en condiciones para flujo laminar o flujo turbulento. Se ha demostrado que ambas opciones ofrecen resultados completamente diferentes.

En este caso, el uso del flujo turbulento ha mostrado la capacidad del baño para proyectar los iones más allá de las barreras de protección. La cantidad de material depositado en zonas no deseadas provoca una merma de espesor en la pieza funcional.

A pesar de la buena calidad del depósito desde el punto de vista estético, tanto en la superficie funcional como en los fondos de las cavidades completadas, lo incompleto de la mayoría de las cavidades, no parece alentar el uso del flujo turbulento, por lo menos para conseguir detalles a pequeña escala.

No obstante, el uso del flujo turbulento genera una traza interesante en la que profundizar. La calidad del depósito formula interés para su uso quizás en aplicaciones a mayor escala con necesidad de recubrimiento en todo el volumen de la pieza.

Una vez más, la aportación del equipo desarrollado se ha mostrado eficaz en la consecución del objetivo. Ofrece posibilidades al investigador de optar por diferentes opciones a la hora de realizar sus experimentos. Además, se ha conseguido que el cambio de una a otra forma de trabajar sea sencillo, a través de un elemento fácil de manipular.

Dado lo accesible de su fabricación, el uso del colector permite múltiples evoluciones en cuanto a formas y posiciones. Esto lo convierte en un componente adaptable a las necesidades de cualquier proceso.

5.4. FABRICACIÓN DE HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICES ESTRUCTURADAS.

5.4.1. INTRODUCCIÓN.

Tal y como se explicó en el Capítulo 1 la línea de investigación que dio origen a esta Tesis pretende el texturizado de superficies meso estructuradas mediante electroerosión por penetración (SEDM). Para ello, el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz, ha desarrollado una herramienta específicamente diseñada para esa aplicación, que utilizaba un electrodo de grafito como elemento de desgaste.

La figura 5.28 muestra el plano con el desarrollo del portaelectrodos denominado EROWA ER-009222. En la posición 10 se puede identificar el electrodo de grafito que es de sección cuadrada. Dispone de una zona de desgaste de dimensiones exteriores de 51mm x 51mm x 15mm (largo x ancho x alto) con una mecha de sujeción, de sección también cuadrada, de dimensiones 26mm x 26mm x 15mm (largo x ancho x alto).

El diseño del portaelectrodos cuenta con alojamiento de sección cuadrada para el encaje de la mecha de dimensiones 26,5mm x 26,5mm (largo x ancho), con una profundidad de 20mm, que permite cierta holgura en el posicionamiento.

Para la fijación se utilizan dos prisioneros de M8 que bloquean la pieza en los dos ejes de desplazamiento.

La figura 5.29 muestra imágenes del porta electrodo fabricado.

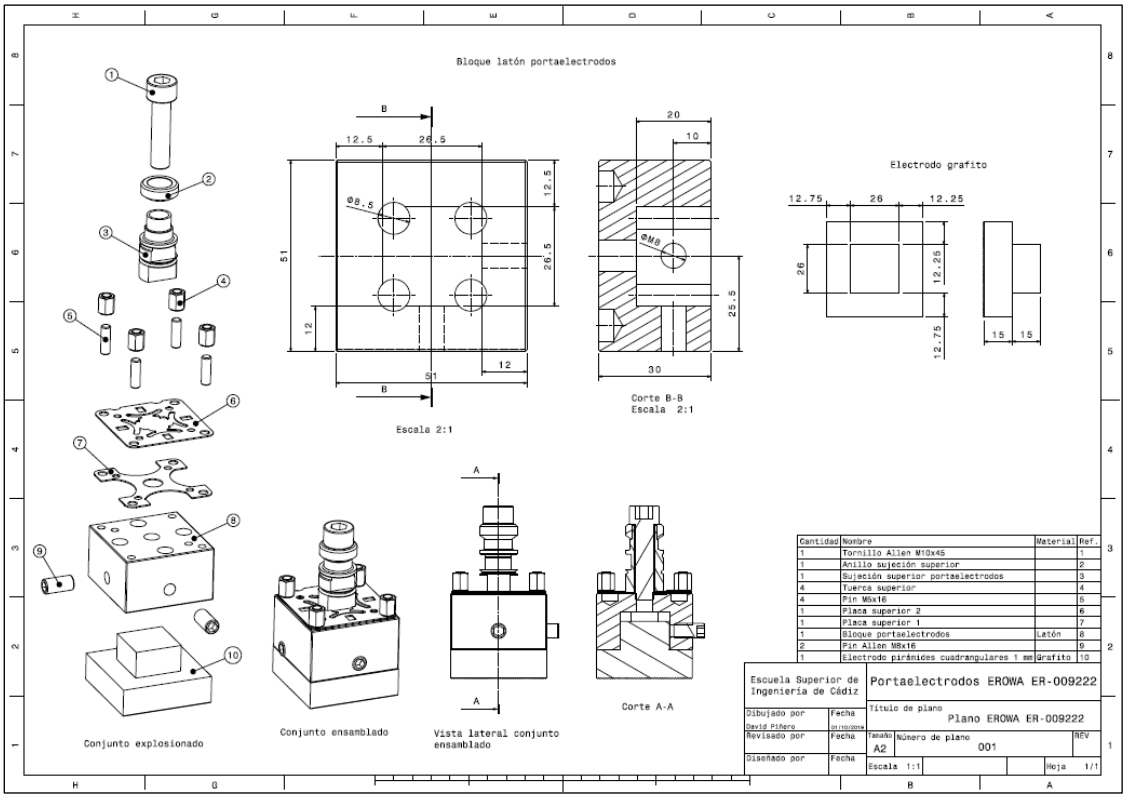


Fig. 5.28. Plano de portaelectrodos EROWA ER-00922.

(información facilitada por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

(a) (b)

Fig. 5.29. Porta electrodos EROWA_ER-009222. (a) Vista de conjunto. (b) Vista inferior.

(imágenes cedidas por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

En base al diseño del portaelectrodos EROWA ER-009222, se desarrolló un prototipo de herramienta compatible para alojar las cáscaras de cobre electroconformadas. Se pretendía validar las aptitudes de estas para su uso en el proceso electroerosión por penetración (SEDM).

Esta herramienta se diseñó compuesta por dos elementos principales:

1- Electrodo funcional: es el elemento que hará la función de electrodo en el proceso SEDM y que contiene, como superficie de desgaste, la cáscara funcional fabricada por micro-electroconformado.
2- Soporte: elemento encargado de alojar al electrodo de material compuesto, a la misma vez que encajar en el portaelectrodos EROWA ER-009222.

5.4.1.1. Fabricación del electrodo funcional.

La cáscara electroconformada se ha fabricado con un espesor establecido por diseño para soportar el desgaste del proceso de electroerosión por penetración. No obstante, ese espesor no garantiza su integridad y estabilidad estructural, por lo que es necesario aportarle rigidez. Se decide implementar un soporte estructural para su superficie no funcional (cara opuesta a la de contacto con el modelo, durante la deposición) en base a dos materiales: resina de poliéster y resina epoxi.

Las resinas de poliéster y las resinas epoxi son polímeros termoestables. Cuentan con la ventaja de ser muy moldeables hasta que se realiza el proceso de curado, por lo que se adaptan de forma sencilla a cualquier geometría. Son aptas para utilizarlas en procesos de moldeo. Una vez curadas, proceso que se consigue con aporte de calor, su estructura no puede ser modificada alcanzando una gran dureza. Si bien pueden ser retrabajadas con procedimientos de

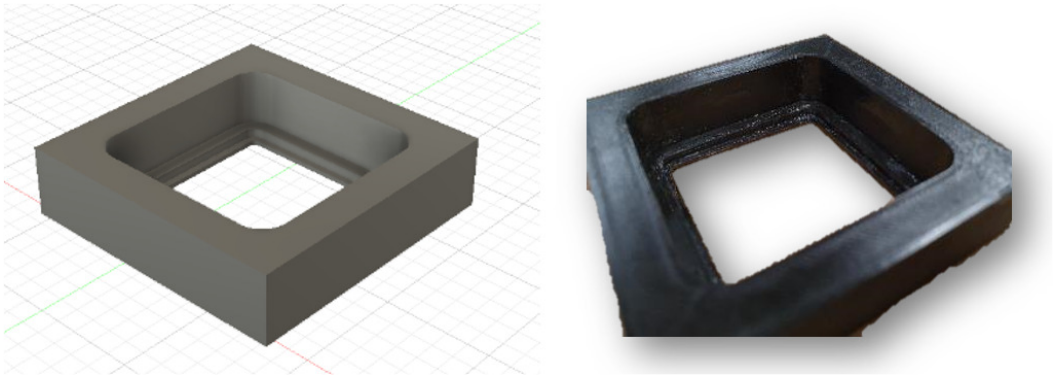
mecanizado para modificar levemente su geometría o su superficie, su estructura molecular permanece inalterada. Procesos posteriores de calentamiento provocarían su degradación.

Ambas resinas poseen una gran resistencia a la corrosión y a factores medioambientales, así como una alta estabilidad química, no siendo conductoras de la energía eléctrica. Mecánicamente, presentan una gran resistencia estructural, resistencia al desgaste y a la conformación, presentando una rotura frágil ante solicitaciones que superen sus valores admisibles. Desde el punto de vista estético ofrecen transparencia u opacidad dependiendo de su composición.

La resina de poliéster seleccionada para esta aplicación es una resina comercial (Presto, Motip Dupli Gmbh, Haßmersheim, Alemania). Se presenta en formato líquido con dos componentes (resina y catalizador). Para hacerla pasar al estado sólido, donde aporta todas sus capacidades, es necesario realizar la mezcla de los dos componentes y esperar un proceso de curado. Según el fabricante, el tiempo de aplicación máximo es de 30 minutos y el tiempo de curado hasta lograr las condiciones de servicio definitiva, son aproximadamente 5 días con condiciones de temperatura de 20°C [147].

La resina epoxi seleccionada para esta aplicación es una masilla epoxi comercial (Poxilina®, Fenedur S.A., Montevideo, Uruguay). Se presenta en formato semisólido con dos componentes (A y B). Para hacerla pasar al estado sólido, donde aporta todas sus capacidades, es necesario realizar la mezcla de los dos componentes y esperar un proceso de curado. Según el fabricante, el tiempo de aplicación máximo es de 10 minutos y el tiempo de curado hasta lograr las condiciones de servicio definitiva, es de aproximadamente 1 hora con condiciones de temperatura de 20°C

En aplicación a la fabricación del soporte para la cáscara se decidió realizar un procedimiento de moldeo para adaptar ambas resinas a la geometría de la pieza funcional. Se hizo necesario el diseño y fabricación de un útil porta cáscara (molde) que permitiera alojar la pieza. Para conseguir su compatibilidad geométrica con el porta electrodo, se diseñó con una geometría cuadrada de dimensiones 60x60x15 mm (largo x ancho x alto) con un rebaje que bloquea la pieza por encaje, permitiendo un espesor final de resina de 12mm. La figura 5.30 muestra imágenes del útil diseñado.



(a) (b)

Fig. 5.30. Molde. (a) Modelado. (b) Pieza fabricada.

Para su conformación se empleó tecnología de fabricación aditiva FDM en base a los siguientes parámetros:

- Máquina: Artillery SW- X1
- Material: PLA Prusa Galaxy Black - Ø1,25mm
- Altura de capa: 0,28mm
- Temperatura de impresión: 215°C
- Temperatura de cama: 70°C
- Flujo: 100%
- Velocidad de impresión: 50mm/s

- Velocidad de desplazamiento: 150mm/s
- Soporte: no.
- Tiempo de impresión: 1h 31´
- Cantidad de material: 18g – 5,32m

La figura 5.31 muestra la posición del diseño sobre la placa de impresión.

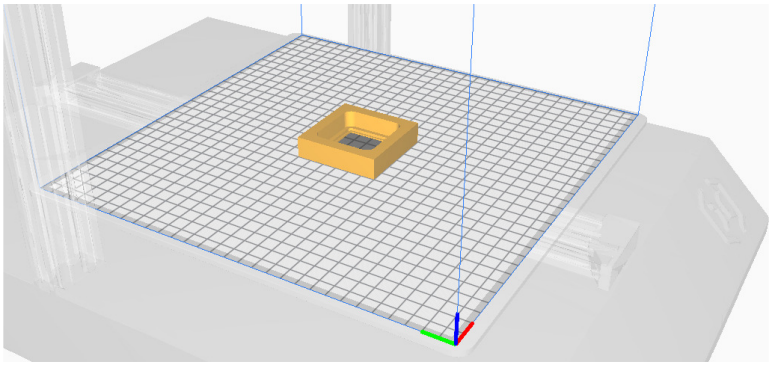
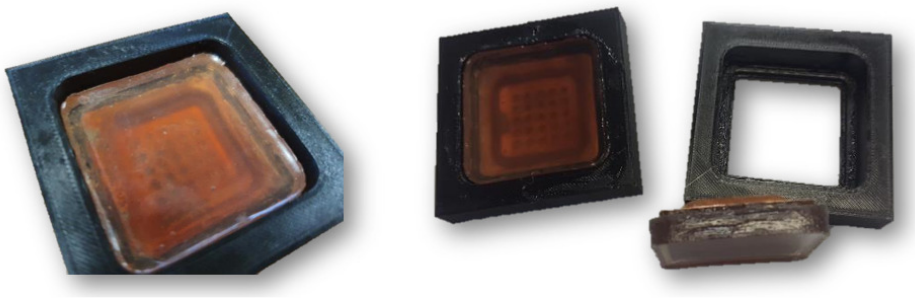


Fig. 5.31. Posición del molde diseñado sobre la placa de impresión.

Una vez fabricado molde, se realizó el proceso de moldeo con las resinas según las recomendaciones de sus fabricantes:

- Resina de poliéster: Resina y catalizador (componentes A y B) en proporción establecidas por el fabricante de 2 a 4% de endurecedor por cantidad de resina necesaria. Tras un proceso de curado de 48 horas, se procedió al desmoldeo de la pieza, obteniendo un excelente resultado.
- Masilla epoxi: componentes A y B en misma proporción según la recomendación del fabricante. Tras un proceso de curado de 30 minutos, se procedió al desmoldeo de la pieza, obteniendo también un excelente resultado.

La figura 5.32 muestra imágenes del uso del molde durante el proceso con la resina de poliéster.



(a) (b)

Fig. 5.32. Aplicación práctica del molde. (a) Pieza moldeada. (b) Pieza desmoldeada.

El molde resulto también de aplicación en los procesos de inspección realizados en el microscopio de medición, ya que facilitaba el posicionamiento y alineado de las cáscaras micro-electroconformadas.

Las figuras 5.33 y 5.34 muestran el resultado del proceso de generación de soporte con resina de poliéster y resina epoxi respectivamente.

(a) (b) (c)

Fig. 5.33. Cáscara desmoldeada. (a) Cara funcional. (b) Vista del espesor. (c) Cara no funcional.

(a) (b) (c)

Fig. 5.34 Cáscara desmoldeada. (a) Cara funcional. (b) Vista del espesor. (c) Cara no funcional.

5.4.1.2. Fabricación de soporte para el electrodo funcional.

Para asegurar la compatibilidad con el portaelectrodos EROWA ER-009222, se diseñó el soporte adoptando la misma forma geométrica del electrodo de grafito. También se utilizaron las mismas dimensiones de la sección de su zona de acople, para adaptarlas en la nueva mecha de acoplamiento. El resto de las dimensiones se desarrollaron en función de las necesidades geométricas y dimensionales del electrodo funcional. La figura 5.35 muestra el despiece del elemento desarrollado.

A diferencia del electrodo de grafito, homogéneo y compuesto por una sola pieza, el soporte debía adaptarse a la necesidad de alojar la cáscara electroconformada de cobre. Finalmente se diseñó un elemento desmontable formado por 4 piezas que se unen entre sí por fijación mecánica atornillada.

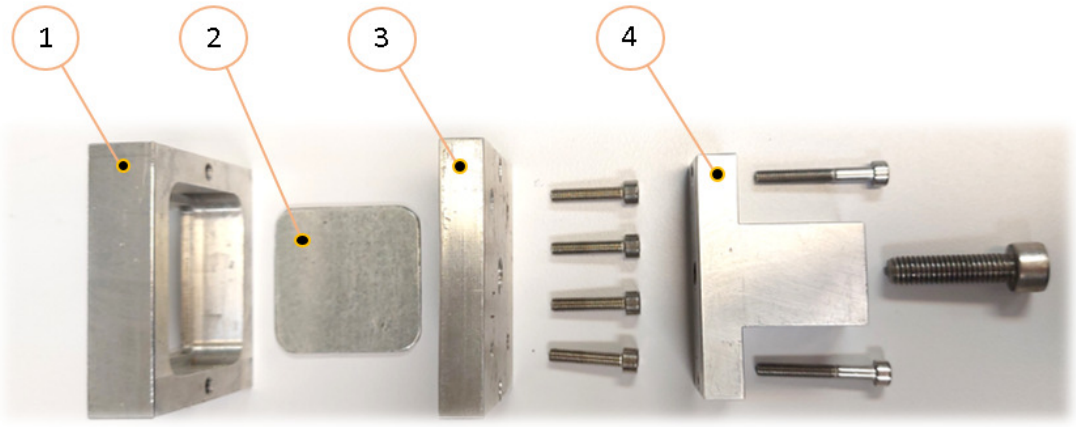


Fig. 5.35. Despiece del soporte para el electrodo funcional.

Id.	Elemento
1	Alojamiento
2	Placa de apriete
3	Separador
4	Mecha

A continuación, se describen los diferentes elementos que forman para del conjunto:

1. Alojamiento: se partió del mismo diseño utilizado para el útil porta cáscara descrito en el apartado anterior. Sus dimensiones exteriores al igual que aquel son 60mm x 60mm (largo x ancho). Se le proporcionó un espesor de 15mm, 3mm superior para absorber posibles irregularidades.
2. Placa de apriete: fabricada en 2mm de espesor tiene unas dimensiones exteriores de 40mm x 40mm (largo x ancho). Su función es el apriete del electrodo funcional para garantizar un correcto acoplamiento y alineado en el alojamiento, absorbiendo las irregularidades y distorsiones propias tanto del proceso de micro-electroconformado como del posterior moldeado con la resina de poliéster.
3. Separador: es una placa monolítica de sección cuadrada de dimensiones 60mm x 60mm x 10mm (largo x ancho x espesor) que dispone de los taladros roscados de M4 que guían los tornillos de nivelación de la placa de apriete.
4. Mecha: Es el elemento de transición entre el portaelectrodos y el electrodo funcional. Debe por un lado acoplar en el alojamiento del portaelectrodos y por el otro sujetar los elementos que forman el conjunto de la herramienta para el texturizado. Desarrollada en forma de T tiene unas dimensiones generales de 60mm x 25mm x 40mm (largo x ancho x alto). Dispone de un taladro central de Ø15mm con escalón roscado para el paso de un tornillo DIN912 M8x30mm que hace de ariete para el empuje de la placa de apriete.

La figura 5.36 muestra el modelado del conjunto, con todas las piezas en posición.

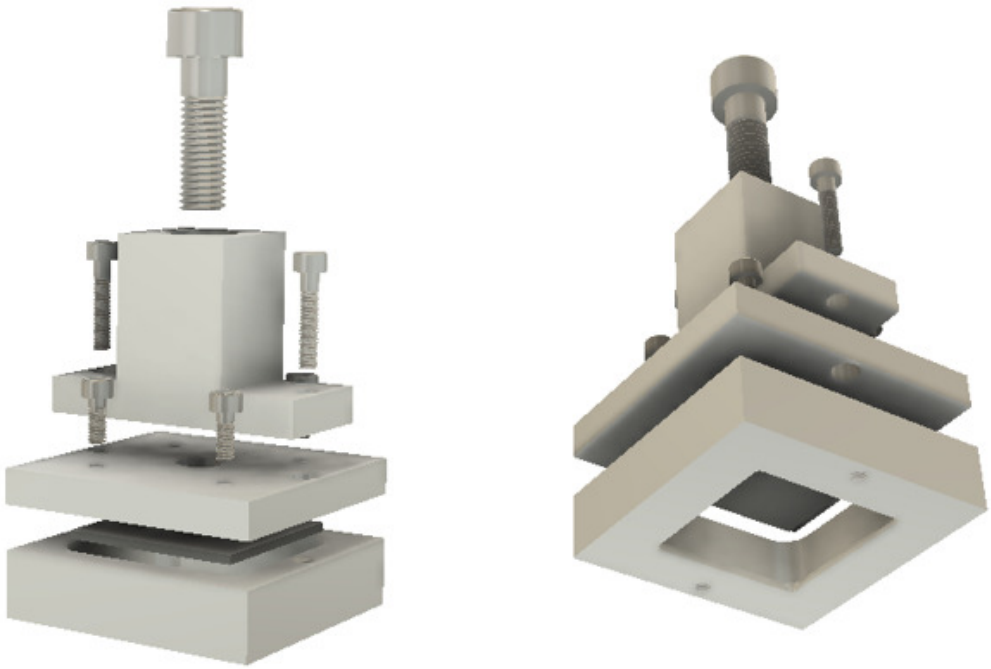


Fig. 5.36. Modelado del soporte para el electrodo funcional.

Para asegurar la conductividad eléctrica, todos los elementos se fabricaron en aluminio EN-AW5083 H111. Es una aleación de aluminio-magnesio (4% - 9%) que además contiene cromo y manganeso, aunque en menores proporciones. Esta aleación de aluminio es conocida coloquialmente como a*luminio marino*, en el sector de la conformación metálica por su elevada resistencia a la corrosión en ambientes agresivos. Su uso está recomendado para la industria naval, industria aeronáutica y automotriz, instalaciones industriales y en edificación en todas aquellas aplicaciones de instalaciones a la intemperie.

Sus propiedades físicas más relevantes son:

- Peso específico: 2,66 gr/cm^3
- Intervalo de fusión: 574 – 638 °C
- Modulo elástico: 71,000 N/m^2

- Resistividad eléctrica: 60nΩ·m
- Conductividad eléctrica: 16-19 MS/m
- Potencial de disolución: -0,86V
- Coeficiente de dilatación lineal: 23,8 x10^6/K
- Conductividad térmica: 117 W/mK

Todas las piezas se fabricaron en el taller de mecanizado de la Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por el Grupo de fabricación integrada de La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Se conformaron en un centro de mecanizado vertical de 3 ejes (Ibarmia Innovatek, ZVM-1000, Azkoitia, Gipuzkoa, España) que dispone de control numérico Fagor CNC 8065-M. La figura 5.37 muestra la máquina utilizada.

Fig. 5.37. Centro de mecanizado Ibarmia ZVM-1000.

La figura 5.38 muestra imágenes del resultado definitivo de la herramienta para proceso SEDM, con todos los componentes instalados, incluyendo la cáscara electro conformada, que será la responsable de mecanizar la textura matricial de 25 semiesferas de diámetro 1mm.

Fig. 5.38. Herramienta para el texturizado de superficies estructuradas finalizada.

5.5. RESULTADO EXPERIMENTAL DEL USO DE LA HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES CON PROCESO SEDM.

5.5.1. INTRODUCCIÓN.

Para evaluar las capacidades de la tecnología empleada, se ha podido testar la herramienta micro electroconformada en condiciones de trabajo reales. Para ello, se ha utilizado como electrodo en un proceso de electroerosión por penetración (SEDM), con el objetivo de generar texturizado superficial sobre una aleación de aluminio. Concretamente, se ha mecanizado la superficie de unas probetas de la aleación Al-Cu UNS A92024-T3. Esta aleación es de gran aplicación en la industria aeronáutica debido a su baja densidad, lo que aporta ligereza en la construcción de los elementos estructurales de los fuselajes de las aeronaves. Además, presenta un buen compromiso entre sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión, lo que la hace ideal para conformar los elementos más solicitados.

Esta parte del trabajo ha contado con la inestimable colaboración del grupo de Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la Universidad de Cádiz (UCA), que han sido los encargados de llevar a cabo los experimentos con la tecnología de electroerosión.

El objetivo de su línea de investigación es el estudio del comportamiento tribológico de la aleación Al-Cu UNS A92024-T3, previamente texturizada mediante tecnología SEDM. A través de ensayos de desgaste tipo pin-on-disc, realizados en presencia y en ausencia de lubricante, pretenden evaluar la influencia de la densidad de las texturas matriciales en el comportamiento de los parámetros de fricción. Además, las probetas serán sometidas a análisis de micro dureza en sección para determinar el efecto del proceso de texturizado, en la integridad metalúrgica del material.

5.5.1.1. Preparación de las probetas.

Las probetas utilizadas en el proceso experimental se generaron a partir de una plancha laminada de aleación Al-Cu UNS A92024-T3. Empleando un equipo de electroerosión por hilo (ONA AF25, ONA Electroerosión, S.A, Durango, España), las probetas se cortaron a una dimensión de 50mm x 50mm x 5mm. Estas dimensiones se establecieron para facilitar su manipulación, mecanizado y posterior análisis, tanto visual como funcional.

Las superficies posterior e inferior de las muestras se sometieron a un proceso de acondicionamiento del acabado superficial, mediante técnicas de preparación metalográfica. Para ello se utilizó una máquina pulidora de superficies (Tegrapol-15, Struers Inc, Ballerup, Ho, Denmark). El acondicionamiento superficial se realizó mediante un proceso de esmerilado fino, para garantizar un acabado homogéneo, uniforme y libre de deformaciones.

Se estableció un valor de rugosidad media aritmética (Ra) de 0,4µm para garantizar una homogeneidad del texturizado que sirviera de base para los ensayos posteriores de desgaste tipo pin-on-disc.

5.5.1.2. Texturizado de las muestras

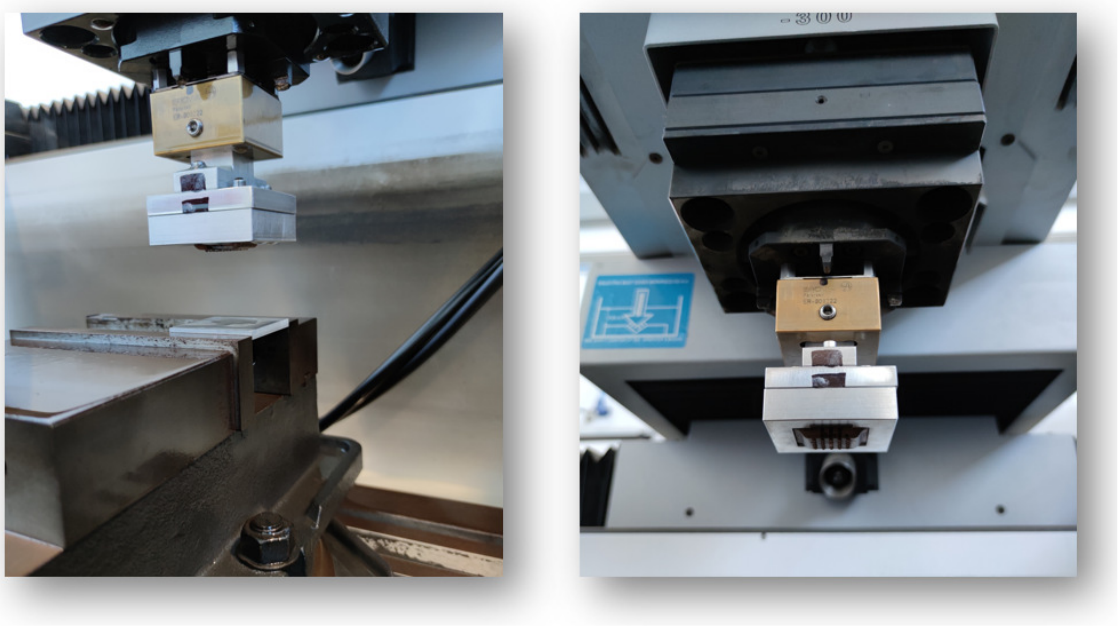
Las probetas de aluminio se sometieron a un proceso de texturizado superficial mediante una máquina de electroerosión por penetración (SEDM), para el que se empleó un equipo modelo (ONA NX3, ONA Electroerosión, S.A, Durango, España). La figura 5.39 muestra el equipo en condiciones de servicio.

Fig. 5.39. Máquina de electroerosión por penetración ONA NX3.

(imagen cedida por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

El equipo dispone del portaelectrodos EROWA ER-009222, ya comentado en el punto 5.4.1 de este mismo capítulo, diseñado por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación de la Universidad de Cádiz, que sirve para alojar un electrodo de grafito como elemento de desgaste. Para poder realizar las pruebas con la herramienta de cobre micro electroconformada, se realiza el acoplamiento del porta cáscara desarrollado durante el transcurso de esta tesis.

La figura 5.40 muestra imágenes del montaje de los elementos sobre la máquina de electroerosión en condiciones de servicio.



(a) (b)

Fig. 5.40. (a) Electrodo y probeta. (b) Cáscara, porta cáscara y porta electrodo.
(imágenes cedidas por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

El proceso de texturizado de las muestras se realizó a una profundidad de erosión de 0,25mm. Se realizaron tres ensayos en base a tres calidades superficiales a obtener. De esta manera se podían determinar las capacidades del electrodo en condiciones de acabado, acabado medio y desbaste.

El equipo de electroerosión ONA NX3 ofrece tablas tecnológicas en las que se incluyen diferentes parámetros de electroerosión por penetración, que dependen del material del electrodo, del material base y de la calidad superficial requerida.

Permite establecer el criterio de erosión en base a tres niveles:

- Criterio 1: mínimo desgaste
- Criterio 2: máximo arranque
- Criterio 3: homogeneidad

Para el proceso de texturizado de las muestras de aluminio mediante electrodos de cobre, se utilizó una tecnología de erosión propuesta en el catálogo de tablas tecnológicas del equipo ONA NX3, en base a criterio de mínimo desgaste, lo que aumenta la vida útil del electrodo. La tabla 5-17 muestra los parámetros de proceso.

Tabla 5-17. Parámetros EDM para aluminio mediante electrodo de cobre.

VDI (Norma VDI 3402)	R_a equivalente (µm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	T. impulso (µs)	T. Pausa (µs)	T. retroceso (s)	T. trabajo (s)	T. erosión (s)
0	0,10	1	-200	3,2	6,4	0,3	0,3	10800
27	2,2	5	200	13	6,4	0,3	0,4	2700
40	10	10	80	400	50	0,3	1,5	15

5.5.1.3. Resultados

Para evaluar la capacidad de la herramienta micro electroconformada de enfrentarse a operaciones de mecanizado en condiciones de trabajo real, se llevó a cabo una inspección visual y un pesaje tanto de las de las cáscaras como de las probetas electro erosionadas.

Desde el punto de vista geométrico se realizó una revisión del efecto del desgaste sobre el electrodo y una inspección de la calidad de la superficie erosionada. Para ello se utilizó un

microscopio estereoscópico (Nikon SMZ800, Nikon Corp., Tokio, Japón) equipado con cámara CCD con un aumento 20x. La figura 5.41. muestra una imagen del equipo. Este equipo pertenece al Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial de la Universidad de Cádiz.

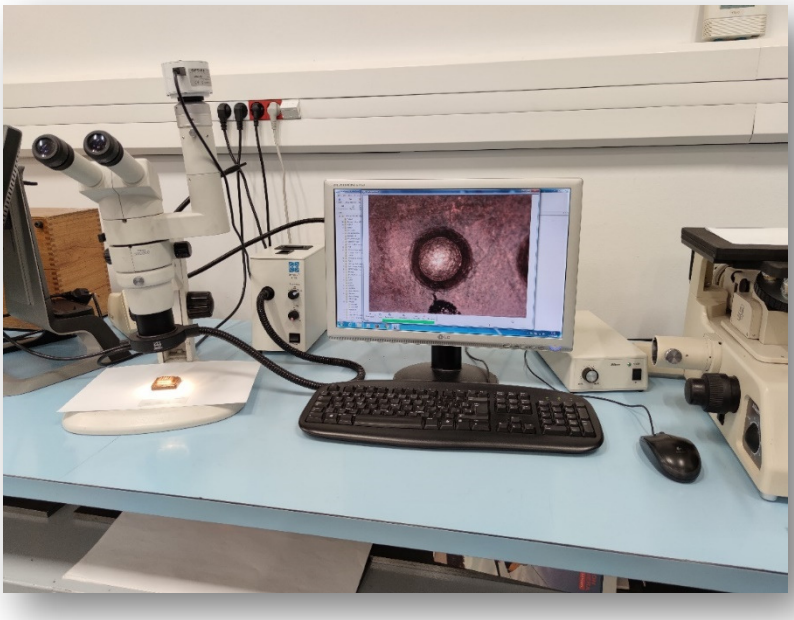


Fig. 5.41. Proceso de inspección de cáscara con microscopio Nikon SMZ800.

(imagen cedida por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

Se han estudiado las 3 primeras semiesferas de la cáscara situadas en la primera fila (1.1, 1.2 y 1.3) y sus correspondientes huellas erosionadas. La figura 5.42 muestra la geometría teórica de erosión y sus parámetros geométricos.

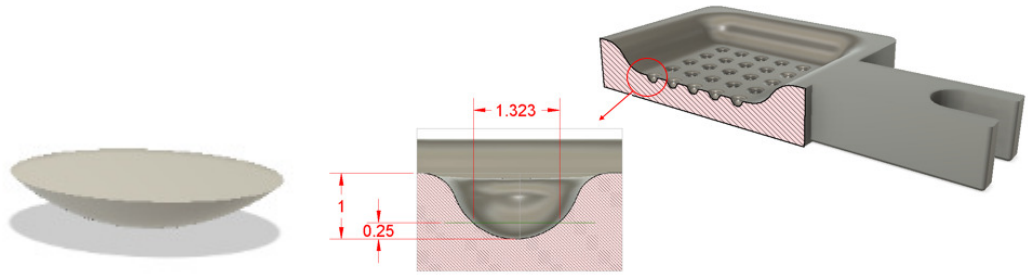
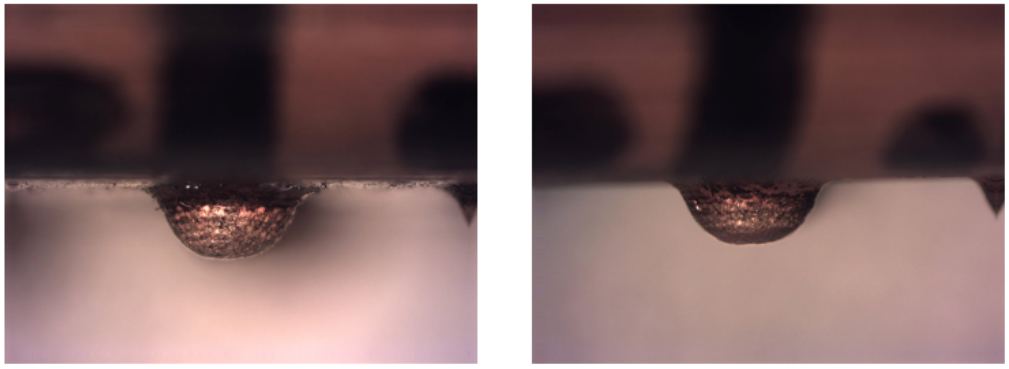


Fig. 5.42. Semiesfera teórica de erosión

La figura 5.43 muestra el resultado de los efectos de la erosión para el ensayo 1 con VDI 0. Se observa un buen comportamiento de la cáscara para condiciones de acabado. La geometría semiesférica sigue manteniendo su forma tras este primer proceso.

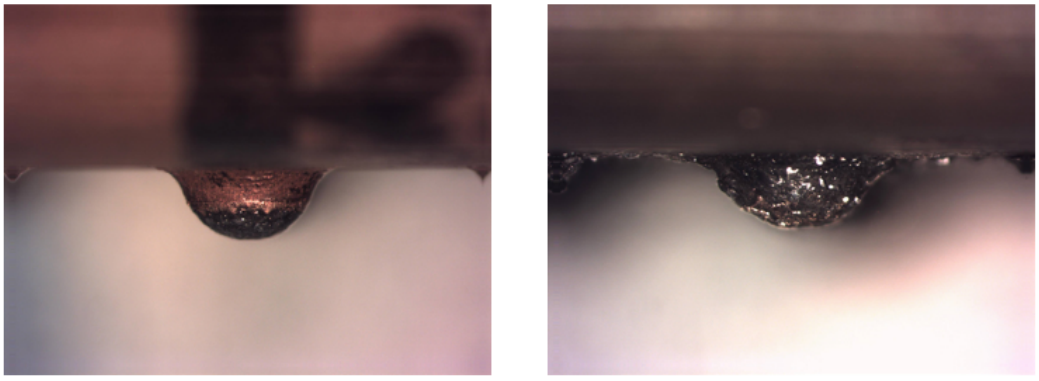


(a) (b)

Fig. 5.43. Semiesfera 1.1. (a) Antes de erosión. (b) Resultado tras la primera erosión.

La figura 5.44a muestra el resultado de los efectos de la erosión para el ensayo 2 con VDI 27. Se observa un buen comportamiento de la cáscara para condiciones de semi acabado. La geometría semiesférica pierde un poco de consistencia, pero sigue manteniendo su integridad. La zona alterada térmicamente alcanza aproximadamente un tercio de la altura de la semiesfera, lo que coincide aproximadamente con el valor de profundidad (0,25mm), utilizado como valor de consigna.

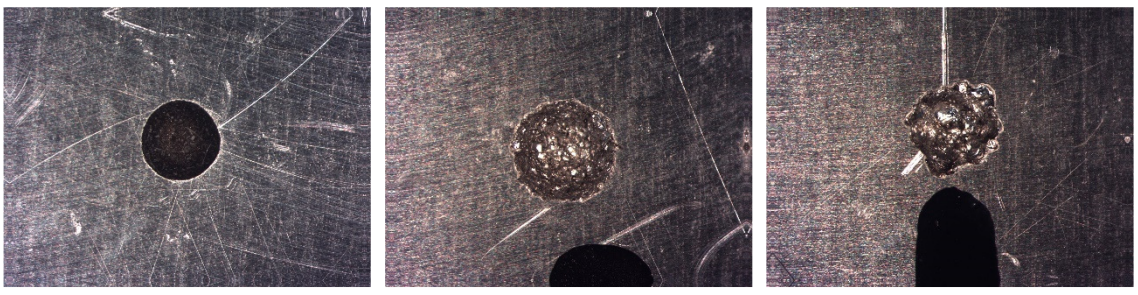
La figura 5.44b muestra el resultado de los efectos de la erosión para el ensayo 3 con VDI 40. Se observa una importante degradación de la cáscara bajo condiciones de desbaste. La geometría semiesférica pierde su integridad tras este tercer proceso y la zona alterada térmicamente alcanza la superficie de la pieza.



(a) (b)

Fig. 5.44. Semiesfera 1 de la cáscara funcional. (a) Ensayo 1. (b) Ensayo 2.

La figura 5.45 muestra el resultado de los efectos de la electroerosión sobre la probeta de aluminio para cada uno de los 3 ensayos. En concordancia con la afección que se produce en la cáscara, en condiciones de acabado se aprecia una buena definición de la geometría con un buen acabado en los bordes de la cavidad. A medida que se aumentan las solicitaciones del proceso de electroerosión sobre la cáscara se aprecia una merma de calidad en el resultado.



(a) (b) (c)

Fig. 5.45. Resultado de la electroerosión. (a) VD1 0. (b) VDI 27. (c) VDI 40.

Para completar el análisis se realiza un proceso de pesado de las probetas y las cáscaras para determinar el nivel de desgaste. Este proceso se ha realizado con una báscula de precisión (OHAUS Pioneer, OHAUS Europe GmbH, Nänikon, Suiza) que dispone de una resolución de 0,0001g. La figura 5.46 muestra una imagen del equipo utilizado.

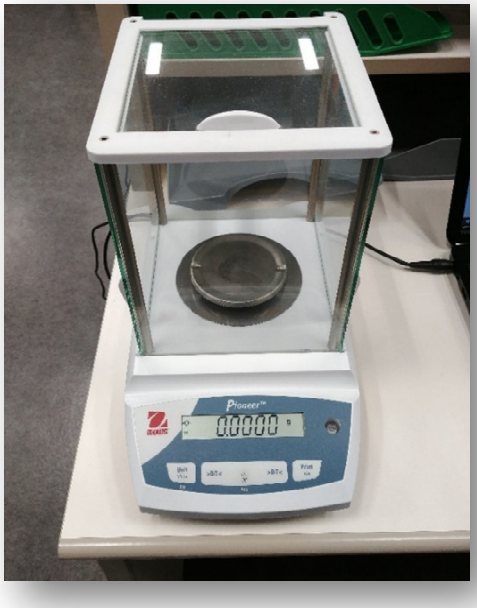


Fig. 5.46. Báscula de precisión Ohaus Pioneer.

(imagen cedida por el grupo de investigación en Ingeniería y Tecnología de Materiales y Fabricación (INTEMAFA) de la Universidad de Cádiz).

La tabla 5.18 muestra, en valores medios, el resultado del proceso de pesaje. La toma de datos se realizó antes y después de cada uno de los ensayos. La diferencia de valores representa la disminución de masa, como referencia para establecer el nivel de desgaste. Debe tenerse en cuenta que este modelo de comparación resulta válido sólo a efectos referenciales. Los fenómenos de adherencia de partículas de aluminio electro erosionadas y de absorción de fluido dieléctrico sobre la cáscara de cobre, implican ganancias complementarias de masa, que resultan muy difíciles de evaluar, y por tanto de compensar.

Tabla 5-18. Valores medios de masa (cobre Vs aluminio).

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Electrodo	Probeta	Electrodo	Probeta	Electrodo	Probeta
Antes	30.9338g	33.4904g	30.9556g	33.2745g	30.9557g	33.4302g
Después	30.9556g	33.4763g	30.9557g	33.2461g	30.9558g	33.4164g
Diferencia	0.0218g	-0.0141g	0.0001g	-0.0284g	0.0001g	-0.0138g

Tras la realización del ensayo 1, se genera un incremento de masa en la cáscara electroconformada. La absorción de líquido dieléctrico, tras el proceso de electroerosión, debido a la porosidad del cobre es superior a la pérdida de material por desgaste, por lo que no se puede hacer una estimación de ese desgaste en términos de masa. No obstante, contrastando con los resultados de la inspección visual, se puede interpretar que hay muy poco desgaste y que, por tanto, el electrodo muestra un buen comportamiento para el trabajo de la superficie con VDI bajo.

Tras los ensayos 2 y 3 no se aprecia apenas variación en la masa, lo que no se corresponde con lo observado en la inspección visual, sobre todo para el ensayo 3. Esta diferencia se explica en base a la ganancia de masa, que se produce por la adherencia de partículas de aluminio arrancadas del material base, durante el proceso de electroerosión. Ha esto debemos añadir una absorción de fluido dieléctrico, derivada de una mayor porosidad de la superficie del electrodo, a medida que este recibe mayor número de descargas.

La probeta de aleación de Al-Cu por su parte, ha sufrido una disminución de masa de 0,0141g en el primer ensayo, y una disminución de 0,0284g en el segundo mostrando una evolución lógica, debido a condiciones más exigentes del segundo proceso de electroerosión. Sin embargo, esta evolución se invierte en el ensayo 3, resultado de una capacidad de mecanizado inferior por excesivo desgaste de la herramienta.

Tomando como referencia un valor de densidad 2,78g/cm^3 para esta aleación, se puede establecer una comparativa entre el desgaste teórico y el desgaste real de la pieza. Para ello, es necesario realizar el cálculo del volumen teórico de la geometría de desgaste. En base a la profundidad de erosión de consigna (0,25mm) y con la ayuda de una herramienta CAD, se

establece el volumen teórico del paraboloide de desgaste (0,18mm^3). La tabla 5-19 muestra el resultado del cálculo.

Tabla 5-19. Parámetros teóricos de la geometría de erosión

Profundidad	diámetro	Volumen	Densidad	Masa
0,25mm	1,3229mm	0,18mm^3	2,78 g/cm^3	5,04x10^{-4} g

La tabla 5-20 muestra la comparativa entre las masas de desgaste teóricas de cálculo, en base a la geometría de los 25 paraboloides de desgaste que conforman la superficie funcional, y la masa real obtenida tras el proceso de medición. La figura 5.47 muestra de forma gráfica el resultado de la comparación.

Tabla 5-20. Comparativa de masas de desgaste.

Comparativa	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Masa teórica de desgaste	0.0125g	0.0125g	0.0125g
Masa real de desgaste	0.0141g	0.0284g	0.0138g
Diferencia	-0.0016	-0.0159	-0.0013

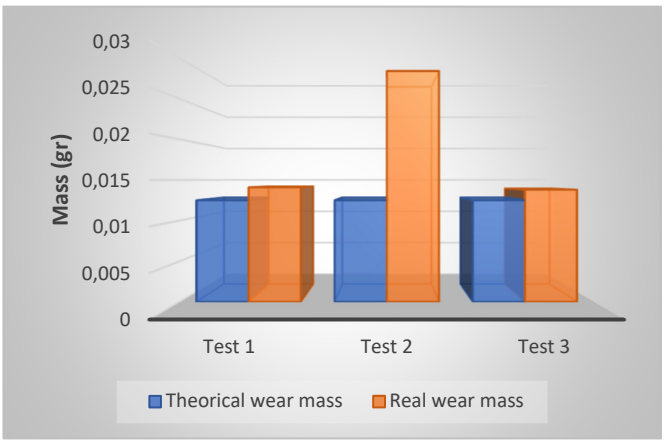
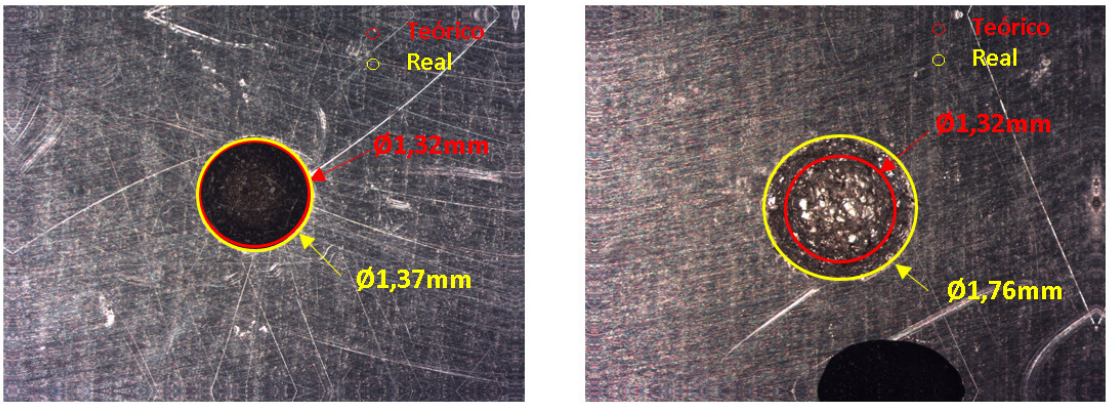


Fig. 5.47. Comparativa de la masa de desgaste

Como resultado del ensayo 1 se aprecian valores de desgaste muy similares a los esperados de forma teórica. Tal y como se aprecia en la figura 20a, la buena reproducción de la geometría avala este resultado. El valor del diámetro de la huella teórica (Ø1,32mm) es muy similar al de la huella electro erosionada (Ø1,37mm), la diferencia es de aproximadamente 50µm.

El ensayo 2 refleja diferencias importantes. La masa de desgaste es superior al doble de la masa teórica. Bajo estas condiciones la erosión ha superado los límites de la geometría pretendida. La cáscara mantiene su integridad, pero pierde exactitud dimensional en su capacidad de reproducción. La figura 21b muestra la comparativa entre el diámetro pretendido y el diámetro conseguido. La diferencia en este alcanza las 440µm.

En el ensayo 3 la comparativa entre masa de desgaste teórica y masa de desgate real vuelve a acercarse, pero este resultado no aporta valor. La rápida degradación del electrodo no permite realizar una erosión de calidad y por tanto la similitud de los valores de masa resulta anecdótica.



(a) (b)

Fig. 5.48. Comparación geométrica. (a) VDI 0 (b) VDI 27

5.5.1.4. Comparativa con electrodo de grafito.

El grafito es el material más comúnmente utilizado en la conformación de electrodos para proceso SEDM. Entre sus principales ventajas se encuentran su fácil mecanizado y su buena relación prestaciones-precio. Presenta una excelente resistencia mecánica, bajo coeficiente de dilatación térmica, buena conductividad eléctrica y alta durabilidad, generando acabados de gran exactitud dimensional y calidad superficial.

Con respecto al cobre, el grafito para SEDM puede resultar en torno a un 25% más barato, y tanto su densidad como su tiempo de mecanizado resultan 5 veces inferiores a su homólogo de cobre. Habitualmente el electrodo de grafito se trabaja con procesos de mecanizado convencionales mediante fresadoras o centros de mecanizado.

Para establecer una comparativa entre el electrodo de cobre electro conformado y el electrodo de grafito, se decidió realizar dos ensayos sobre probetas de la misma aleación de Al-Cu bajo las mismas condiciones experimentales. En este caso se realizaron sólo en condiciones de buen acabado (VDI 0) y acabado medio (VDI 27), contexto en las que el electrodo de cobre mostró solvencia.

Para el mecanizado de las muestras de aluminio mediante electrodo de grafito, se utilizó una textura piramidal cuadrangular de lado 0.5mm, distribuidas a lo largo de toda la superficie funcional de $50mm^2$ x $50mm^2$. Se utilizó la misma tecnología de erosión propuesta en el catálogo de tablas tecnológicas del equipo ONA NX3 en base a criterio de mínimo desgaste. La tabla 5-21 muestra los parámetros de operación utilizados.

Tabla 5-21. Parámetros EDM para aluminio con electrodo de grafito.

VDI (Norma VDI 3402)	R_a equivalente (µm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	T. impulso (µs)	T. Pausa (µs)	T. retroceso (s)	T. trabajo (s)	T. erosión (s)
0	0,10	1	-200	3,2	6,4	0,3	0,3	10560
27	2,2	5	200	13	6,4	0,3	0,4	1320

Al igual que se hizo con el cobre, se llevó a cabo una inspección visual y un pesaje tanto del electrodo de grafito como de las probetas electro erosionadas antes y después de cada ensayo.

La figura 5.49b muestra el resultado de los efectos de la erosión para el ensayo 1 con VDI 0, donde se observa una sustancial degradación de la geometría piramidal. La geometría ha quedado redondeada perdiendo todas sus aristas.

(a) (b)

Fig. 5.49. Textura piramidal. (a) Antes de la erosión. (b) Resultado tras el ensayo 1.

A continuación, la figura 5.50 muestra el resultado de los efectos de la erosión para el ensayo 2 con VDI 27. Se observa un buen comportamiento de la cáscara para condiciones de semi acabado sobre la pieza a erosionar. Apenas se aprecia incremento del desgaste. Una vez desgastadas las aristas y suavizadas durante el primer ensayo, mantienen su integridad en el segundo.

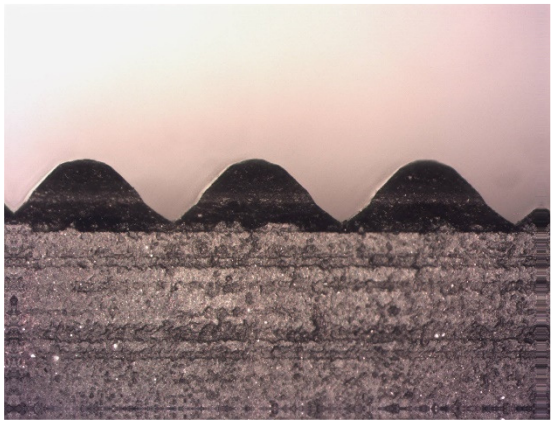
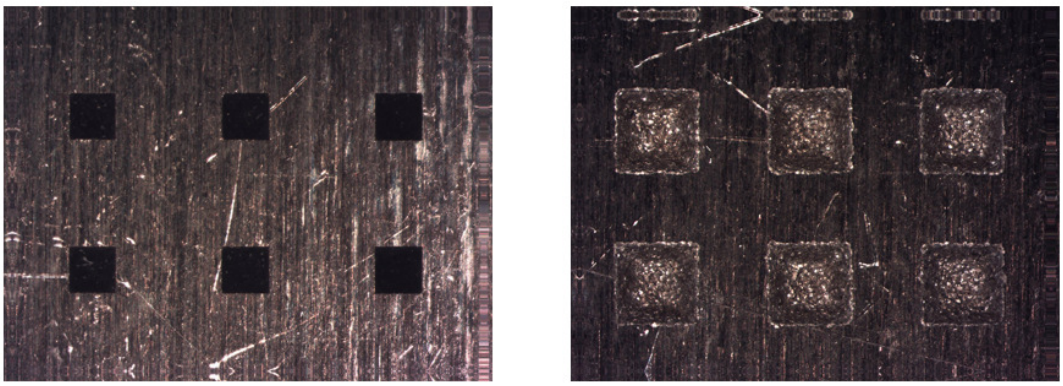


Fig. 5.50. Textura piramidal. Resultado tras el ensayo 2.

La figura 5.51 muestra imágenes del resultado de los efectos de la electroerosión sobre la probeta de aluminio, para cada uno de los 2 ensayos. En condiciones de acabado se aprecia una buena definición de la geometría y sus aristas. Sin embargo, en condiciones de acabado medio el resultado muestra una pobre definición de las aristas.



(a) (b)

Fig. 5.51. Resultado de la electroerosión. (a) VD1 0. (b) VDI 27.

La tabla 5.22 muestra, en valores medios, el resultado del proceso de pesaje antes y después de cada uno de los ensayos. La ganancia de masa del electrodo en el primero de ellos es relevante. La mayor porosidad del material, la mayor superficie atacada y una mayor tasa de

eliminación de material, parece contrarrestar los fenómenos de absorción de fluido dieléctrico y de adhesión de partículas de la aleación descritos anteriormente.

Tabla 5-22. Valores medios de masa (grafito Vs aluminio).

	Ensayo 1		Ensayo 2	
	Electrodo	Probeta	Electrodo	Probeta
Antes	65,1281g	33,0967g	66,4527g	33,4105g
Después	66,4527g	33,0748g	66,4520g	33,1705g
Diferencia	1,3246g	-0,0219g	-0,0007g	-0,2401g

Tomando como referencia un valor de densidad 2,25g/cm^3 para el grafito, se puede establecer una comparativa entre el desgaste teórico y el desgaste real de la pieza. Para ello es necesario realizar el cálculo del volumen teórico de la geometría de desgaste. En base a la profundidad de erosión de consigna (0,25mm) y con la ayuda de una herramienta CAD se establece el volumen teórico de la pirámide de desgaste (0,021mm^3). La figura 5.52 muestra la geometría teórica de erosión y sus parámetros geométricos.

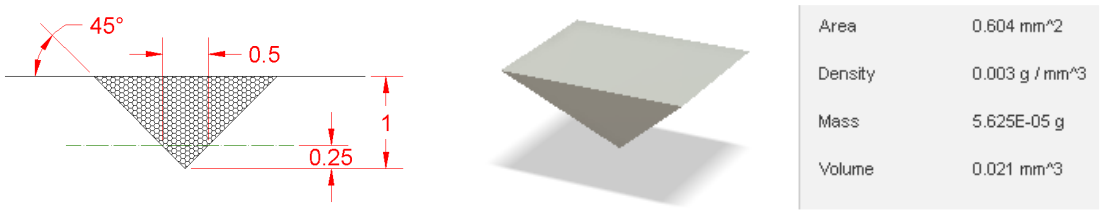


Fig. 5.52. Pirámide teórica de erosión.

La tabla 5-23 muestra la comparativa entre las masas de desgaste teóricas de cálculo, en base a la geometría de los 625 paraboloides de desgaste que conforman la superficie funcional, y la masa real obtenida tras el proceso de medición. Como resultado se aprecian valores de desgaste prácticamente iguales en condiciones de acabado fino y con grandes diferencias en condiciones de acabado medio, donde el desgaste real supera con creces al teórico.

Tabla 5-23. Comparativa de masas de desgaste.

	Ensayo 1	Ensayo 2
Masa teórica de desgaste	0,0295g	0,0295g
Masa real de desgaste	0,0219g	0,2401g
Diferencia	0,0076	-0,2106

Con respecto al electrodo de cobre, la capacidad de eliminar material del electrodo de grafito es manifiestamente superior para condiciones de acabado medio. Sin embargo, en condiciones de acabado fino los resultados relativos se muestran bastante similares, tanto en definición como en capacidad de erosión.

5.6. CONCLUSIONES

De forma general, la cáscara ha presentado muy buen comportamiento para procesos de acabado con VDI bajos en base a criterios para mínimo desgaste. Para VDIs medios y altos el acabado de las probetas no resulta tan bueno y el electrodo se deteriora rápidamente. No obstante, esto último, forma parte de los resultados esperados, pues ocurre igualmente para electrodos de cobre convencionales sin textura funcional.

Los resultados para condiciones de acabado muestran un comportamiento muy competitivo frente al electrodo de grafito. Teniendo en cuenta las dificultades e incluso incapacidad de este último para reproducir geometrías redondeadas a escalas submilimétricas el electrodo de cobre electro conformado se muestra como una gran alternativa.

Desde el punto de vista tecnológico la cáscara micro-electroconformada ha mostrado buenas capacidades de reproducción y se ha mostrado válida para afrontar trabajos de texturizado en aplicaciones de acabado a nivel industrial.

La metodología AMSME utilizada para su fabricación y por extensión el equipo desarrollado con el que se ha afrontado la fase de fabricación ha resultado validado.

El texturizado de superficies con electrodo de cobre electroconformado se presenta como una alternativa a electrodos de otros materiales para trabajos a escala microscópica, donde el mecanizado de estos últimos es difícil o imposible.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6. Conclusiones y líneas de trabajos futuras.

6.1. CONCLUSIONES.

6.1.1. COMBINACIÓN DE DIFERENTES PROCESOS DE FABRICACIÓN.

El planteamiento inicial establecía, como parámetro de partida, la necesidad de combinar dos técnicas de fabricación totalmente diferentes, tanto en características como en materiales con los que se trabaja. Por un lado, el proceso de fabricación aditiva DLP, vinculado a la generación de productos en base a materiales poliméricos, y por otro lado el electroconformado vinculado a la generación de piezas metálicas. No obstante, ambos procesos comparten la capacidad para la reproducción de detalles a escalas micrométricas y la larga duración del proceso de fabricación.

Debía aprovecharse la capacidad de fabricación del proceso DLP para reproducir, a bajo coste, piezas con detalles a escala micrométrica y la capacidad del proceso de electroconformado para reproducir esos detalles, generando una pieza metálica, que pudiera utilizarse posteriormente como herramienta en el proceso SEDM.

En base a este objetivo se realizaron estudios experimentales de compatibilidad que consiguieron, no sólo combinar estas dos técnicas de fabricación, sino que añadieron otras dos al procedimiento combinado. El proceso de pulverización catódica y moldeo de resina, completaron la lista de procesos necesarios.

Los diferentes ensayos permitieron establecer una secuencia de trabajo óptimo para cumplir con las solicitaciones de diseño.

La materialización de la herramienta y su posterior utilización con éxito como electrodo en el proceso de electroerosión por penetración (SEDM) ha quedado contrastada. Los buenos resultados para condiciones de acabado, con criterio de mínimo desgaste, en el texturizado de la superficie de la aleación de aluminio Al-Cu UNS A92024-T3 de uso aeronáutico, permiten ser optimistas en su uso a nivel industrial.

El proceso combinado: fabricación aditiva, sputtering y micro-electroformado, denominado AMSME como contribución de esta investigación, ha demostrado un gran potencial en la conformación de superficies funcionales para su uso como electrodos en SEDM.

El proceso SLA/DLP permite obtener modelos funcionales de gran calidad en la reproducción de detalles con tecnología de bajo coste, superando así una de las principales limitaciones de la fabricación de estos electrodos, desde el punto de vista económico.

El proceso de metalizado se muestra fiable y tecnológicamente compatible para conseguir la conductividad en las superficies activas. La nube de proyección catódica garantiza el correcto recubrimiento de toda la superficie.

El equipo desarrollado para las operaciones de micro-electroconformado, se ha mostrado eficaz para la generación de cáscaras de cobre. Su versatilidad y capacidad para adaptarse a las necesidades del proceso de deposición a escala micrométrica, alcanzando espesores óptimos para su posterior utilización en configuraciones de operaciones acabado y semi desbaste en el proceso de µSEDM, ha resultado validado.

6.1.2. DISEÑO Y DESARROLLO DEL EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO.

En relación con el primero de los objetivos planteados para el desarrollo de esta tesis, se ha llevado a cabo el diseño del equipo y de todos sus componentes. Se ha hecho un análisis y

evaluación del equipamiento disponible, se ha utilizado y adaptado a las necesidades de las piezas a fabricar, aquel que se ha considerado válido.

Se han diseñado, desarrollado y fabricado diferentes elementos destinados a la mejora operativa y funcional del equipo, como, por ejemplo: elementos específicos para la sujeción de las piezas en el interior del baño electrolítico, elementos para la sujeción de componentes del sistema de agitación, y elementos para la distribución del flujo de agitación dentro del baño.

Se ha diseñado, desarrollado y fabricado un dispositivo de control automático de agitación del baño electrolítico (DCAB), con dos modos de trabajo, manual o automático, para la mejora de las condiciones del proceso de micro-electroconformado.

Se ha implementado un sistema de seguimiento por videovigilancia, con aplicación para smartphone, que permite revisar audiovisualmente el proceso en tiempo real, pudiendo hacer capturas de imágenes y/o revisión posterior por video, de las diferentes fases del experimento.

Las conclusiones que se pueden obtener tras la fase de pruebas y posterior desarrollo de los múltiples experimentos son las siguientes:

- El equipo se muestra válido para la fabricación de piezas por micro-electroconformado.
- La diversidad de modos de operación, permiten al investigador adaptarlo a las necesidades de sus ensayos.
- El almacenamiento de datos procedentes del experimento, permiten retroalimentar el proceso en búsqueda de su mejora y optimización.
- La facilidad de manipulación de todos los componentes no necesita de una alta cualificación para su uso.

- Todos los elementos son fácilmente desplazables y almacenables, no contando con uniones físicas que imposibiliten su manipulación individual para tareas de mantenimiento o limpieza.
- La base del equipo, compuesta por elementos de bajo coste, permite su reproducción en otros laboratorios. De esta manera otros investigadores podrán ampliar o continuar líneas de trabajo en el campo del micro-electroconformado.

6.1.3. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL EQUIPO DE MICRO-ELECTROCONFORMADO.

En relación con el segundo de los objetivos descritos en el capítulo 1, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las diferentes programaciones de los parámetros eléctricos utilizadas en el desarrollo de los experimentos, han conseguido resultados con variaciones notables en la fabricación de las cáscaras micro-electroconformadas. Se ha observado cambios relevantes en el acabado superficial y en el espesor de las piezas generadas.
- Los experimentos realizados con y sin sistema de agitación, han generado diferencias que son apreciables con una simple inspección visual. El suavizado que se produce en la generación de detalles y en el acabado superficial de las piezas ha quedado sobradamente contrastado.
- La toma de lecturas de la evolución de los parámetros eléctricos, durante el desarrollo de la micro-electrodeposición, muestra el comportamiento del proceso. Su análisis ha permitido hacer modificaciones en ensayos posteriores, que han resultado en una mejora de las piezas.
- La interacción entre el operador y el equipo es sencilla y funcional. El modo de trabajo automático permite la total autonomía del proceso durante la deposición.

- El procedimiento de trabajo generado permite mantener las condiciones de repetitividad, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

6.1.4. FABRICACIÓN DE LOS MODELOS FUNCIONALES.

Si bien no era objeto de esta tesis doctoral el diseño y desarrollo de las geometrías funcionales, si que ha sido necesario la adaptación del modelo funcional que contiene esas geometrías, para conseguir una correcta compatibilidad operativa con el equipo de micro-electroconformado, hasta el punto de que se podría considerar un componente más de este. Durante el desarrollo de los experimentos se fue modificando el modelo funcional hasta conseguir el modelo definitivo. Una vez finalizado el proceso de evolución y en base a la experiencia en su uso se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo funcional Evo2 se ha mostrado robusto, fiable y de fácil manipulación desde el punto de vista de su conexión con el equipo.
- El sistema de protección combinado, utilizado para evitar la deposición no deseada fuera de las áreas de interés, ha resultado funcionalmente válido.
- La resina utilizada para su fabricación se ha mostrado estable a lo largo de los experimentos, permitiendo ciclos de uso superiores a 10 repeticiones.
- La tecnología de fabricación aditiva SLA/DLP empleada, con una máquina de bajo coste, combinada con la pulverización catódica, ha resultado un método solvente para la preparación de los modelos funcionales.
- Una vez contrastada la validez del modelo funcional, cualquier cambio de geometría es fácilmente incorporable sobre el área disponible.

6.1.5. FABRICACIÓN DE HERRAMIENTA PARA EL TEXTURIZADO DE SUPERFICIES ESTRUCTURADAS.

Los buenos resultados en la fabricación de las cáscaras micro-electroconformadas, permitió acometer la fabricación de un prototipo de herramienta para el proceso SEDM. Se diseñó y desarrolló el prototipo en base a las necesidades de acoplamiento del portaelectrodo EROWA ER-009222 y las necesidades de alojamiento de la cáscara micro-electroconformada.

En base a los resultados de los experimentos llevados a cabo por el equipo de investigación de la Universidad de Cádiz, en aplicación de la herramienta como electrodo para la máquina de electroerosión ONA NX3, se puede concluir que el diseño resultó valido para ejercer su función, resultando operativo para su uso en el proceso SEDM.

6.1.6. MEDICIÓN DE LAS PIEZAS OBTENIDAS.

Para establecer puntos de comparación con los que poder valorar los resultados obtenidos, mas allá de la inspección visual, se planteó como objetivo establecer un proceso de medición de las piezas obtenidas. Se ha desarrollado un protocolo de medición de las piezas para las áreas metrológicas de masa y dimensión.

Aprovechando el equipamiento disponible en el Servicio de Metrología y Calibración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y llevando a cabo protocolos de medición similares a los realizados por este servicio, ha sido posible la medición dimensional y de masa de las cáscaras micro-electroconformadas. En base a este procedimiento se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Tanto la medición de masa como de espesor de las diferentes piezas, ha permitido establecer un punto de comparación físico, de gran ayuda en el desarrollo de los experimentos.
- Los cambios realizados en las condiciones de los experimentos se han visto reflejadas en cambios en la masa y el espesor de las piezas. La toma de lecturas respalda, por tanto, los resultados experimentales.
- Las mediciones realizadas al microscopio han permitido establecer la validez de las reproducciones de los detalles a escala microscópica. A modo de ejemplo, se han podido tomar lecturas de las dimensiones de los diámetros de los anillos de las diferentes capas, que conforman las cavidades semiesféricas del patrón funcional. Se han obtenido lecturas con un orden de magnitud de decenas de micra.
- El diseño del mapa de puntos de medición ha permitido una toma de datos exhaustiva, cuyo posterior análisis permite establecer una cartografía de la superficie de las piezas. Esta información es muy relevante para entender el nivel de uniformidad de la capa depositada.
- El desarrollo y fabricación del útil de medición, para determinar el espesor de los fondos de las cavidades semiesféricas, ha permitido igualmente, entender el nivel de uniformidad de la capa depositada en esas zonas.

6.1.7. DIFERENTES RESULTADOS APORTADOS POR LOS ENSAYOS.

Durante la realización de los diferentes ensayos, los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- La aparición de diferencias de calidad superficial y diferencias de espesor durante el desarrollo de experimentos, donde el cátodo se posicionó en zonas cercanas a las paredes

del tanque, plantea la existencia de un posible efecto rebote, generado por las corrientes de agitación del baño electrolítico, que se presenta en forma de estratificación.

- La aplicación de intensidades de corriente menores a las recomendadas por la bibliografía consultada, mejoraron los resultados de reproducción de los detalles a escala micrométrica.
- La utilización de ciclos alternados de intensidad y tensión, con valores prefijados, mejora considerablemente la calidad de las piezas finalizadas.
- La revisión de la toma de lecturas de los parámetros eléctricos del proceso de micro-electroconformado es muy relevante para la mejora continua del proceso. Las correcciones realizadas en base a esos valores permitieron optimizar los ciclos de trabajos y mejoraron la calidad de las piezas.
- La aplicación de valores de intensidad de 900mA en la última etapa del ciclo de trabajo, generó buenos resultados de crecimiento. Se pudo estimar que el espesor depositado aumentaba aproximadamente un 20% por cada hora de trabajo. En una misma pieza se consiguieron valores máximos de 2522µm. y valores promedios de 1590µm con acabado funcional completo de la pieza.

6.2. TRABAJOS FUTUROS.

El equipo desarrollado durante el trascurso de esta tesis doctoral es una herramienta para el estudio experimental en el ámbito de los procesos de electro conformado, que abre un extenso abanico para trabajos futuros. La mirada hacia adelante no solo se plantea desde el punto de vista de la investigación, sino como herramienta al servicio de la docencia para el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, desde el que se establecieron las bases para el desarrollo de este trabajo.

En base a lo anteriormente expuesto se proponen líneas de continuidad, alguna de las cuales ya se han iniciado, como complemento a la presente tesis:

- Desarrollo de una evolución del conjunto de soporte del cátodo, para el alojamiento de más de una pieza a modo de doble cabezal. Permitiría establecer una línea de estudio experimental sobre la fabricación de múltiples piezas por micro-electroconformado a la misma vez.

- Desarrollo de una evolución del conjunto de soporte del cátodo, con un nuevo diseño de mecha de sección circular. Permitiría establecer una línea de estudio experimental sobre la conformación de piezas con detalles a escala micrométrica en más de una cara funcional.

- Desarrollo e implementación de un sistema electromecánico de orientación catódica, que permita modificar la posición relativa de los modelos funcionales respecto del ánodo. En base a líneas de investigaciones anteriores llevadas a cabo por el grupo de Investigación de Procesos de Fabricación de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria [91], con el uso de un sistema automático de orientación catódica, se obtienen mejoras significativas en términos de uniformidad de espesor, para la obtención de piezas con más de una cara funcional, respecto a la electrodeposición en estático. Teniendo en cuenta que el equipo ya cuenta con un Arduino nano con salidas y entradas de control disponibles, es factible implementar un servomotor que genere movimiento de rotación de los modelos funcionales, pudiendo controlar velocidad y sentido de giro.

- Continuación del estudio experimental de la influencia de diferentes patrones de geometrías funcionales con detalles a escala micrométrica en el proceso de electro conformado.

- Continuación del desarrollo de la programación del controlador de la bomba con diferentes ciclos de trabajo. Permitir una introducción paramétrica de los valores de control para diferentes configuraciones de ensayos.

- Continuación del desarrollo de la etapa de filtrado, con control automático del ciclo. Teniendo en cuenta que el controlador de la bomba dispone de una salida de potencia libre, se puede utilizar para el control de la bomba de filtrado, en base a las necesidades de los diferentes experimentos. Permitiría establecer una línea de estudio experimental de la influencia de la renovación del baño en la fabricación de las piezas funcionales con detalles a escala micrométrica.

- Continuación con el desarrollo de la programación del instrumento de potencia y medición (*KEITHLEY 2460 sourcemeter®)*. Establecer un sistema de programación paramétrico, que permita el estudio experimental de la influencia de la variación de los parámetros eléctricos, en la calidad de las piezas funcionales, incluyendo el estudio con el uso de corrientes pulsadas.

- Desarrollo de un estudio experimental de la influencia de los parámetros geométricos entre cátodo y ánodo para la conformación de piezas por micro-electroconformado, en base a las capacidades que ofrece el equipo de modificar distancia y orientación en los ejes Y-Z.
- Desarrollo de un estudio experimental de la influencia de la disposición de la pieza respecto a las paredes del tanque en condiciones de agitación del baño, estableciendo las consecuencias del efecto rebote o efecto mampara.

- Desarrollo de un estudio experimental de la influencia de la modificación de los parámetros químicos del baño electrolítico en la conformación de piezas por micro-electroconformado. Permitiría establecer diferencias y evaluar diversas soluciones electrolíticas de distintos fabricantes, o mismas soluciones con diversos aditivos: abrillantadores, niveladores, modificadores de estructura, etc. Pudiéndose delimitar, entre otros, el número de repeticiones hasta el agotamiento del baño, o las variaciones en el nivel de PH.

- Aprovechar las capacidades del equipo desde el punto de vista docente. Desarrollar una línea de trabajo para implementar la técnica del electroconformado en el programa de prácticas de laboratorio, de aquellas materias con contenidos programáticos afines, o incluso en Trabajos de Fin de Título de las diferentes titulaciones que incluyen esas materias en sus planes de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

B.1. BIBLIOGRAFÍA.

1. Bhushan, B.; Ko, P.L. Introduction to Tribology. *Appl. Mech. Rev*. **2003**, 56(1), B6-B7, doi: 10.1115/1.1523360.
2. Hamilton, D.B.; Walowit, J.A.; Allen, C.M. A Theory of Lubrication by Microirregularities. J. Basic Eng. 1966, 88, 177–185, doi:10.1115/1.3645799.
3. Evans, C.J.; Bryan, J.B. "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces. *CIRP Ann.* **1999**, *48*, 541–556, doi:10.1016/S0007-8506(07)63233-8.
4. Ibatan, T.; Uddin, M.; Chowdhury, M.A.K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. *Surf. Coat. Technol.* **2015**, *272*, doi:10.1016/j.surfcoat.2015.04.017.
5. Sorgato, M.; Masato, D.; Lucchetta, G. Effects of machined cavity texture on ejection force in micro injection molding. *Precis. Eng.* **2017**, *50*, 440–448, doi:10.1016/j.precisioneng.2017.06.019.
6. Li, X.-M.; Reinhoudt, D.; Crego-Calama, M. What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces. *Chem. Soc. Rev.* **2007**, *36*, 1350–1368, doi:10.1039/B602486F.
7. Den Braber, E.T; Ruijter, J.E.; Smits, H. T. J.; Ginsel, L. A.; von Recum, A. F.; Jansen, J. A. Effect of parallel surface microgrooves and surface energy on cell growth, *J. Biomed. Mater. Res.* **1995**, 29 (4), 511-518, doi: 10.1002/jbm.820290411.
8. Moronuki, N. Functional Texture Design and Texturing Processes, *Int. J. Autom. Technol.* **2016**, 10, 4-15, doi: 10.20965/ijat.2016.p0004.
9. Cakir, O; Yardiemeden, A.; Ozben. T, Chemical machining, *Arch. Mater. Sci. Eng.* **2007,** 28, 499-502,
10. Harris, W.T. *Chemical Milling. The Technology of Cutting Materials by Etching*; *Oxford* University Press: New York, NY, USA, 1976; 371p.
11. Ao, S.; Qin, X.; Li, K.; Luo, Z. Effects of process parameters on jet electrochemical machining of SiC particle-reinforced aluminum matrix composites. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *112*, 3351–3361, doi:10.1007/s00170-020-06586-y.
12. Joshi, G.S.*et al.* Effects of the micro surface texturing in lubricated non-conformal point contacts. *Tribol. Int.* **2018**, *127*, 296–301, doi:10.1016/j.triboint.2018.06.021.
13. Qin, Y. *Micromanufacturing Engineering and Technology*. **2010**, William Andrew.
14. Guu, Y. H.; Hou M. T. K. Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, **2007**, 466(1), 61-67, doi: 10.1016/j.msea.2007.02.035.
15. Prasad, K.N.; Syed, I.; Subbu, S.K. Laser dimple texturing–applications, process, challenges, and recent developments: A review. *Aust. J. Mech. Eng.* **2019**, 1–16, doi:10.1080/14484846.2019.1705533.

16. Simão, J.; Aspinwall, D.K.; Wise, M.L.H.; El-Menshawy, M.F. Mill roll texturing using EDT. *J. Mater. Process. Technol.* **1994**, *45*, 207–214, doi:10.1016/0924-0136(94)90342-5.
17. Etsion, I. State of the art in laser surface texturing, *J Trib*. **2005**, 127, 248-253, doi:10.1115/1.1828070.
18. Xu, X.; Guo, P.; Tiong LC, O.; Zuo, X.; Li, X.; Lee, K.R.; Wang, A. Role of dimple textured surface on tribological properties of Ti/Al-codoped diamond-like carbon films. *Thin Solid Films* **2020**, *708*, 138136, doi:10.1016/j.tsf.2020.138136.
19. 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.
20. Pal, V.K.; Choudhury, S.K. Fabrication of texturing tool to produce array of square holes for EDM by abrasive water jet machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2016**, *85*, 2061–2071, doi:10.1007/s00170-015-7875-7.
21. Lu, P.; Wood, R.J.K.; Gee, M.G.; Wang, L.; Pfleging, W. A Novel Surface Texture Shape for Directional Friction Control. *Tribol. Lett.* **2018**, *66*, 51, doi:10.1007/s11249-018-0995-0.
22. Liew, K.W.; Kok, C.K.; Efzan, M.N.E. Effect of EDM dimple geometry on friction reduction under boundary and mixed lubrication. *Tribol. Int.* **2016**, *101*, 1–9, doi:10.1016/j.triboint.2016.03.029.
23. Razali, A. R.; Qin, Y. A Review on Micro-manufacturing, Micro-forming and their Key Issues, *Malays. Tech. Univ. Conf. Eng. Amp Technol.*, **2013**, *53*, 665-672, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.086.
24. Qin, Y.; Ma, Y.; Harrison, C.S.; Brockett, A. Development of a new machine system for the forming of micro-sheet-products, *Int. J. Mater. Form.* **2008**, *1*, 475-478, doi: 10.1007/s12289-008-0098-9.
25. American Society for Testing., *Standard Terminology for Additive Manufacturing — General Principles — Terminology*; ASTM52900-15; ASTM international: West Conshohocken, PA, USA, 2015; Volume 3, p.5.
26. Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies*; Springer US: Boston, MA, USA, 2010.
27. Kadry, H.; Wadnap, S.; Xu, C.; Ahsan, F. Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *Eur. J. Pharm. Sci.* **2019**, *135*, 60–67, doi:10.1016/j.ejps.2019.05.008.
28. Wu, X.; Xu, C.; Zhang, Z. Flexible film separation analysis of LCD based mask stereolithography. *J. Mater. Process. Technol.* **2021**, *288*, 116916, doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116916.
29. Barbosa, G.F ; Carvalho, J. Design for Manufacturing and Assembly methodology applied to aircrafts design and manufacturing, *11th IFAC Workshop Intell. Manuf. Syst.* **2013**, *46*, 116-121, doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00044.
30. Wasim, M.; Vaz Serra, P.; Ngo, T. D. Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review, *Int. J. Constr. Manag.* **2020**, 1-9, doi: 10.1080/15623599.2020.1837720.
31. Zaw, H.M.; Fuh, J.Y.H.; Nee, A.Y.C.; Lu, L. Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques. J. Mater. Process. Technol. **1999**, *89–90*, 182–186, doi:10.1016/S0924-0136(99)00054-0.

32. Arthur, A.; Dickens, P.M.; Cobb, R.C. Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes, *Rapid Prototyp. J.* **1996**, *2,* 4-12, doi: 10.1108/13552549610109036.
33. 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. *J. Mater. Process. Technol.* **2005**, *159*, 33–39, doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.009.
34. 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, doi: 10.1016/S0924-0136(99)00072-2.
35. 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, doi:10.1016/j.apsusc.2018.07.132.
36. Chung, D.K.; Shin, H.S.; Park, M.S.; Kim, B.H.; Chu, C.N. Recent researches in micro electrical machining. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2011**, *12*, 371–380, doi:10.1007/s12541-011-0049-0.
37. Mohamad, A.; Siddiquee, A.; Quadir, G.; Khan, Z.; Saini, V. Optimization of EDM process parameters using Taguchi method. *International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering* **2012**, 27-28).
38. Lazarenko, B. R. To invert the effect of wear on electric power contacts, *Diss -Union Inst Electro Tech MoscowCCCP (inRuss)*, 1943.
39. Lazarenko, B.R.; Lazarenko N.I.; Brutcher, H.E., Electric Spark Method for the Machining of Metals. H.Bructher Technical Translations: Altadena, CA, USA, 1950.
40. Kumar, S.; Singh, R.; Singh, T.P.; Sethi, B.L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, *209*, 3675–3687, doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032.
41. Koshy, P.; Tovey, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. *CIRP Ann.* **2011**, *60*, 153–156, doi:10.1016/j.cirp.2011.03.104.
42. Popa, M.; Glad, C.; Pop, G.; Preja, D. New technologies and applications of EDM process, *Int. J. Mater. Form.* **2009**, *2*, 633-636, doi: 10.1007/s12289-009-0648-9.
43. Jung, J. H.; Kwon, W. T. Optimization of EDM process for multiple performance characteristics using Taguchi method and Grey relational analysis, *J. Mech. Sci. Technol.* **2010**, 24, 1083-1090, doi: 10.1007/s12206-010-0305-8.
44. Antony, J.; Jiju Antony, F. Teaching the Taguchi method to industrial engineers, *Work Study*. **2001**, *50*, 141-149, doi: 10.1108/00438020110391873.
45. Smentkowski, V.S. Trends in sputtering, *Prog. Surf. Sci.* **2000**, *64*, 1-58, doi: 10.1016/S0079-6816(99)00021-0.
46. Handoo, A. K.; Ray, P. K. Sputtering yield of chromium by argon and xenon ions with energies from 50 to 500 eV, *Appl. Phys. A*. **1992**, *54*, 92-94, doi: 10.1007/BF00348137.
47. Grove, W.R. VII. On the electro-chemical polarity of gases, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **1852**, *142*, 87-101.

48. Greene, J.E. Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017, *J. Vac. Sci. Technol, Vacuum Surfaces and Films,* **2017**, *35*, 05C204. doi: 10.1116/1.4998940
49. Behrisch, R.; Eckstein, W. Sputtering by Particle Bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies. *Springer Science & Business Media*. Berlin, Heildelberg, Germany, 2007.
50. Sigmund, P. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* **1987**, *27*, 1-20, doi: 10.1016/0168-583X(87)90004-8.
51. Taglauer, E. Surface cleaning using sputtering, *Appl. Phys. A*, **1990**, *51*, 238-251, doi: 10.1007/BF00324008.
52. Anderson, G.S.; Moseson, R.M. Method and apparatus for cleansing by ionic bombardment, 1966.
53. Hofmann, S. Sputter-depth profiling for thin-film analysis, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.* **2004**, *362*, 55-75, doi: 10.1098/rsta.2003.1304.
54. Wittmaack, K. Pre-equilibrium variation of the secondary ion yield, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 1975, *17*, 39-50, doi: 10.1016/0020-7381(75)80005-2.
55. Auciello, O.; Kingon, A.I.; Krupanidhi, S.B. Sputter Synthesis of Ferroelectric Films and Heterostructures, *MRS Bull.* **1996**, *21*, 25-30, doi: 10.1557/S0883769400046042.
56. Cuomo, S.M. [International B. M. Corp. Rossnagel Yorktown Heights, NY (USA). Thomas J. Watson Research Center], and H. R. [Front R. R. and C. S. Corp. (US)] Kaufman. In *Handbook of Ion Beam Processing Technology*; Noyes Publications: Park Ridge, NJ, USA, 1989.
57. Vaideki, K.; Jayakumar, S.; Rajendran, R.; Thilagavathi, G. Investigation on the effect of RF air plasma and neem leaf extract treatment on the surface modification and antimicrobial activity of cotton fabric, *Appl. Surf. Sci.* **2008**, *254*, 2472-2478, doi:10.1016/j.apsusc.2007.09.088
58. Xue, C.H.; Wang, R.L.; Zhang, J.; Jia, S.T.; Tian, L.Q.Growth of ZnO nanorod forests and characterization of ZnO-coated nylon fibers, *Mater. Lett.* **2010**, *64*, 327-330, doi:10.1016/j.matlet.2009.11.005
59. Liu, J.-Y.; Kou-Bing, C.; Hwang, J.-F.; Lee, M.-H. Study on the electrical and surface properties of polyester, polypropylene, and polyamide 6 using pen-type RF plasma treatment, *J. Ind. Text.* **2011**, *41*, 123-141, doi: 10.1177/1528083711398925.
60. Hegemann, D.; Amberg, M.; Ritter, A.; Heuberger, M. Recent developments in Ag metallised textiles using plasma sputtering, *Mater. Technol.* **2009**, *24*, 41-45, doi: 10.1179/175355509X417981.
61. Yuan, X.; Wei, Q.; Chen, D.; Xu, W. Electrical and optical properties of polyester fabric coated with Ag/TiO2 composite films by magnetron sputtering, *Text. Res. J.* **2015**, *86*, 887-894, doi: 10.1177/0040517515595034.
62. Chen, Y.-H.; Hsu, C.-C.; He, J.-L. Antibacterial silver coating on poly (ethylene terephthalate) fabric by using high power impulse magnetron sputtering, *Surf. Coat. Technol.* **2013**, *232*, 868-875. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.115
63. Baghriche, O.;Kiwi, J.; Pulgarin, C.; Sanjinés, R. Antibacterial Ag–ZrN surfaces promoted by subnanometric ZrN-clusters deposited by reactive pulsed magnetron sputtering, *J. Photochem. Photobiol. Chem.* **2012**, *229*, 39-45, doi: 10.1016/j.jphotochem.2011.12.004.

64. Wu, Y. et al. Surface functionalization of nanostructured LaB6-coated Poly Trilobal fabric by magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* **2016**, *384*, 413-418, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.05.062.
65. Depla, D.; Segers, S.; Leroy, W.; Van Hove, T.; Van Parys, M. Smart textiles: an explorative study of the use of magnetron sputter deposition, *Text. Res. J.* **2011**, *81*, 1808-1817, doi: 10.1177/0040517511411966.
66. Zhang, H. Silver plating on hollow glass microsphere and coating finishing of PET/cotton fabric, *J. Ind. Text.* **2012**, *42*, 283-296, doi: 10.1177/1528083712436820.
67. Kelly, P.J.; Arnell, R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum*, **2000**, *56*, 159-172, doi: 10.1016/S0042-207X(99)00189-X.
68. Radziejewska, J.; Psiuk, R.; Mościcki, T. Characterization and Wear Response of Magnetron Sputtered W–B and W–Ti–B Coatings on WC–Co Tools. *Coatings* **2020**, *10*, 1231, doi:10.3390/coatings10121231.
69. B08 Committee, Standard Guide for Electroforming with Nickel and Copper, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2008.
70. Brousseau, E.; 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
71. N. Kanani, *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2004.
72. Albright, P. Electroplating, *Van Nostrands Encycl. Chem.*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA, 2005.
73. Durney, L. J. *Graham's Electroplating Engineering Handbook*. Springer, Berlin, Brandenburg, Germany, 1984.
74. Hernández, P. Electroforming Applied to Manufacturing of Microcomponents. *Procedia Eng.* **2015**, *132*, 655–662, doi:10.1016/j.proeng.2015.12.544.
75. Wook, K.; Yul, K.; Sang, J. Method of Duplicating Nano Pattern Texture on Object's Surface by Nano Imprinting and Electroforming. U.S. Patent Application No 12/655,030, 29 April 2010.
76. 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 Ann.* **2001**, *50*, 499–514, doi:10.1016/S0007-8506(07)62990-4.
77. Parkinson, R. *Electroforming — a unique metal fabrication process*, Nickel Development Instute, Ontario, Canada, 1998; p. 15.
78. Masuzawa, T.; Tönshoff, H.K. Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools, *CIRP Ann.* **1997**, *46*, 621-628, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60882-8.
79. Ding, J.; Zhai, Z.; Hejijun, C.; Jiawen, L.; Wang, X. Huang, W. Micro device mould fabrication based on two-photon polymerization and electroforming. In Proceedings of the 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, China, 20-23 January 2010; p.1078.
80. Wong, K.P.; Chan, K.C.; Yue, T.M. A study of surface finishing in pulse current electroforming of nickel by utilizing different shaped waveforms. *Surf. Coat. Technol.* **1999**, *115*, 132–139, doi:10.1016/S0257-8972(99)00165-6.
81. Weinmann, M.; Jung, A.; Natter, H. Magnetic field-assisted electroforming of complex geometries. *J. Solid State Electrochem.* **2013**, *17*, 2721–2729, doi:10.1007/s10008-013-2172-6.

82. McMillan, W.G. A Treatise on Electro-metallurgy: Embracing the Application of Electrolysis to the Plating, Depositing, Smelting, and Refining of Various Metals, and to the Reproduction of Printing Surfaces and Art-work, Etc. *Nature.* **1911**, *85*, 506-506, doi.org/10.1038/085506b0
83. Heinrich, H. The discovery of galvanoplasty and electrotyping, *J. Chem. Educ.* **1938**, *15*, 565, doi: 10.1021/ed015p565.
84. Monzon, M.D; Marrero, M.D.; Benitez, A.N.; Hernandez, P.M.; Cardenes, J.F. A technical note on the characterization of electroformed nickel shells for their application to injection molds, *J. Mater. Process. Technol.* **2006**, *176*, 273-277, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.003.
85. Hernández, P.M., Socas, A.; Benítez, A.N.; Marrero, M.D.; Ortega, F.; Monzón, M.D. Computer Aided Electroforming. Elecform3D™, *Manuf. Eng. Soc. Int. Conf. MESIC* **2013**, *63*, 532-539, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.198.
86. Hernández, P.M. Socas, A.; Benítez, A.; Ortega, F.; Díaz, N.; Marrero, M.D.; Monzón, M.D. Boundary Element Method Applied to Electroforming Process, *Mater. Sci. Forum*, **2014**, *797*, 125-132, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.797.125.
87. Hernández, P.; Benítez-Vega, A.N.; Díaz-Padilla, N.; Ortega-García, F.; Socorro-Perdomo, P.; Marrero-Alemán, M.D. Design and manufacture of structured surfaces by electroforming. *Procedia Manuf.* **2017**, *13*, 402–409, doi:10.1016/j.promfg.2017.09.030.
88. Benítez, A.; Ortega, F.; Monzón, M.; Hernández, P.; Marrero, M.; Carrión, C. Desarrollo de electrodos EDM a partir de fabricación aditiva de electroconformado, *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, España, 2010.
89. Salvado, E.J. *Electrodeposición de metales: fundamentos, operaciones e instalaciones*. E. Julve, Barcelona, España, 2000.
90. Thirumalraj, B. *et al.* Nucleation and Growth Mechanism of Lithium Metal Electroplating, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 18612-18623, doi: 10.1021/jacs.9b10195.
91. 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.* 2014. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
92. Liang, Z. *et al.* Polymer Nanofiber-Guided Uniform Lithium Deposition for Battery Electrodes, *Nano Lett.* **2015**, *15*, 2910-2916, doi: 10.1021/nl5046318.
93. Vega, A.N.B. *Definición del proceso y estudio del comportamiento de los electrodos para edm fabricados mediante técnicas de prototipado rápido (rp) y procedimientos de electroconformado (ef)*. 2005. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

94. Agboola, O.; Sadiku, R.E.; Ojo, O.; Akanji, O.; Biotidara, O. Influence of operation parameters on metal deposition in bright nickel-plating process, *Port. Electrochimica Acta.* **2011**, *29*, 91-100, doi:10.4152/pea.201102091.
95. Di Bari, G.A. Electrodeposition of Nickel, en *Modern Electroplating*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ; USA, 2010, p.79-114.
96. Kruglikov, S.; Kudriavtsev, N.; Vorobiova, G.; Antonov, A. On the mechanism of levelling by addition agents in electrodeposition of metals, *Electrochimica Acta*, **1965**, *10*, 253-261, doi: 10.1016/0013-4686(65)87023-2.
97. Dennis, J.K.; Such, T.E. *Nickel and chromium plating*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1993.
98. IBL, N.; Puippe, JCI; Angerer, H. Electrocrystailization in pulse electrolysis, *Surf. Technol.* **1978**, *6*, 278-300, doi: 10.1016/0376-4583(78)90044-4
99. Ibl, N. Some theoretical aspects of pulse electrolysis, *Surf. Technol.* **1980**, *10*, 81-104, doi: 10.1016/0376-4583(80)90056-4
100. Chandrasekar, M.S.; Pushpavanam, M. Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications, *Electrochimica Acta.* **2008**, *53*, 3313-3322, doi: 10.1016/j.electacta.2007.11.054.
101. Georgiadou, M.; Veyret, D. Modeling of transient electrochemical systems involving moving boundaries: parametric study of pulse and pulse-reverse plating of copper in trenches, *J. Electrochem. Soc.* **2002**, *149*, C324, doi: 10.1149/1.1471890.
102. Kelly, J.; Bradley, P.; Landolt, D. Additive effects during pulsed deposition of Cu-Co nanostructures, *J. Electrochem. Soc.* **2000**, *147*, 2975, doi: 10.1149/1.1393634.
103. Leith, S.; Schwartz, D. High-rate through-mold electrodeposition of thick (>200µm) NiFe MEMS components with uniform composition, *Microelectromechanical Syst. J. Of*, **2000**, *8*, 384-392, doi: 10.1109/84.809052.
104. Gierlotka, D.; Ro´winski, E.; Budniok, A. La,giewka, E. Production and properties of electrolytic Ni–P–TiO2 composite layers, *J. Appl. Electrochem.* **1997**, *27*, 1349-1354, doi: 10.1023/A:1018416927715.
105. Grujicic, D.; Pesic, B. Electrodeposition of copper: the nucleation mechanisms, *Electrochimica Acta.* **2002**, *47*, 2901-2912, doi: 10.1016/S0013-4686(02)00161-5.
106. Hernández, J.M; Gallego, J.D. Deposición electrolítica de Níquel, *IT-CDT 2015-8*, icts-Yebes, Guadalajara, España, p. 27.
107. Nava, D.U. *Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P*. 2013.Tesis Doctoral. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ).
108. Mehdizadeh, S.; Dukovic, J.; Andricacos, P.; Romankiw, L.; Cheh, H. The influence of lithographic patterning on current distribution: A model for microfabrication by electrodeposition, *J. Electrochem. Soc.* **1992**, *139*, 78, doi: 10.1149/1.2069205.
109. Park, C.-W.; Park, K.-Y. An effect of dummy cathode on thickness uniformity in electroforming process, *Results Phys.* **2014**, *4*, 107-112, doi: 10.1016/j.rinp.2014.07.004.

110. Cho, S.K.; Kim, J.J. Study on the Deposit Uniformity and Profile of Cu Electroplated in Miniaturized, Laboratory-Scale Through Mask Plating Cell for Printed Circuit Board (PCBs) Fabrication, *Korean Chem. Eng. Res.* **2016**, *54*, 108-113, doi: 10.9713/KCER.2016.54.1.108.
111. John, S.; Ananth, V.; Vasudevan, T. Improving the deposit distribution during electroforming of complicated shapes, *Bull. Electrochem.* **1999**, *15*, 202-204.
112. Pei, H.Z.; Zhang, J.; Zhang, G.L.; Huang, P. Research to the uniformity of Ni-Co alloy electroforming, *Advanced Materials Reserch.* **2012**, *479*, 497-503, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.479-481.497.
113. Broadbent, E.K. *Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer*, US Patent and Trademark Office: Washington D.C, DC, USA. 2000.
114. Hafezi, H.; Rosenfeld, A. *Apparatus and method for improving uniformity in electroplating*, US Patent and Trademark Office: Washington D.C, DC, USA. 2010.
115. Yang, J.-M.; Kim, D.-H.; Zhu, D.; Wang, K. Improvement of deposition uniformity in alloy electroforming for revolving parts, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2008**, *48*, 329-337, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.10.006.
116. Hsu, C.-M. Improving the electroforming process in optical recordable media manufacturing via an integrated procedure, *Eng. Optim.* **2004**, *36*, 659-675, doi: 10.1080/03052150412331272892.
117. Du, L. *et al.* Study on Improving Thickness Uniformity of Microfluidic Chip Mold in the Electroforming Process, *Micromachines* **2016**, *7*, doi: 10.3390/mi7010007.
118. Tan, Y.J.; Lim, K.Y. Understanding and improving the uniformity of electrodeposition, *Surface and Coating Technology,* **2003**, *167*, 255-262, doi: 10.1016/S0257-8972(02)00916-7.
119. Roy, S.; Andreou, E. Electroforming in the industry 4.0 era, *Curr. Opin. Electrochem.* **2020**, *20*, 108-115, doi:10.1016/j.coelec.2020.02.025.
120. Zhai, K.; Du, L.; Wang, W.; Zhu, H.; Zhao, W.; Zhao, W. Research of megasonic electroforming equipment based on the uniformity of electroforming process, *Ultrason. Sonochem.* **2018**, *42*, 368-375, doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.11.042.
121. Hu, W; Peng, Y; She, Y.; Tang, B. Insights to the influences of electroforming process on resistive switching types in Pt/InGaZnO/W memory device, *11th Asian Meet. Electroceramics AMEC-11.* **2018**, *44*, S88-S92, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.233.
122. Zhao X.; Wang, Z.; Wentong, L.; Sun, S. Photoassisted Electroforming Method for Reliable Low-Power Organic–Inorganic Perovskite Memristors, *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1910151, doi: 10.1002/adfm.201910151
123. Hu, J.; Li, Q.; An, M.; Zhang, J.; Yang, P. Influence of Glycerol on Copper Electrodeposition from Pyrophosphate Bath: Nucleation Mechanism and Performance Characterization, *J. Electrochem. Soc.* **2018**, *165*, D584-D594, doi: 10.1149/2.0051813jes.

124. Nishikawa, K.; Saito, T.; Matsushima, H., Ueda, M. Holographic interferometric microscopy for measuring Cu2+ concentration profile during Cu electrodeposition in a magnetic field, *Electrochimica Acta*. **2019**, *297*, 1104-1108, doi: 10.1016/j.electacta.2018.12.025.

125. Wang, F.; Yang, Y.; Wang, Y.; Ren, X.; Li, X. Study on Physical Properties of Ultrasonic-Assisted Copper Electrodeposition in Through Silicon Via, *J. Electrochem. Soc.* **2020**, *167*, 022507, doi: 10.1149/1945-7111/ab68cb.

126. Schmitt, K.G.; Schmidt, R.; Gaida, J.; Gewirth, A.A. Chain length variation to probe the mechanism of accelerator additives in copper electrodeposition, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2019**, *21*, pp. 16838-16847, doi: 10.1039/c9cp00839j.

127. Singha, M.; Sharmab, S.; Weia, D. Optimizing process parameters using L9 Taguchi orthogonal array for Electroforming Process on ABS component with 3-D Printing Technology. *In Proceedings of the 13th Asia-Pacific Conference on Materials processing.* **2018**, *23*, 27.

128. Seol, S.K.; Kim, D.; Lee, S.; Kim, J.H.; Chang, W.S.; Kim, J.T. Electrodeposition-based 3D printing of metallic microarchitectures with controlled internal structures, *Small.* **2015**, *11*, 3896-3902, doi:10.10002/smll.201500177.

129. Ma, Y.; Liu, W., Liu, C. Research on the process of fabricating a multi-layer metal micro-structure based on UV-LIGA overlay technology, *Nanotechnol. Precis. Eng.* **2019**, *2*, 83-88, doi: 10.1016/j.npe.2019.07.002

130. Matsuzaki, R.; Kanatani, T.; Todoroki, A. Multi-material additive manufacturing of polymers and metals using fused filament fabrication and electroforming, *Addit. Manuf. 2019*, *29*, 100812, doi: 10.1016/j.addma.2019.100812.

131. Wu, Y.; Qian, S.; Zhang, H.; Zhang, Y.; Cao, H.; Huang, M. Experimental Study on Three-Dimensional Microstructure Copper Electroforming Based on 3D Printing Technology, *Micromachines*. **2019**, *10*, doi: 10.3390/mi10120887.

132. Kim, M.J.; Cruz, M.A.; Ye, S.; Gray, A.L.; Smith, G.L.; Lazarus, N.; Walker, C.J.; Sigmarsson, H.H; Wiley, B. One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects», *Addit. Manuf.* **2019**, *27*, 318-326, doi:10.1016/j.addma.2019.03.016.

133. Padhi, S.K.; Mahapatra, S.S.; Padhi, R.; Das, H.C. Performance analysis of a thick copper-electroplated FDM ABS plastic rapid tool EDM electrode, *Adv. Manuf.* **2018**, *6*, 442-456, doi: 10.1007/s40436-018-0238-5.

134. Danade, U.A.; Londhe,S.D.; Metkar, R.M. Machining performance of 3D-printed ABS electrode coated with copper in EDM, *Rapid Prototyp. J.*, **2019**, *25*, doi: 10.1108/RPJ-11-2018-0297

135. Keithley Instruments (2015). *Model 2460 High-Current Interactive Source Meter Instrument* [pdf file]. Disponible en: https://www.keitheley.com

136. Arduino®. What is Arduino? Disponible en: https://arduino.cl/que-es-arduino/. (Recuperado el 28 de diciembre de 2020).

137. Gambro inc. (2016). *2016-05-18-145210-HCEN1155_AK200S* [pdf file]. Disponible en: https://www.gambro.com.
138. Xiaomi corp. *Mi Global Home* Disponible en: https://www.mi.com/global/camera-360/ (Recuperado el 29 de diciembre de 2020).
139. Janda, J.; Sladek, P.; Sas, D. Electrodeposition of selected alpha-emitting radionuclides from oxalate-ammonium sulfate electrolyte and measured by means of solid-state alpha spectrometry, *J. Radioanal. Nucl. Chem. - J RADIOANAL NUCL CHEM.* **2010**, *286*, 687-691, doi: 10.1007/s10967-010-0756-5.
140. WANHAO 3D PRINTER (2017). D7V1.5_REV.A [pdf file]. Disponible en: https://www.wanhao3dprinter.com.
141. Monocure Pty Ltd (2015). Chemwatch-Australian-MSDS-3D-CLEAR-Standard-Rapid [pdf file]. Disponible en: https://monocure3d.com.au.
142. Quorum Technologies Ltd (2011). SC7620 Mini Sputter Coater/ Glow Discharge System [pdf file]. Disponible en: https://www.quorumtech.com.
143. Quorum Technologies Ltd (2011). SC7620_coater_manual [pdf file]. Disponible en: https://www.quorumtech.com
144. Mitutoyo Corporation (2015). MITUTOYO TM SERIES E14013 [pdf file]. Disponible en: https://www.mitutoyo.co.jp/global.html
145. Arthur, A.; Dickens, P.; Bocking, C.; Cobb, R. Wear & Failure Mechanisms for SL EDM Electrodes, *International Solid Freeform Fabrication Symposium.* **1996,** p.16.
146. Heirmele+Meulle Group (2018). Produktdatenblatt_Galvanochemie_D_E_29012020 [pdf file]. Disponible en: https://www.heimerle-meule.com
147. Motip Dupli (2018). Prestolith data Sheet [pdf file]. Disponible en: https://www.motipdupli.com/.

ANEXO I

EXPOSICIÓN DE RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

Anexo I. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS.

I.1. INTRODUCCIÓN.

En esta parte del documento se incorpora la información referente a los resultados de los ensayos, llevados a cabo durante la aplicación experimental del equipo de micro-electroconformado. Se expondrán datos e imágenes extraídos de una selección del conjunto de experimentos realizados, en concreto los correspondientes al estudio presentado en el Capítulo 5. Aplicación y respuesta experimental del equipo desarrollado.

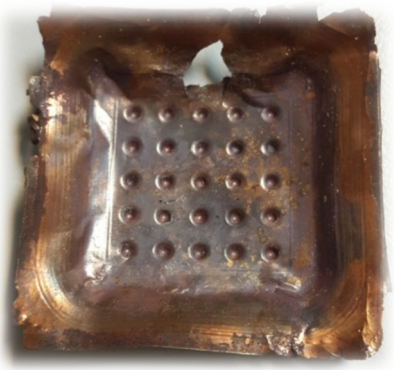
Se incluyen imágenes de las diferentes electroformas finalizadas, tanto de su superficie funcional como de su superficie no funcional, que se complementan con imágenes, en detalle al microscopio, de las superficies depositadas en las mismas superficies. Para la obtención de las imágenes al microscopio se han utilizado dos instrumentos:

- Microscopio electrónico de medición Olympus BX51 con los aumentos oculares x2 y x5 que unidos al aumento de objetivo x10 proporcionan unos aumentos totales de 20x y 50x respectivamente.
- Microscopio de medición Mitutoyo TM-510 que dispone de aumento de objetivo x2 y aumento ocular x15 lo que provee un aumento total de la imagen 30x.

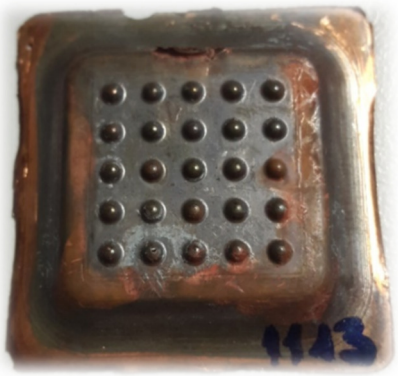
Se exponen las representaciones gráficas de las mediciones de espesor obtenidas sobre la superficie y en los fondos de los agujeros. Se incluyen también imágenes de una secuencia del seguimiento del proceso de deposición a través del sistema de vigilancia y por último imágenes con los resultados de la aplicación de la herramienta en el proceso de electroerosión (SEDM).

I.2. IMÁGENES DE LAS ELECTROFORMAS.

PIEZA 191105

Cara funcional	Cara no funcional
	

PIEZA 191113

Cara funcional	Cara no funcional
	

PIEZA 191204

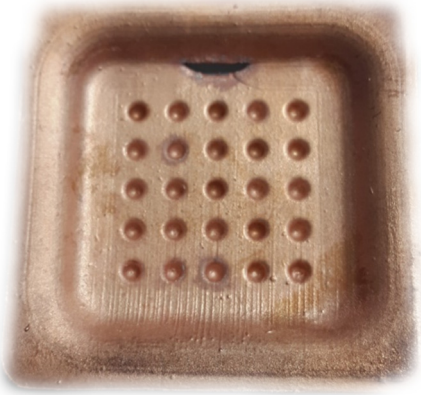
Cara funcional	Cara no funcional

ANEXO I

PIEZA 191212

Cara funcional

Cara no funcional



PIEZA 200706

Cara funcional

Cara no funcional

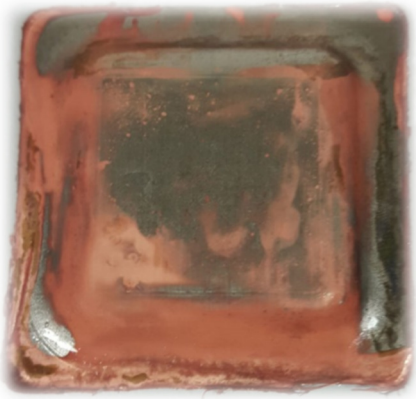
PIEZA 200922

Cara funcional

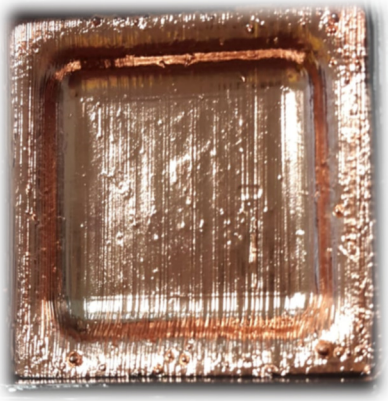
Cara no funcional

PIEZA 200714

Cara funcional

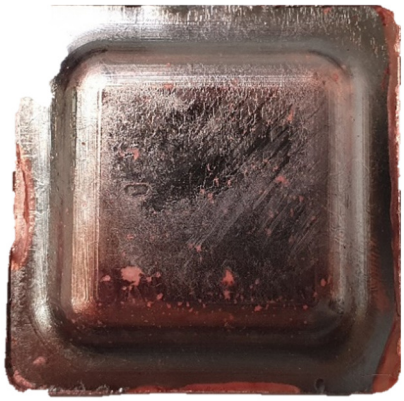


Cara no funcional

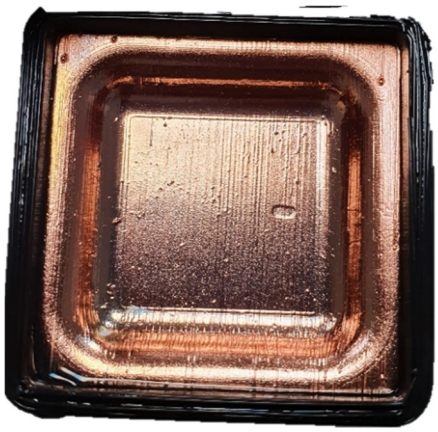


PIEZA 200715

Cara funcional



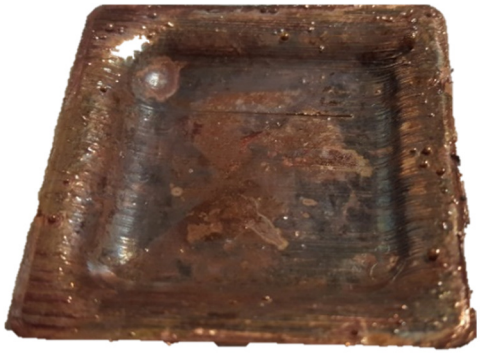
Cara no funcional



PIEZA 200717

Cara funcional

Cara no funcional



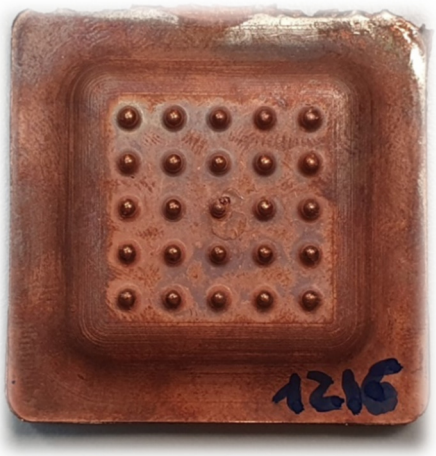
PIEZA 210119

Cara funcional

Cara no funcional

PIEZA 191216

Cara funcional

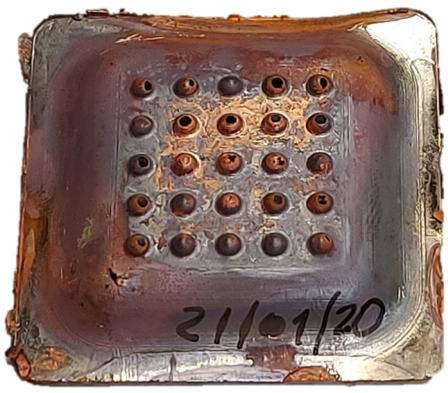


Cara no funcional

PIEZA 210120

Cara funcional

Cara no funcional



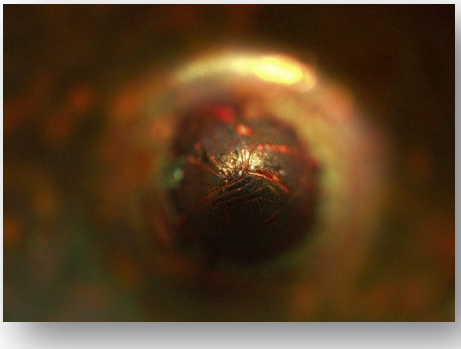
I.3. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS ELECTROFORMAS EN LA CARA NO FUNCIONAL.

PIEZA 191105

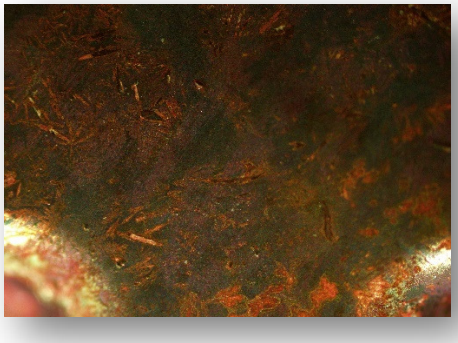
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)



Fondo de cavidad (50x)

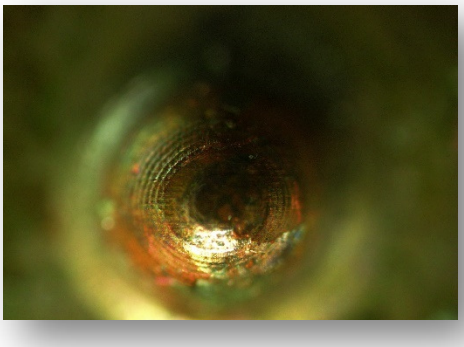


PIEZA 191113

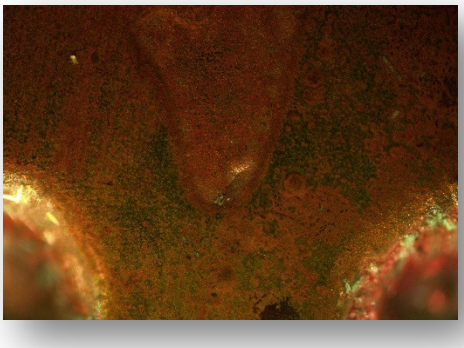
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)



Fondo de cavidad (50x)

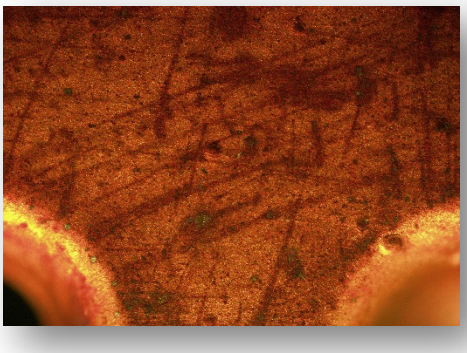


PIEZA 191204

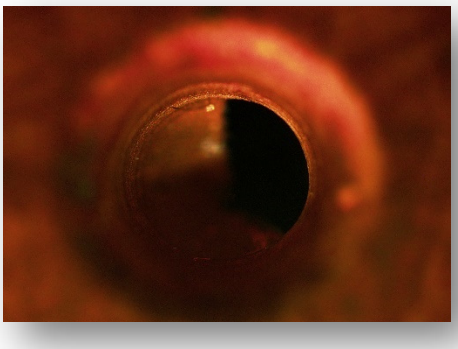
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)



Fondo de cavidad (50x)

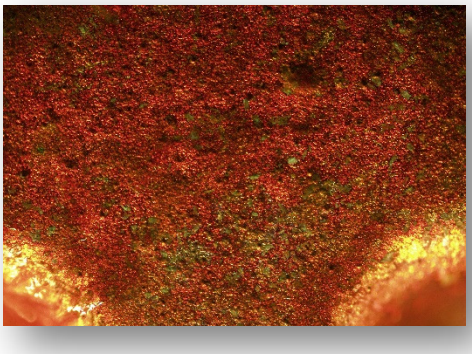


PIEZA 191212

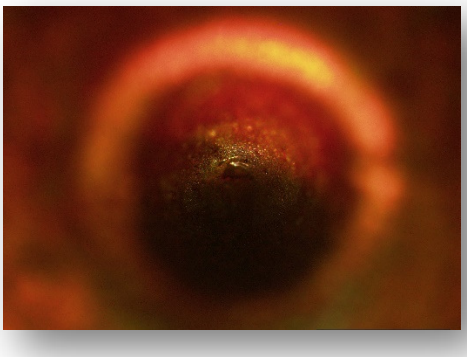
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)



Fondo de cavidad (50x)

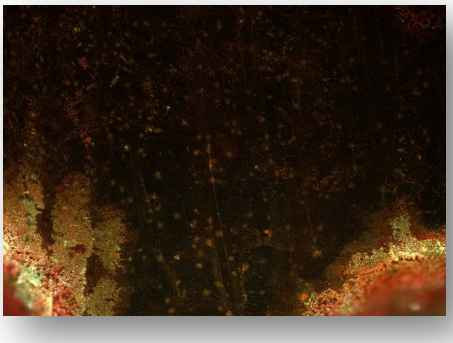


PIEZA 200706

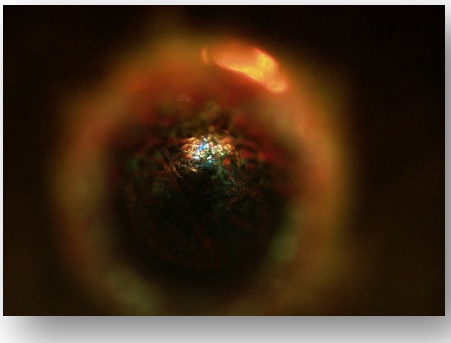
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)

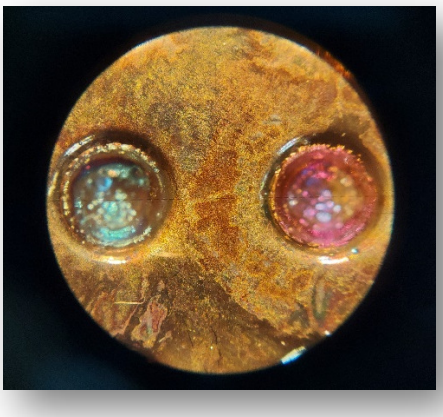


Fondo de cavidad (50x)

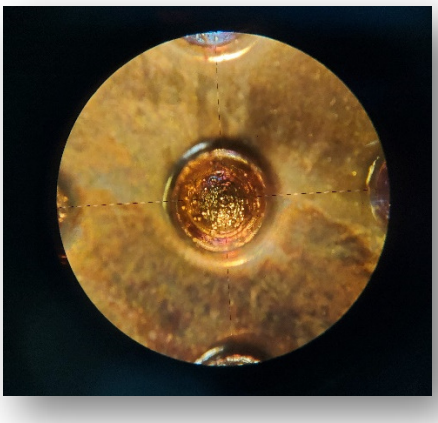


PIEZA 200922

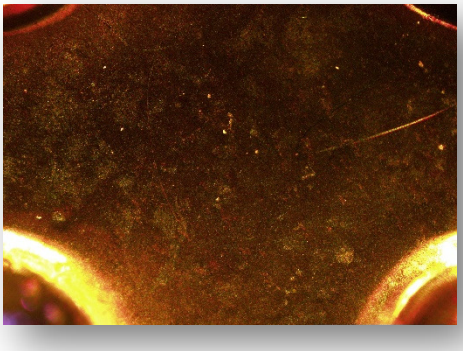
Superficie (30x)



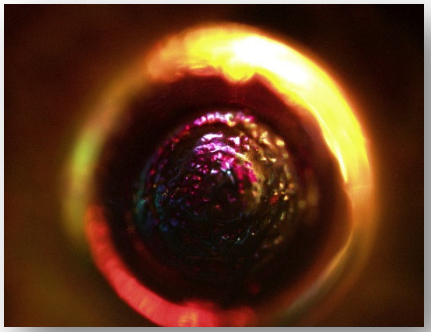
Fondo de cavidad (30x)



Superficie (50x)

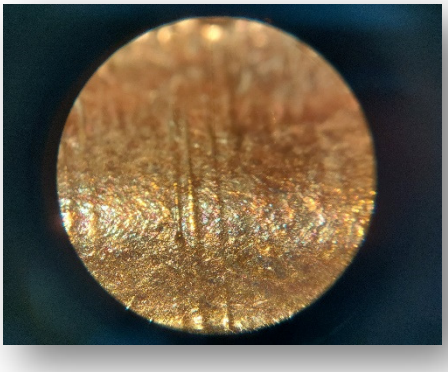


Fondo de cavidad (50x)



PIEZA 200714

Superficie (30x)

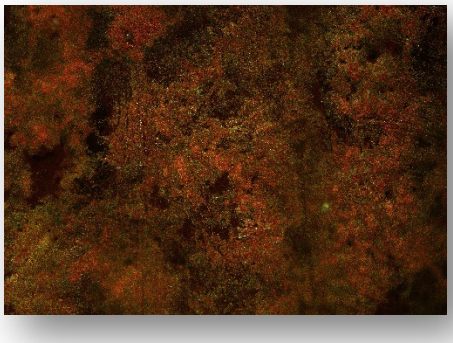


Superficie (50x)

PIEZA 20715

Superficie (30x)

Superficie (50x)

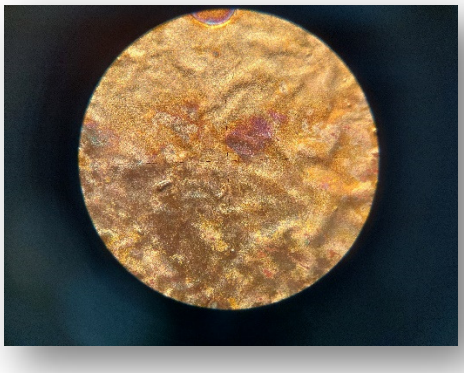


PIEZA 200717

Superficie (30x)

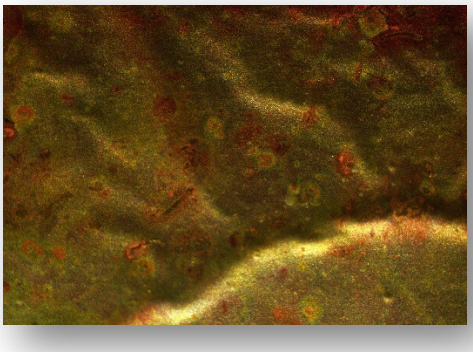
PIEZA 210119

Superficie (30x)



Superficie (50x)

Superficie (50x)



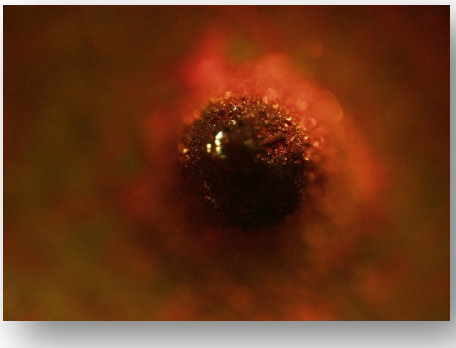
Pieza 191216

Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)

Fondo de cavidad (50x)

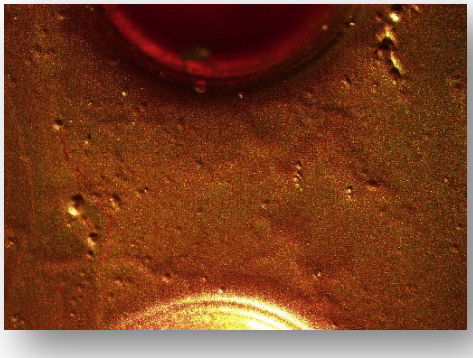


PIEZA 200120

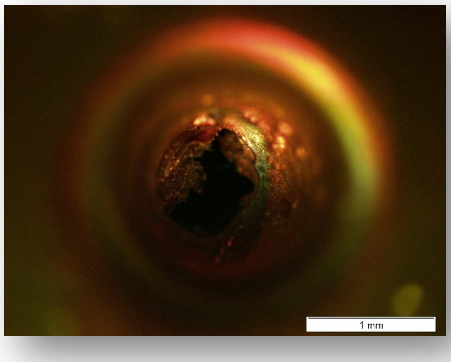
Superficie (30x)

Fondo de cavidad (30x)

Superficie (50x)



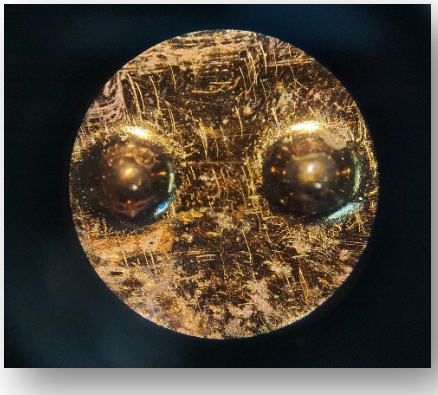
Fondo de cavidad (50x)



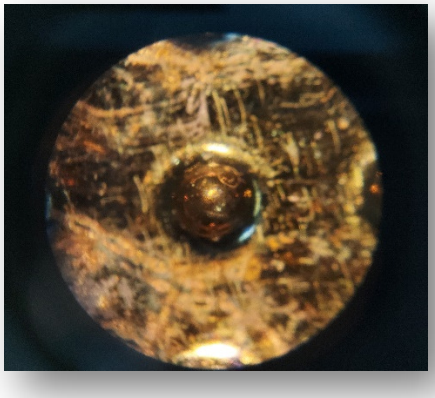
I.4. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS ELECTROFORMAS EN LA CARA FUNCIONAL.

PIEZA 191105

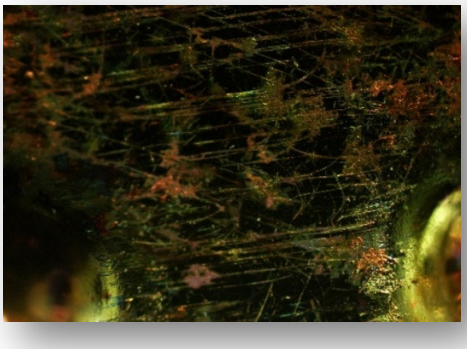
Superficie (30x)



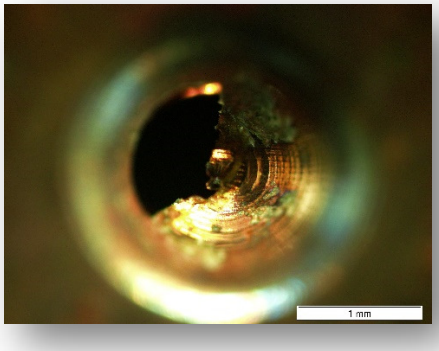
Cresta semiesfera (30x)



Superficie (50x)



Cresta semiesfera (50x)

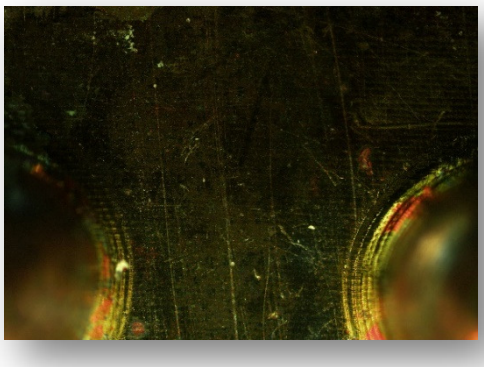


PIEZA 191118

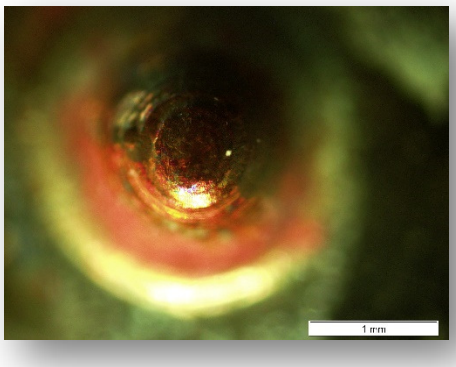
Superficie (30x)

Cresta semiesfera (30x)

Superficie (50x)



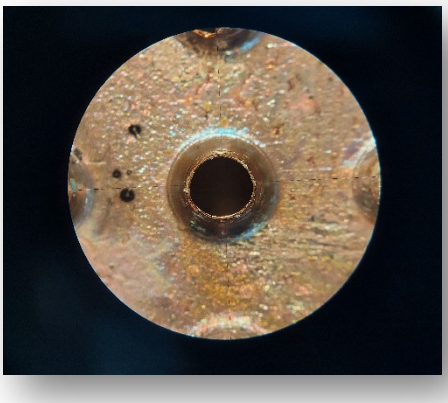
Cresta semiesfera (50x)



PIEZA 191204

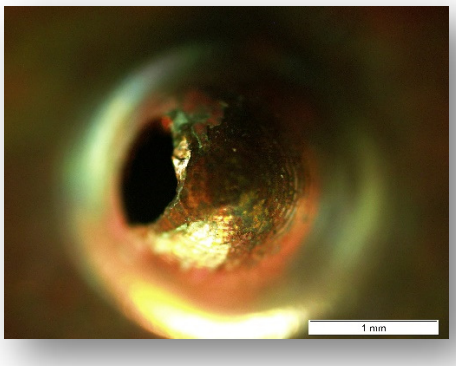
Superficie (30x)

Cresta semiesfera (30x)



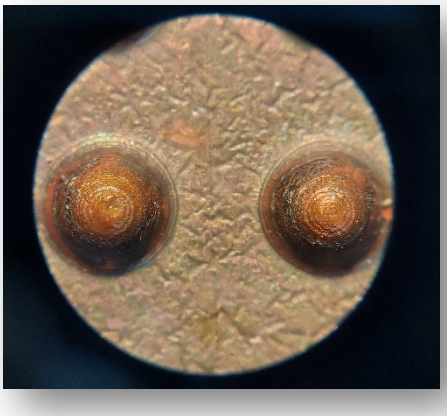
Superficie (50x)

Cresta semiesfera (50x)

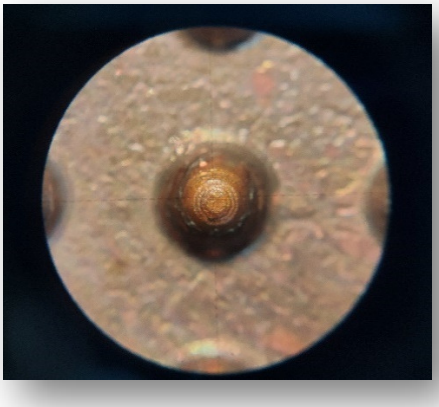


PIEZA 191212

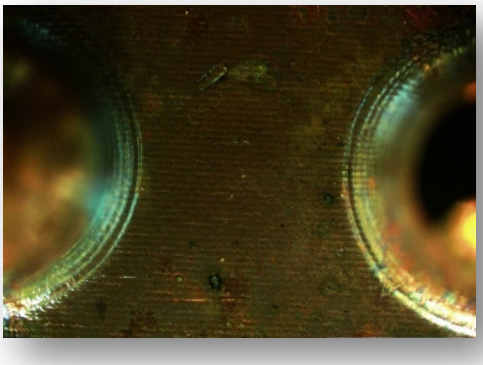
Superficie (30x)



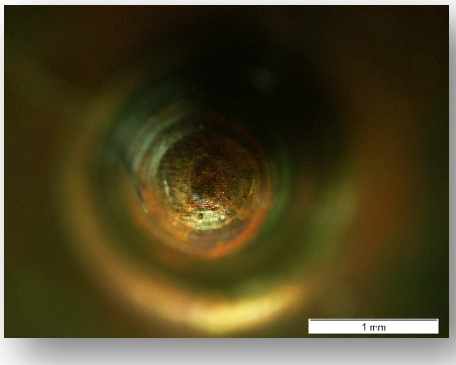
Cresta semiesfera (30x)



Superficie (50x)



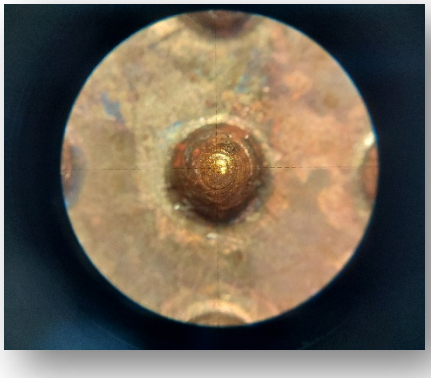
Cresta semiesfera (50x)



PIEZA 200706

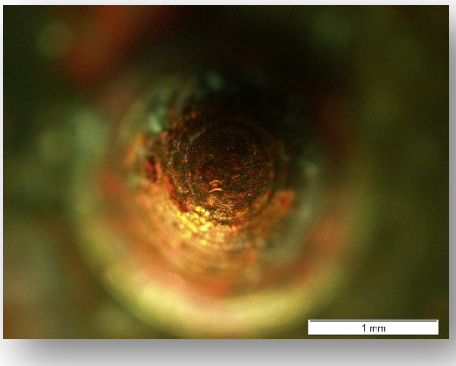
Superficie (30x)

Cresta semiesfera (30x)



Superficie (50x)

Cresta semiesfera (50x)



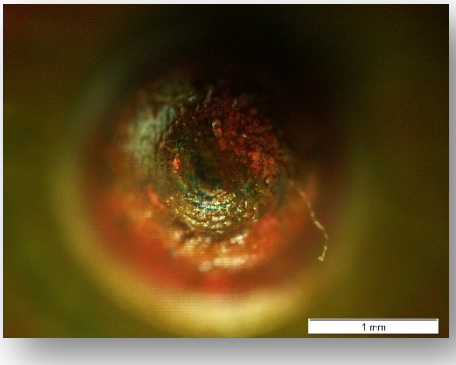
PIEZA 200922

Superficie (30x)

Cresta semiesfera (30x)

Superficie (50x)

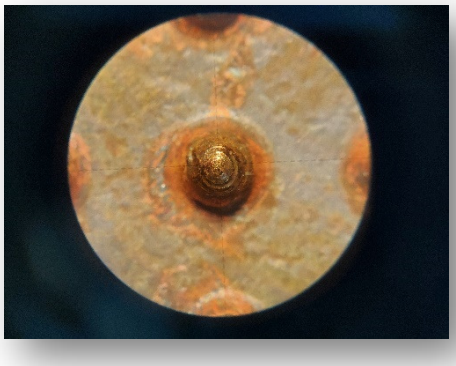
Cresta semiesfera (50x)



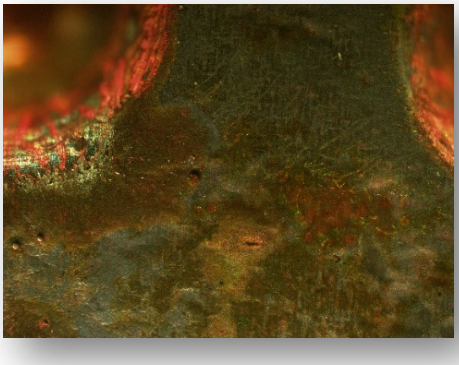
PIEZA 191216

Superficie (30x)

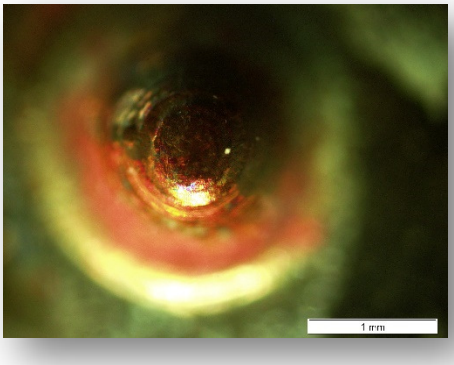
Cresta semiesfera (30x)



Superficie (50x)



Cresta semiesfera (50x)

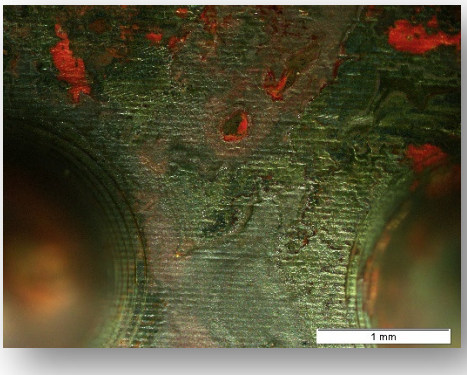


PIEZA 200120

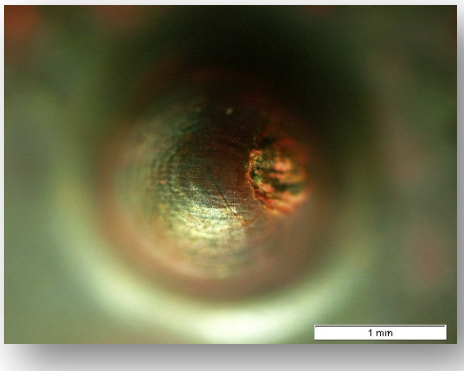
Superficie (30x)

Cresta semiesfera (30x)

Superficie (50x)

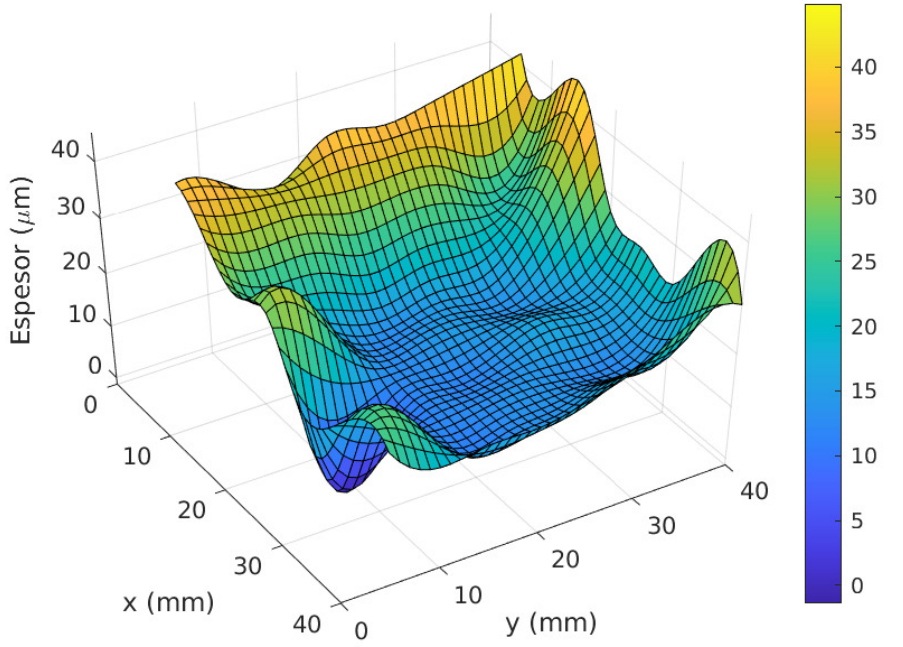


Cresta semiesfera (50x)

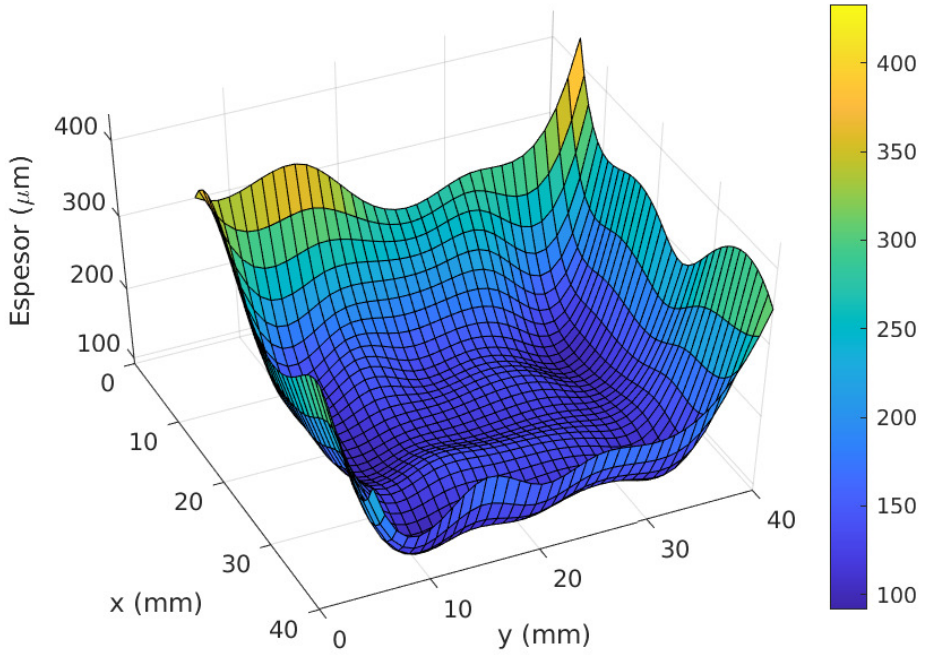


I.5. MAPAS DE ESPESORES 3D.

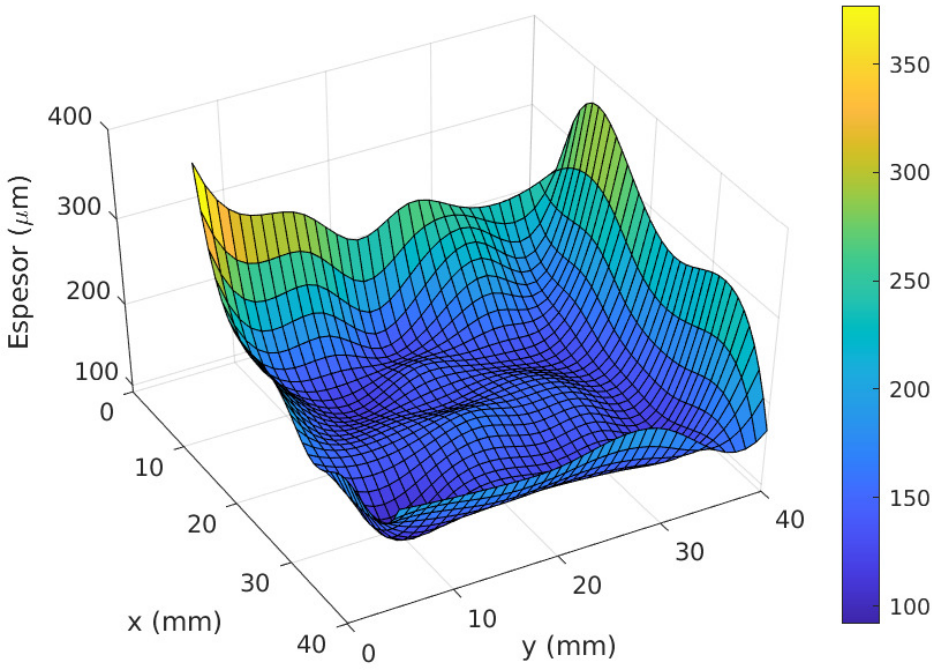
PIEZA 191105



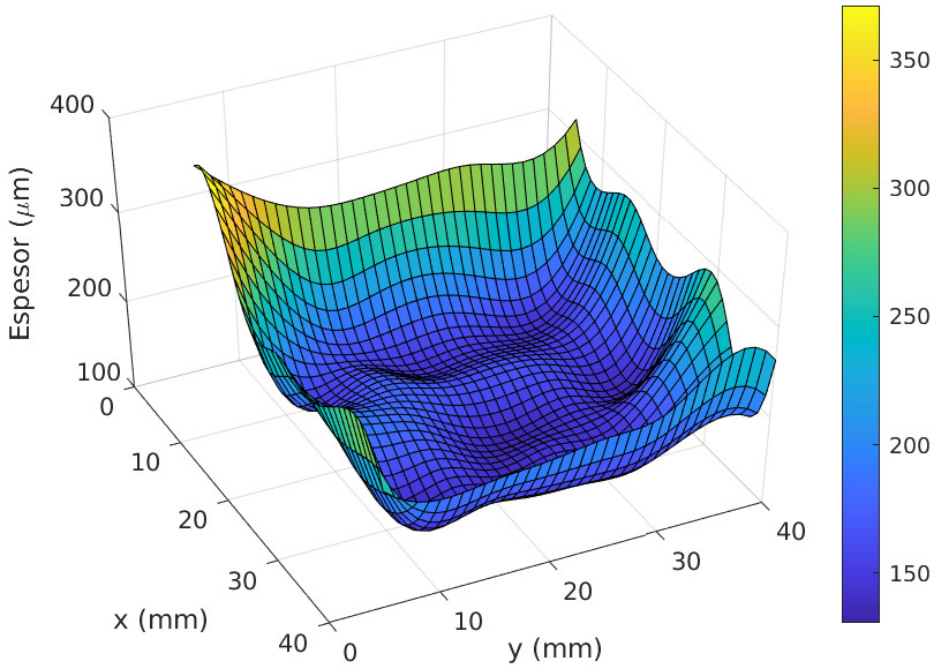
PIEZA 191113



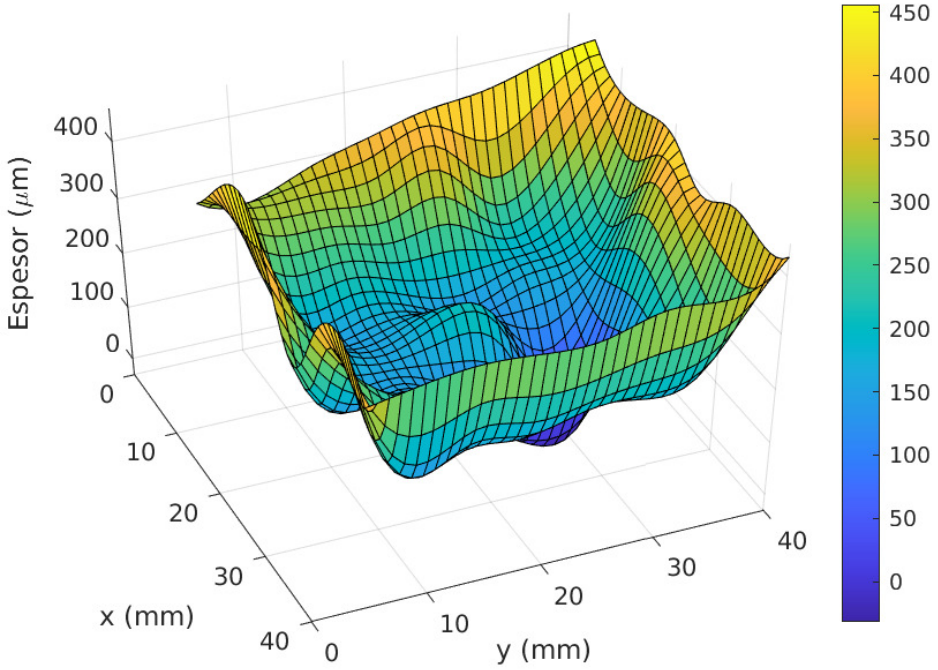
PIEZA 191204



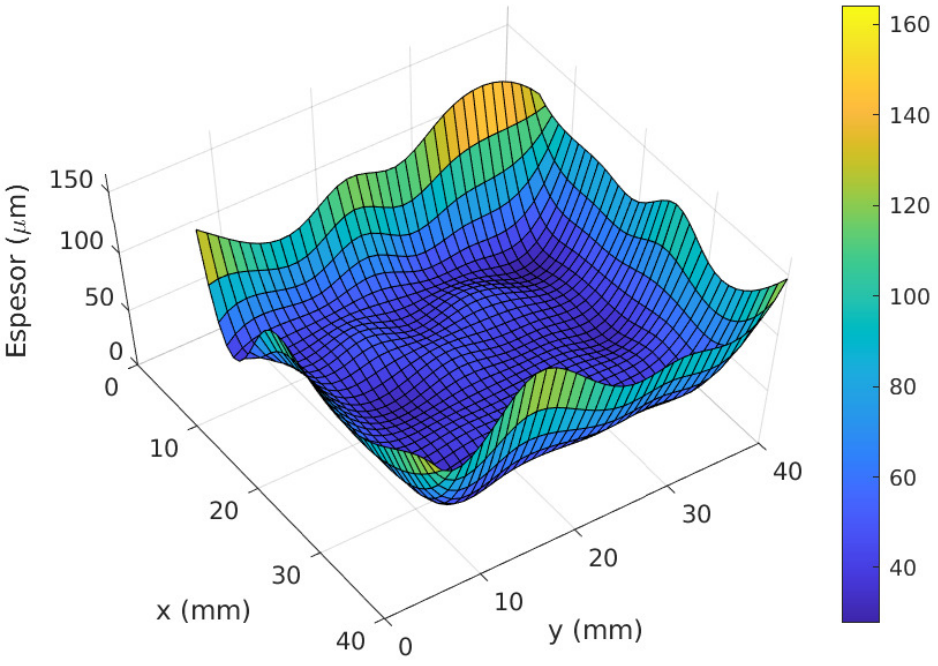
PIEZA 191212



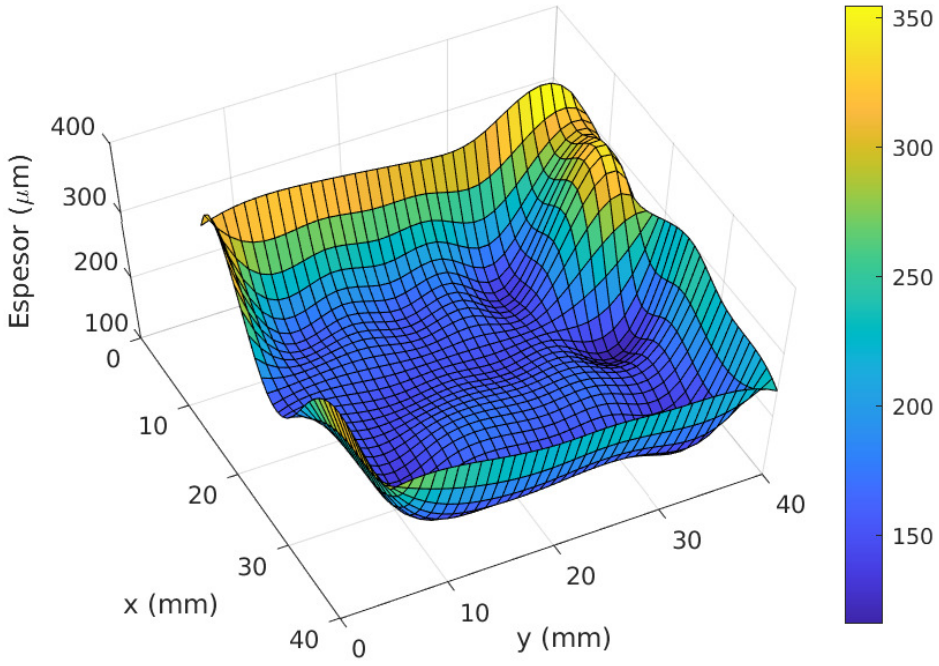
PIEZA 200706



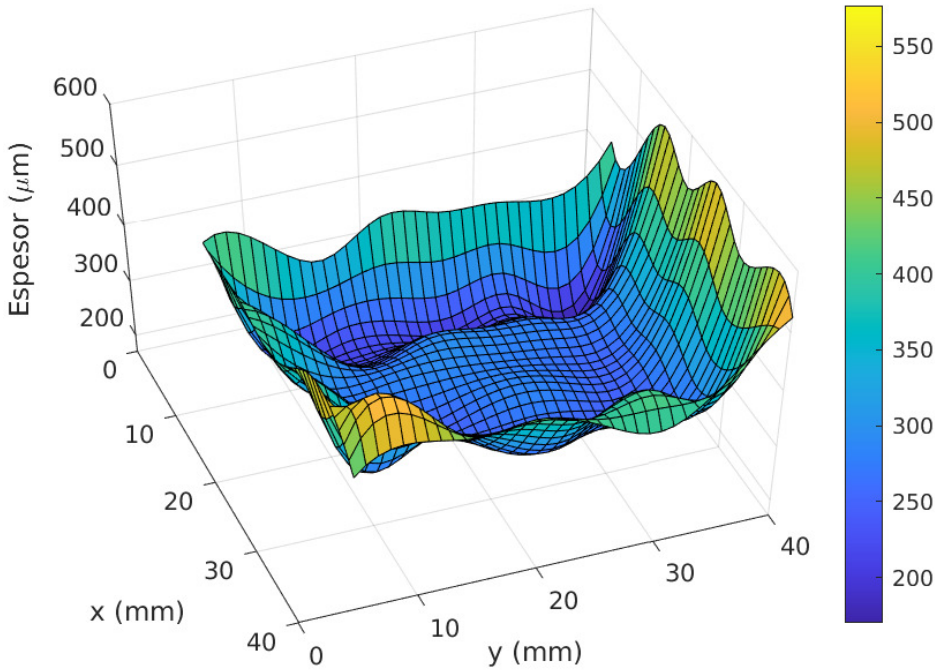
PIEZA 200922



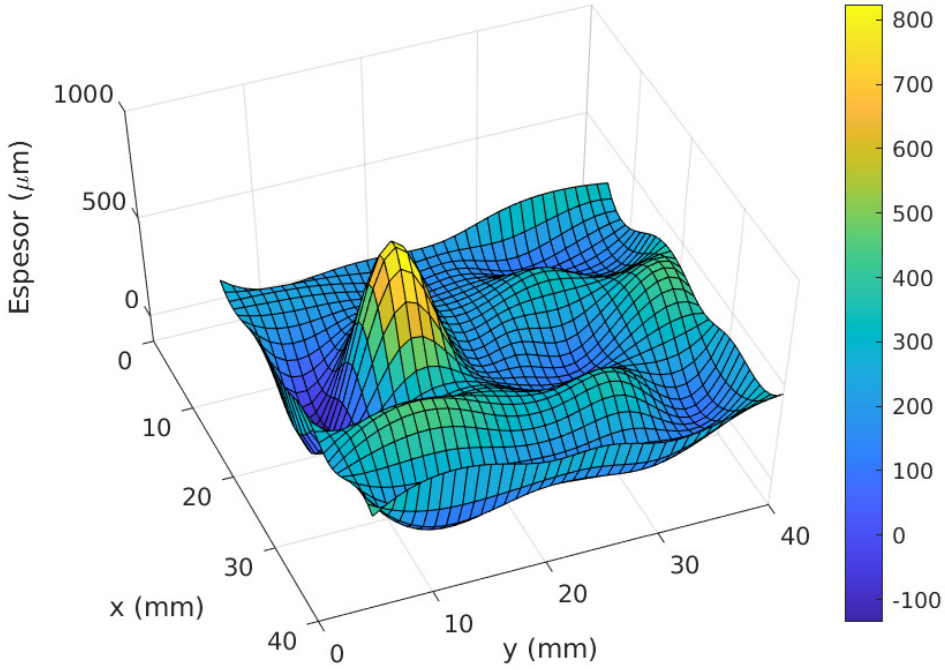
PIEZA 200714



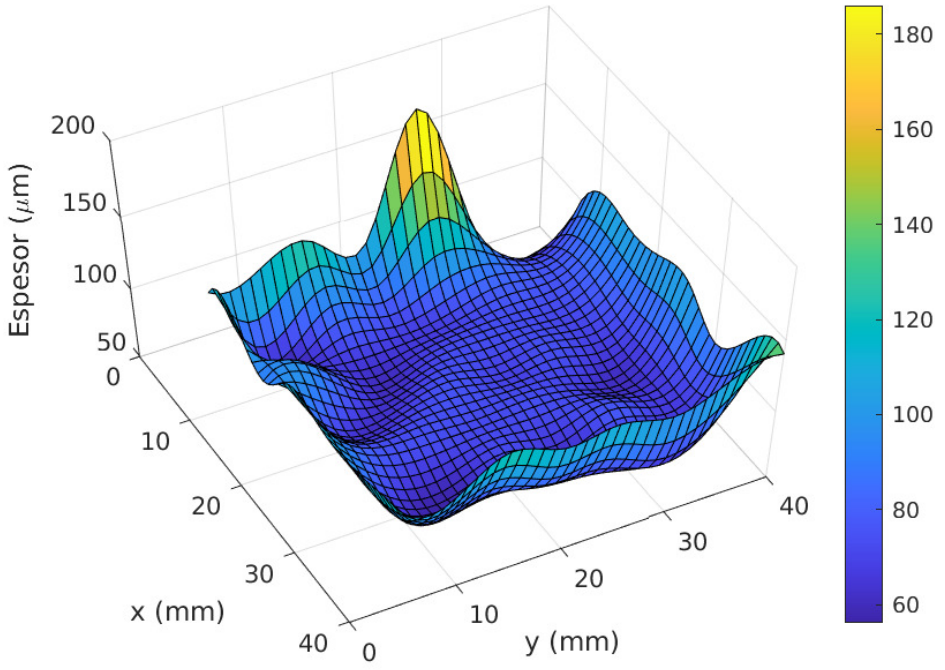
PIEZA 200715



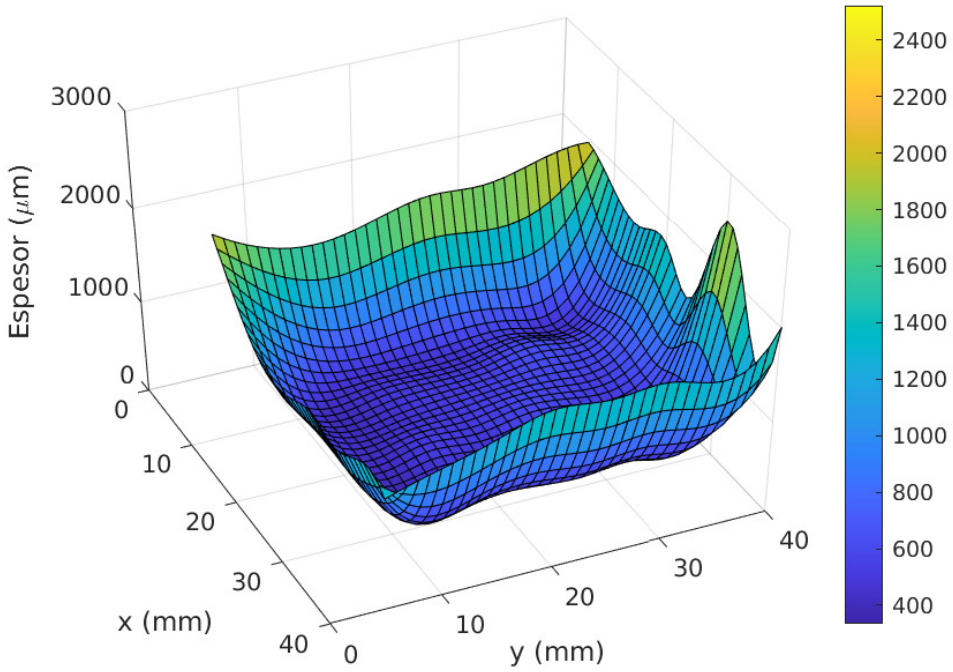
PIEZA 200717



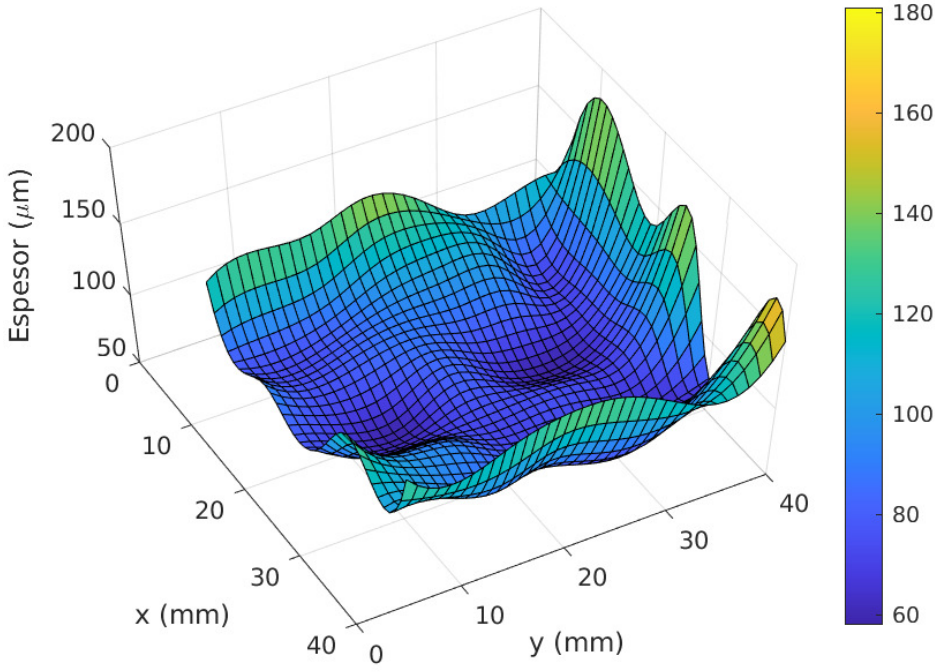
PIEZA 210119



PIEZA 191216

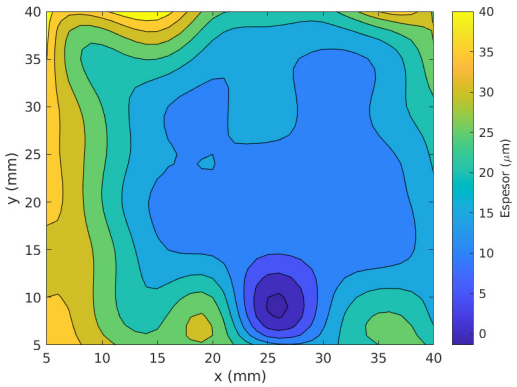


PIEZA 200120

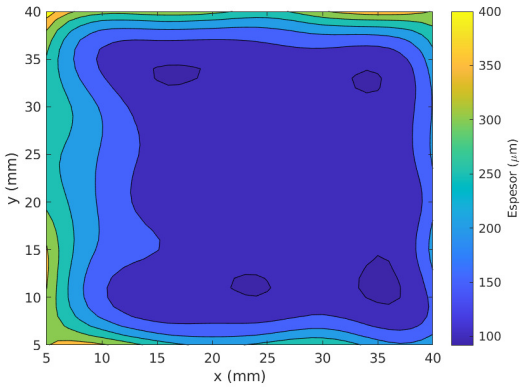


I.6. GRÁFICAS DE DISTRIBUCIÓN SUPERFICIAL DE ESPESORES.

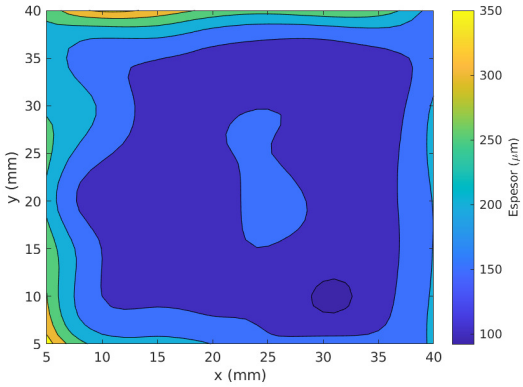
PIEZA 191105



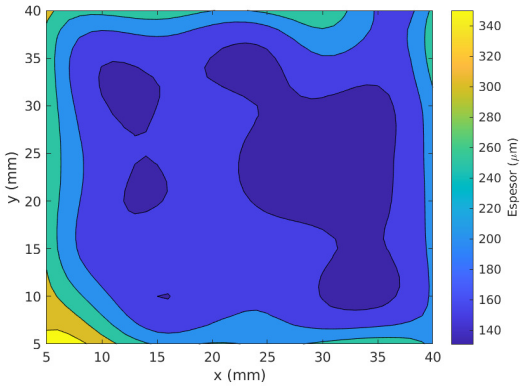
PIEZA 191113



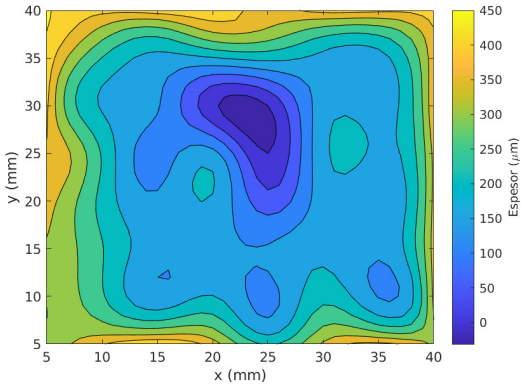
PIEZA 191204



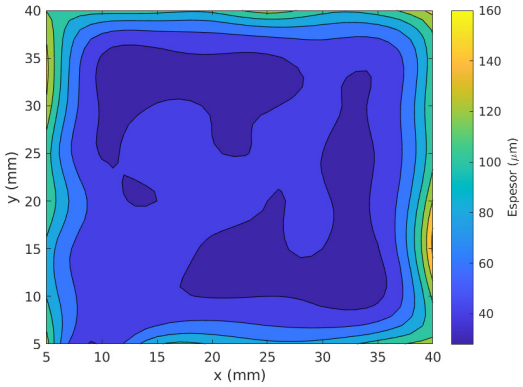
PIEZA 191212



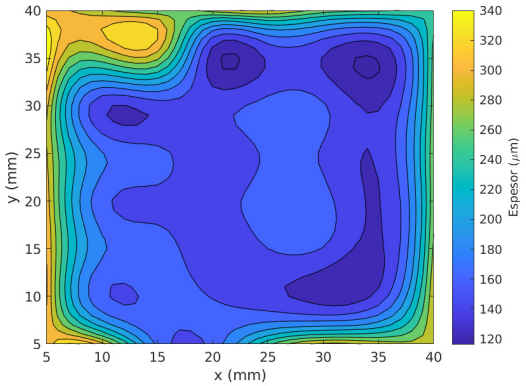
PIEZA 200706



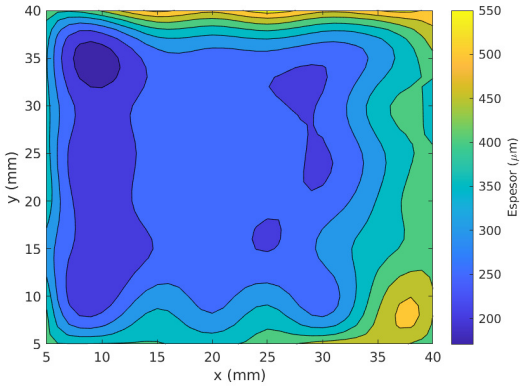
PIEZA 200922



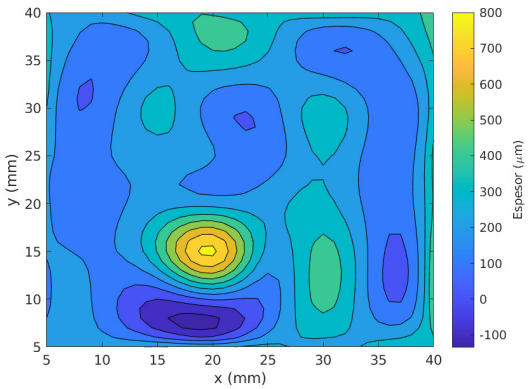
PIEZA 200714



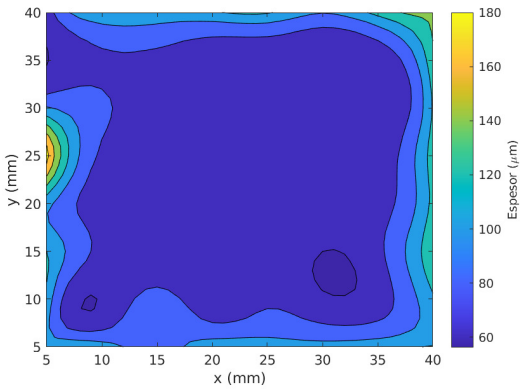
PIEZA 200715



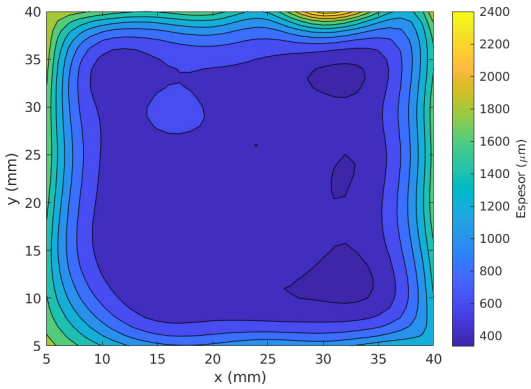
PIEZA 200717



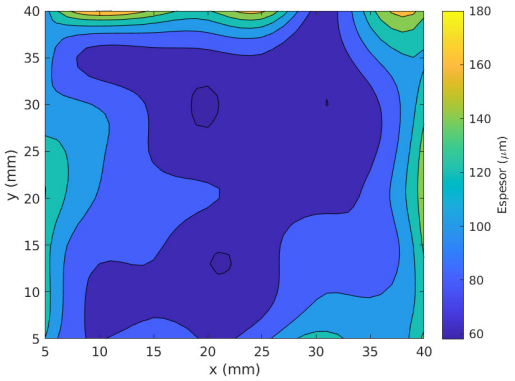
PIEZA 210119



PIEZA 191216

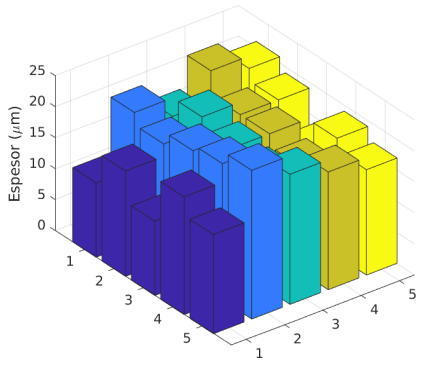


PIEZA 210120

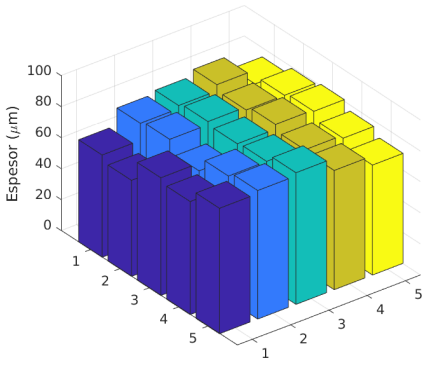


I.7. GRÁFICAS DE ESPESOR EN FONDOS DE LAS CAVIDADES SEMIESFÉRICAS.

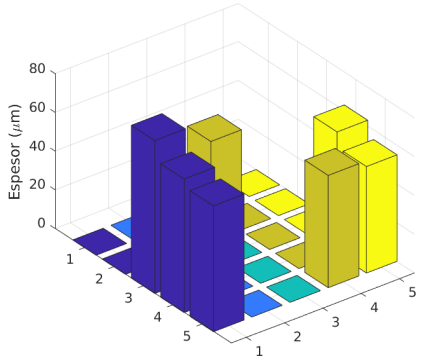
PIEZA 191105



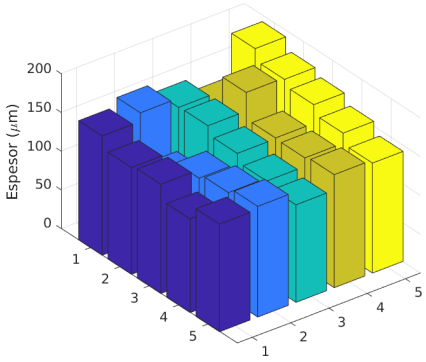
PIEZA 191113



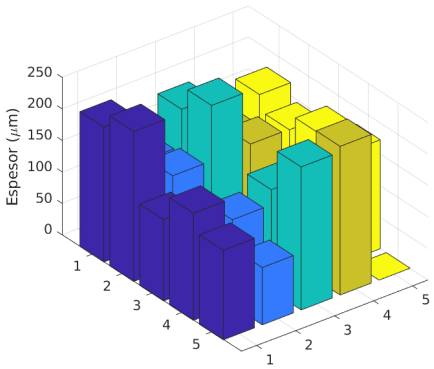
PIEZA 191204



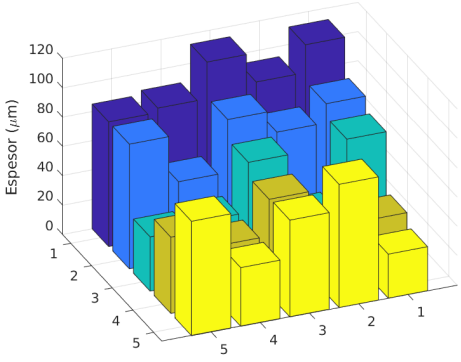
PIEZA 191212



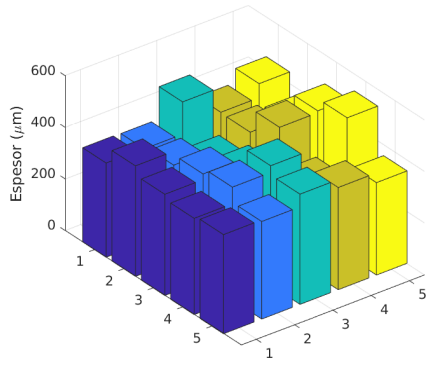
PIEZA 200706

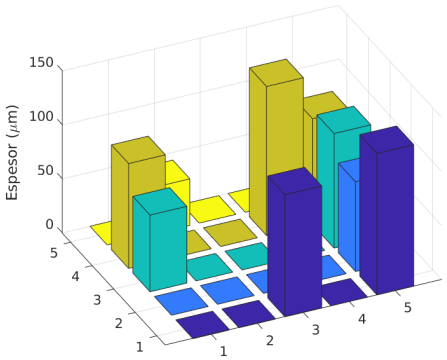


PIEZA 200922

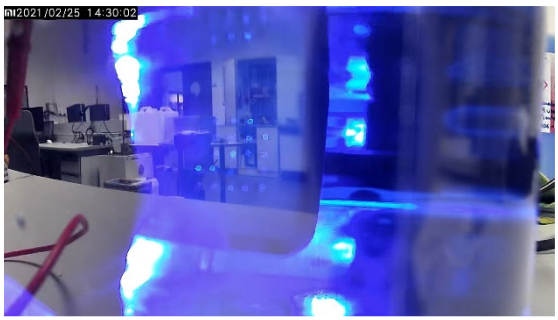


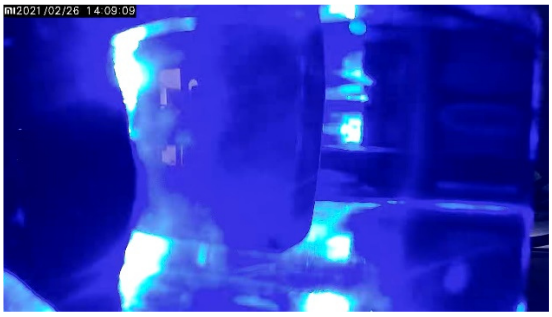
PIEZA 191216	PIEZA 210120





I.8. EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE DEPOSICIÓN EN SECUENCIA DE IMÁGENES CAPTADAS POR EL SISTEMA DE VIGILANCIA PARA LA PIEZA.

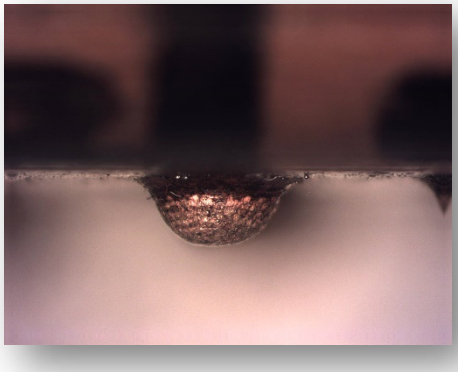




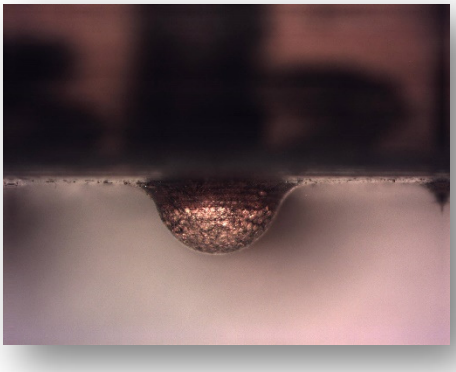
I.9. VISTA AL MICROSCOPIO DE LAS CÁSCARAS DURANTE EL PROCESO EDM.

ANTES DE COMENZAR LOS ENSAYOS

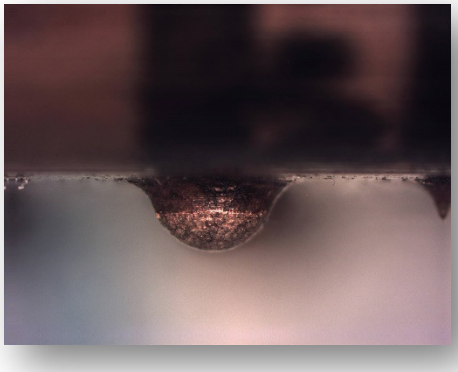
Semiesfera 1 – vista lateral (20x)



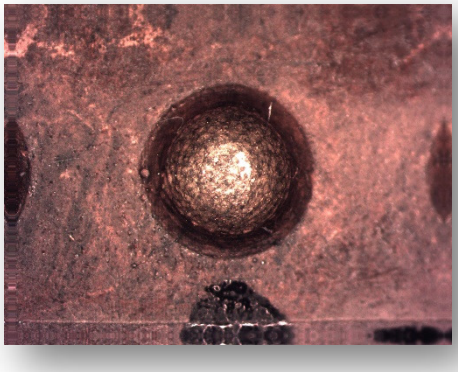
Semiesfera 2 – vista lateral (20x)



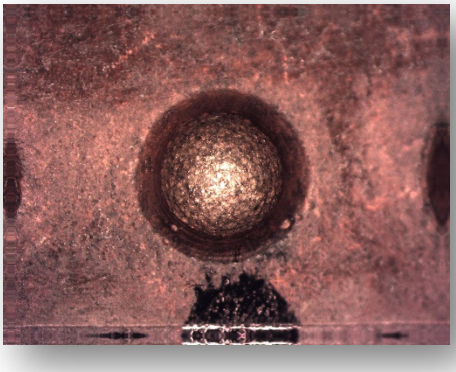
Semiesfera 3 – vista lateral (20x)



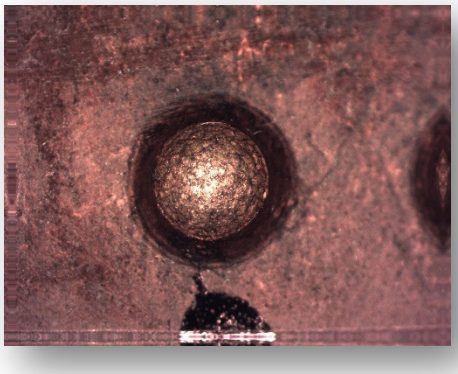
Semiesfera 1 – vista superior (20x)



Semiesfera 2 – vista superior (20x)

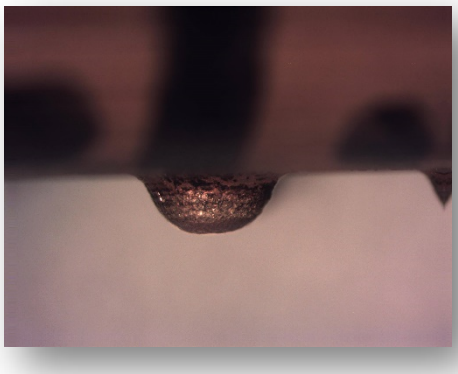


Semiesfera 3 – vista superior (20x)

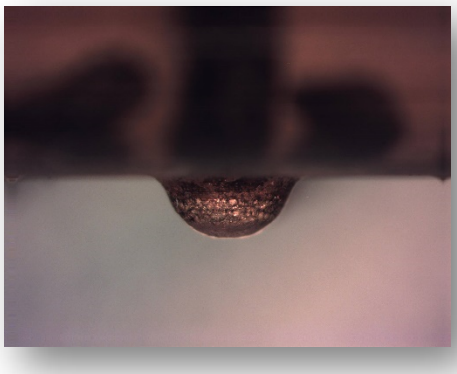


ENSAYO 1

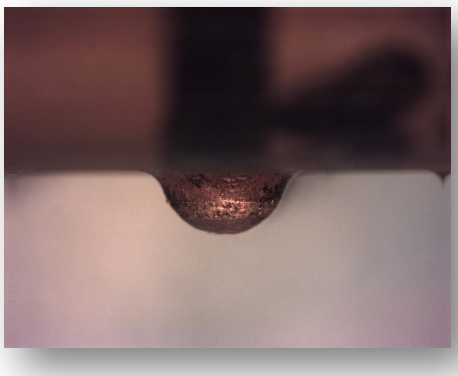
Semiesfera 1 – vista lateral (20x)



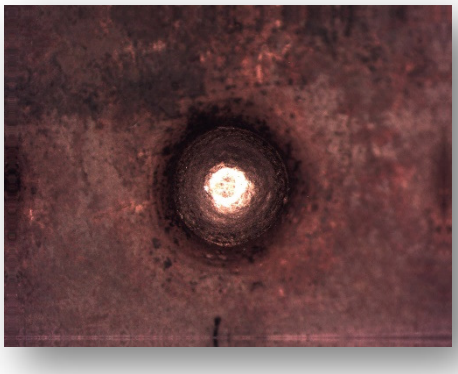
Semiesfera 2 – vista lateral (20x)



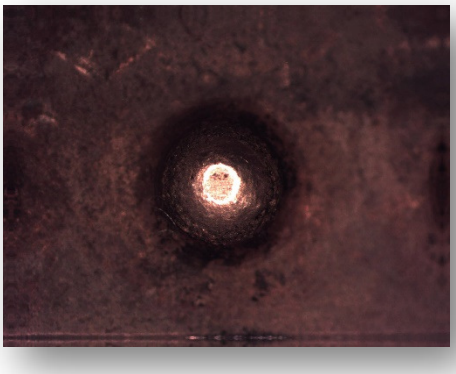
Semiesfera 3 – vista lateral (20x)



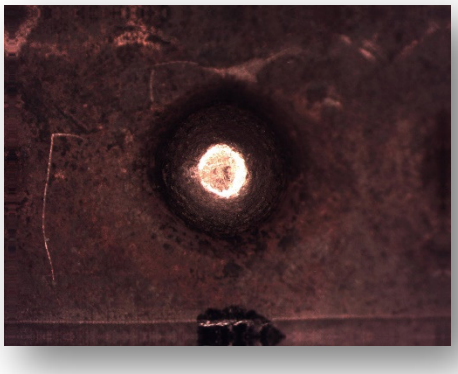
Semiesfera 1 – vista superior (20x)



Semiesfera 2 – vista superior (20x)

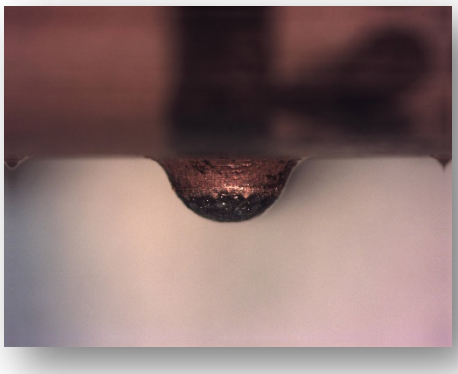


Semiesfera 3 – vista superior (20x)

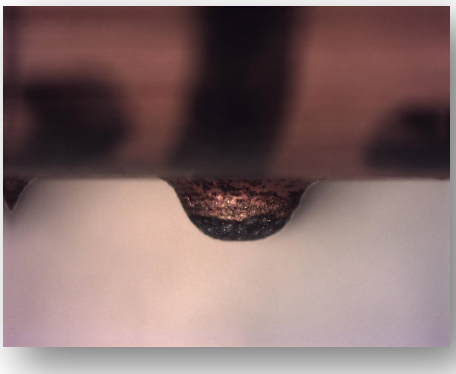


ENSAYO 2

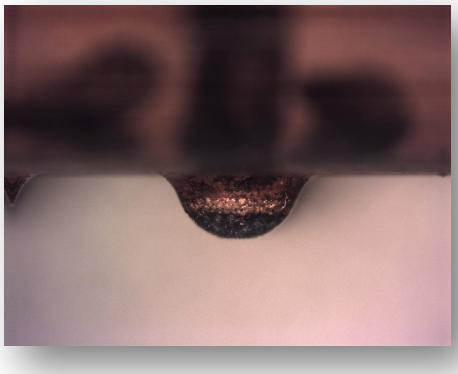
Semiesfera 1 – vista lateral (20x)



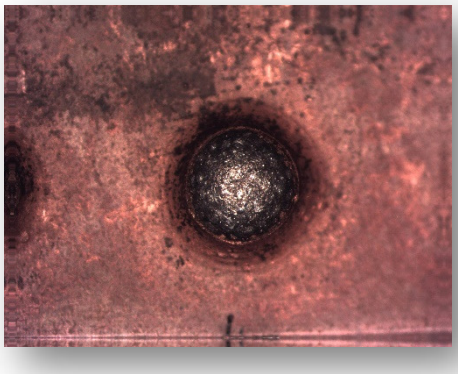
Semiesfera 2 – vista lateral (20x)



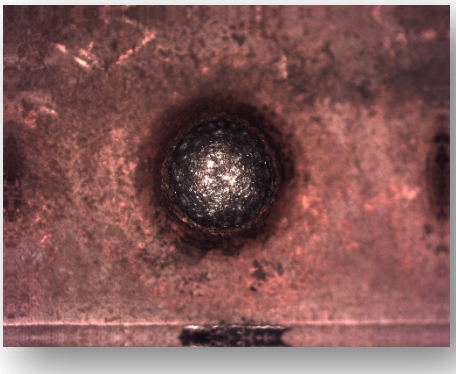
Semiesfera 3 – vista lateral (20x)



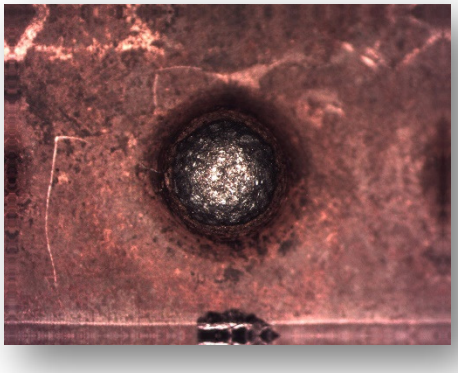
Semiesfera 1 – vista superior (20x)



Semiesfera 2 – vista superior (20x)

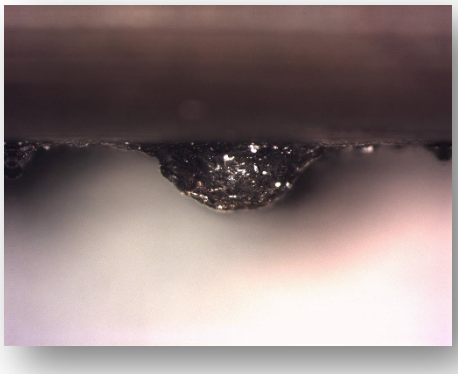


Semiesfera 3 – vista superior (20x)

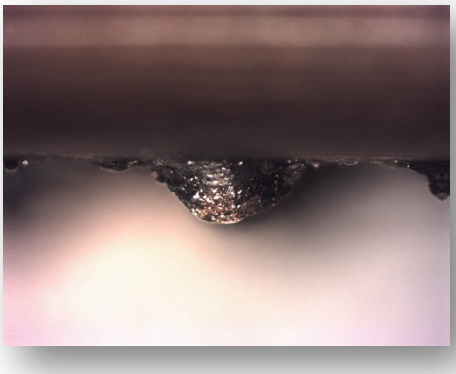


ENSAYO 3

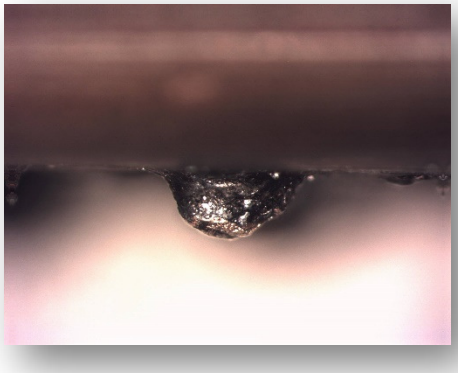
Semiesfera 1 – vista lateral (20x)



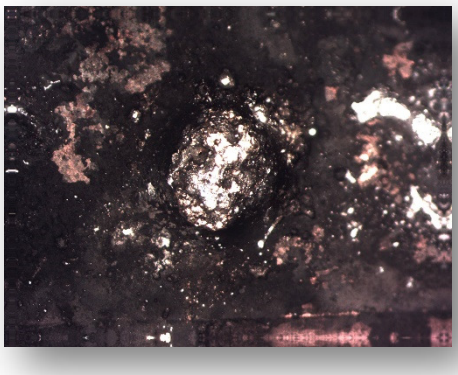
Semiesfera 2 – vista lateral (20x)



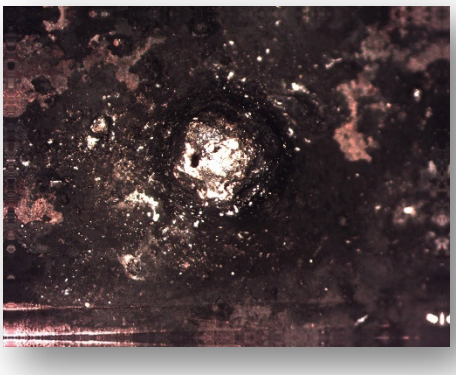
Semiesfera 3 – vista lateral (20x)



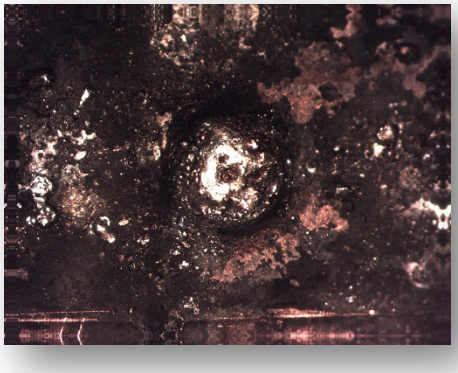
Semiesfera 1 – vista superior (20x)



Semiesfera 2 – vista superior (20x)



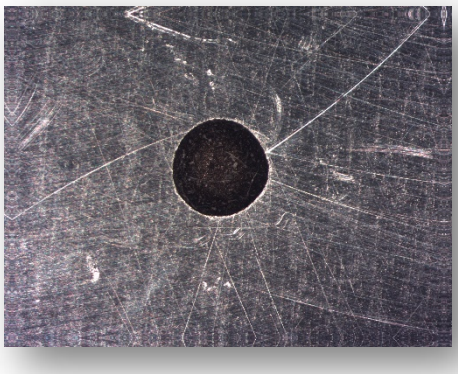
Semiesfera 3 – vista superior (20x)



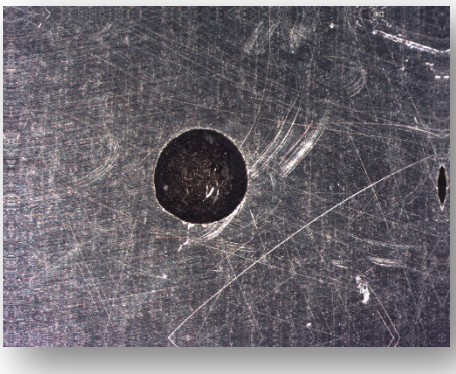
I.10. DETALLES AL MICROSCOPIO DE LAS PROBETAS ELECTRO EROSIONADAS.

ENSAYO 1

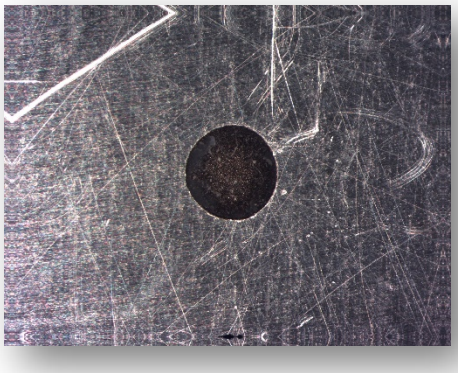
Semiesfera 1 (20x)



Semiesfera 2 (20x)

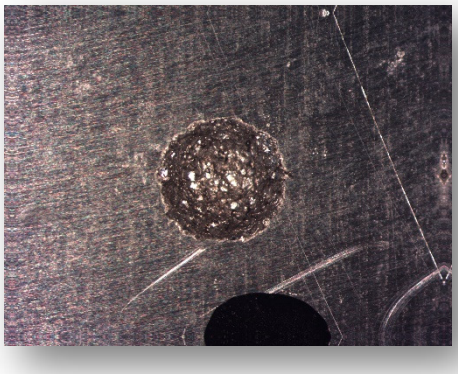


Semiesfera 3 (20x)

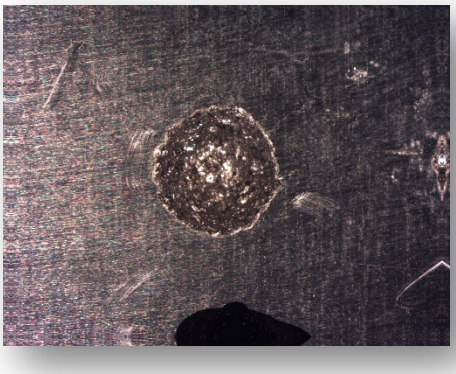


ENSAYO 2

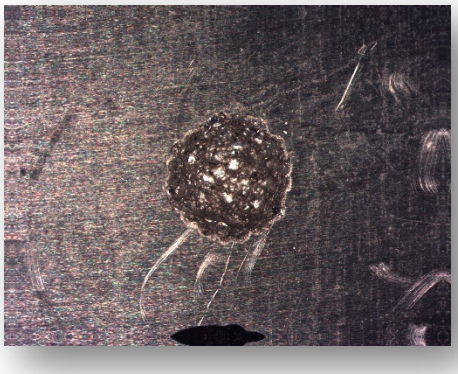
Semiesfera 1 (20x)



Semiesfera 2 (20x)

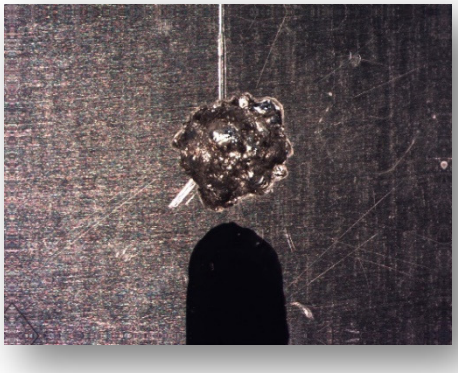


Semiesfera 3 (20x)

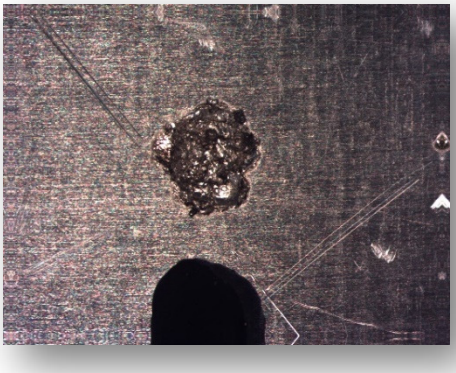


ENSAYO 3

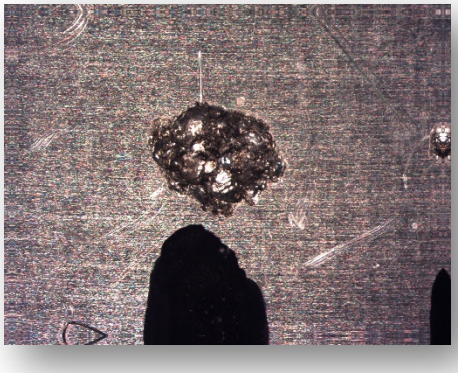
Semiesfera 1 (20x)



Semiesfera 2 (20x)



Semiesfera 3 (20x)



ANEXO II

CÓDIGOS FUENTE DE PROGRAMACIÓN

Anexo II. CÓDIGOS FUENTE DE PROGRAMACIÓN.

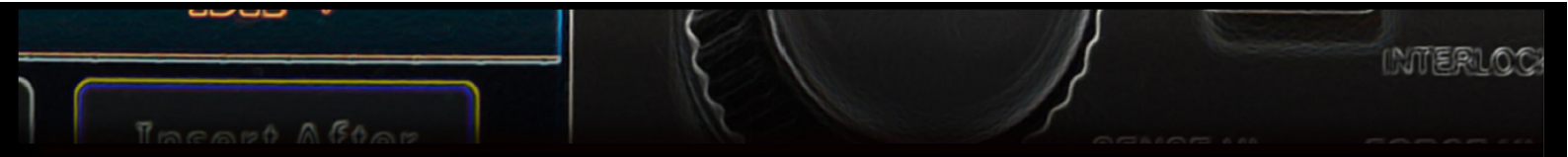
II.1. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO KEITHKEY 2460 SOURCEMETER® PARA EL ENSAYO TIPO 2.

```
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)

-- 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, 4.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 1.000000e-01)
smu.source.configlist.set("500mV", 1, smu.FUNC_DC_VOLTAGE,
smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL, 9.000000e-01, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 5.000000e-01)
smu.source.configlist.set("1V", 1, smu.FUNC_DC_VOLTAGE,
smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL, 9.000000e-01, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 1.000000e+00)
smu.source.configlist.set("900mA", 1, smu.FUNC_DC_CURRENT,
smu.ATTR_SRC_LIMIT_LEVEL, 4.000000e+00, smu.ATTR_SRC_LEVEL, 9.000000e-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, buffer1,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(5, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 300)
trigger.model.setblock(6, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer1, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(7, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "500mV", 1,
"measurelist2", 1)
trigger.model.setblock(8, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "500mV", "measurelist2")
trigger.model.setblock(9, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)
```

```
trigger.model.setblock(10, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(11, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(12, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(13, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(14, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(15, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(16, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(17, trigger.BLOCK_BRANCH_COUNTER, 10, 13)
trigger.model.setblock(18, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(19, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(20, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(21, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer2, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(22, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "1V", 1,
"measurelist2", 1)
trigger.model.setblock(23, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "1V", "measurelist2")
trigger.model.setblock(24, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)
trigger.model.setblock(25, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(26, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(27, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(28, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(29, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(30, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(31, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(32, trigger.BLOCK_BRANCH_COUNTER, 4, 28)
trigger.model.setblock(33, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(34, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3,
trigger.COUNT_INFINITE)
```

```
trigger.model.setblock(35, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(36, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer3, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(37, trigger.BLOCK_CONFIG_RECALL, "900mA", 1,
"measurelist1", 1)
trigger.model.setblock(38, trigger.BLOCK_CONFIG_NEXT, "900mA", "measurelist1")
trigger.model.setblock(39, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.ON)
trigger.model.setblock(40, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(41, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(42, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(43, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(44, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(45, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(46, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(47, trigger.BLOCK_BRANCH_COUNTER, 4, 43)
trigger.model.setblock(48, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 600)
trigger.model.setblock(49, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4,
trigger.COUNT_INFINITE)
trigger.model.setblock(50, trigger.BLOCK_DELAY_CONSTANT, 900)
trigger.model.setblock(51, trigger.BLOCK_MEASURE, buffer4, trigger.COUNT_STOP)
trigger.model.setblock(52, trigger.BLOCK_SOURCE_OUTPUT, smu.OFF)
```



II.2. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL DCAB PROGRAMADO EN EL ARDUINO NANO.

```
/* Proyecto de sistema de control de bombeo de electrodeposición en base a la intensidad
 * JIRJ 26/09/2020
 * ver 1.1
 * PINES ARDUINO:
 * Sensor de intensidad
 *   A0 conexión OUT del sensor de intensidad
 *   Botones de ajuste intensidad de referencia Iref
 *   D10 conección IN del botón de subida de Iref
 *   D13 Conección IN del botón de bajada de Iref
 * Puente H del motor L298NH, HW-095
 *   D3 ENB del puente H del motor (Activa o desactiva el motor)
 *   D4 IN4 del puente H del motor (controla el sentido de giro)
 *   D5 IN3 del puente H del motor (controla el sentido de giro)
 * LCD modelo (20x2) WH2002A-YYH-JT
 *   D12 LCD RS pin to digital pin 12
 *   D11 LCD Enable pin to digital pin 11
 *   D6 LCD pin to digital pin 6
 *   D7 LCD pin to digital pin 7
 *   D8 LCD pin to digital pin 8
 *   D9 LCD pin to digital pin 9
 *   LCD R/W pin to ground
```

```
 *    LCD VSS pin to ground
 *    LCD VCC pin to 5V
 */
#include <LiquidCrystal.h>
// initialize the library with the numbers of the interfpantalla LCD ce pins.
LiquidCrystal lcd(12, 11, 6, 7, 8, 9);
int IN3 = 5;  // Input3 conectada al pin 5
int IN4 = 4;  // Input4 conectada al pin 4
int ENB = 3;  // ENB conectada al pin 3 de Arduino
int control = 0;
int muestra =1000;  //Número de lecturas por muestra
float correccion = 0;  //Corrección lineal de lecturas de corriente (c_a * lectura ^2 + c_b * lectura
+ c)
float c_a = 0.02768739;   // valor 'a' de la ecuación de corrección
float c_b = -0.075806644; // valor 'b' de la ecuación de corrección
float c_c = 0.061455351;  // valor 'c' de la ecuación de corrección
float voltaje = 0;  //Variable lectura del sensor
int analogPin = 0;  // Pin lectura corriente
float Sensibilidad = 0.185; //sensibilidad en Voltio/Amperio para el sensor
// 0.185 para sensor de 5A
// 0.100 para 20A
// 0.066 para 30A
int inicio;
```

```
int modo = 1; //Control del modo de trabajo del sistema. Iniciado en control de potencia de la bomba.
float corriente; //Variable de almacenamiento del valor de la corriente del baño
float potencia = 76.5; // Valor inicial de potencia del motor (0-255)
float i_nominal = 0.10; // Valor de consigna del baño
long tiempo;  //Variable para el Control de tiempo en los retardos
long contador; //Variable para Control de tiempo


void setup() {
 Serial.begin(9600);
 pinMode (ENB, OUTPUT);   // Salida potencia del motor conectada al pin 3
 pinMode (IN4, OUTPUT);   // Input4 conectada al pin 4
 pinMode (IN3, OUTPUT);   // Input3 conectada al pin 5
 pinMode (13, INPUT);     // Pin del botón subida Iref
 pinMode (10, INPUT);     // Pin del botón bajada Iref


 // Arranca motor
  digitalWrite (IN4, HIGH);
  digitalWrite (IN3, LOW);
  for (int i = 25.5; i < potencia; i++)
  {
analogWrite(ENB,i);    delay (25);
  }
  lcd.begin(20, 2);// Configura la pantalla LCD
```

```
}


void loop() {
 if (digitalRead (10) == HIGH && digitalRead (13) == HIGH) {
   modo = modo + 1;
   lcd.begin(20, 2);
   limpia_LCD();
   if (modo == 2) modo = 0;
   if (modo == 0) {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("ATENCION: Cambiando");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("a modo automatico.");
   }
   else {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("ATENCION: Cambiando");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("a modo manual.");
   }
   delay (3000);
   limpia_LCD();
 }
```

```
switch (modo){
 case 0:// modo automático
  Lee_i(); //Lee el valor de intensidad
  if (digitalRead (10) == HIGH && digitalRead (13) == LOW) configura_corriente();
  if (digitalRead (10) == LOW && digitalRead (13) == HIGH) configura_corriente();
  if (potencia < 25.5) potencia = 25.5;
  if (corriente < i_nominal * 0.8) {
   control = 0;
   sube_vel();
  }
  if (corriente > i_nominal * 1.2) {
   control = 0;
   baja_vel();
  }
  modo_autoLCD();
 break;
 case 1://modo ajuste manual
  while (digitalRead (10) == LOW && digitalRead (13) == LOW){
  modo_manLCD();
  delay (100);
  }
  if (digitalRead (10) == HIGH) {
   potencia = potencia + 1;
  }
```

```
    if (digitalRead (13) == HIGH) {
      potencia = potencia - 1;
    }
    if (potencia < 0) potencia = 0;
    if (potencia > 255) potencia = 255;
    analogWrite(ENB,potencia);
    modo_manLCD();
    delay (100);
   break;
  }
}

void Lee_i (){
  for (int i = 0; i < muestra; i++)
  {
    voltaje = analogRead(analogPin) * 5.0 / 1023;
    corriente = corriente +((voltaje - 2.5) / Sensibilidad);
  }
  corriente = (corriente / muestra);
  correccion = (c_a * corriente)*(c_a * corriente)  + c_b * corriente + c_c;
  corriente = corriente + correccion;
  if (potencia >= 255 && control == 0) {
   potencia = 255;
   modo_autoLCD();
```

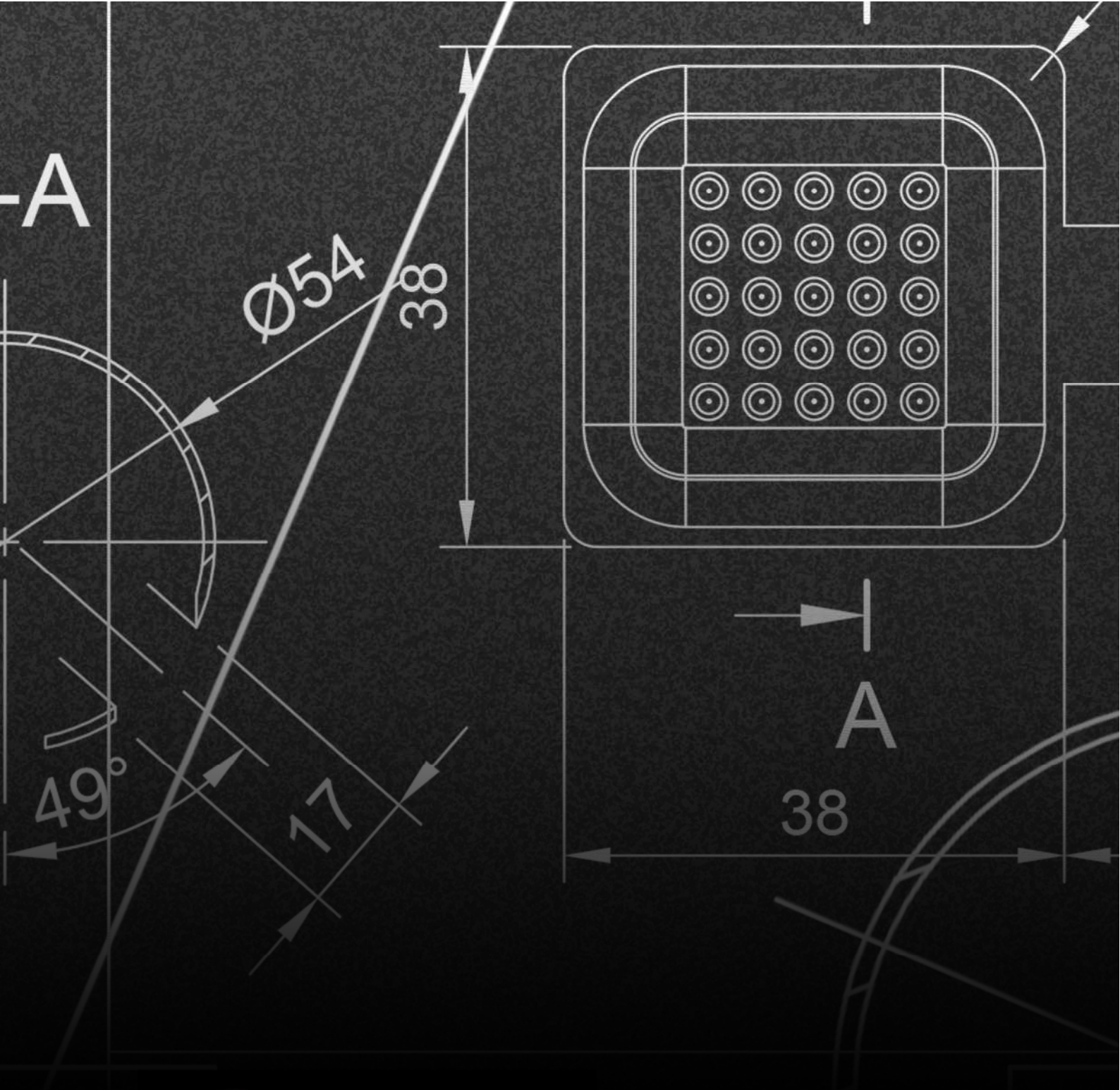
```
   control = 1;
   }
  else {
     if (potencia < 255 && potencia > 25.5){
       control = 0;
       modo_autoLCD();
     }
     else {
       potencia = 25.5;
       control = 1;
     }
   }
  delay(100);
}


void sube_vel(){
  if (control == 0 ){
     inicio = potencia;
     potencia = potencia * 1.1;
     if (potencia > 255) potencia = 255;
     for (int i = inicio; i< potencia; i++){
        analogWrite(ENB,i);
        delay (25);
     }
```

```
    tiempo=0;
    contador=millis();
    while (tiempo<5000 && digitalRead (10) == LOW && digitalRead (13) == LOW){
    tiempo = millis()-contador;
  }
   }
}

void baja_vel(){
 if (control == 0 && potencia > 25.5){
    int inicio = potencia;
    potencia = potencia * 0.9;
    for (int i = inicio; i > potencia; i--){
      analogWrite(ENB,i);
      delay (25);
    }
  tiempo=0;
  contador=millis();
  while (tiempo<5000 && digitalRead (10) == LOW && digitalRead (13) == LOW){
   tiempo = millis()-contador;
  }
 }
 else {
    potencia = 25.5;
```

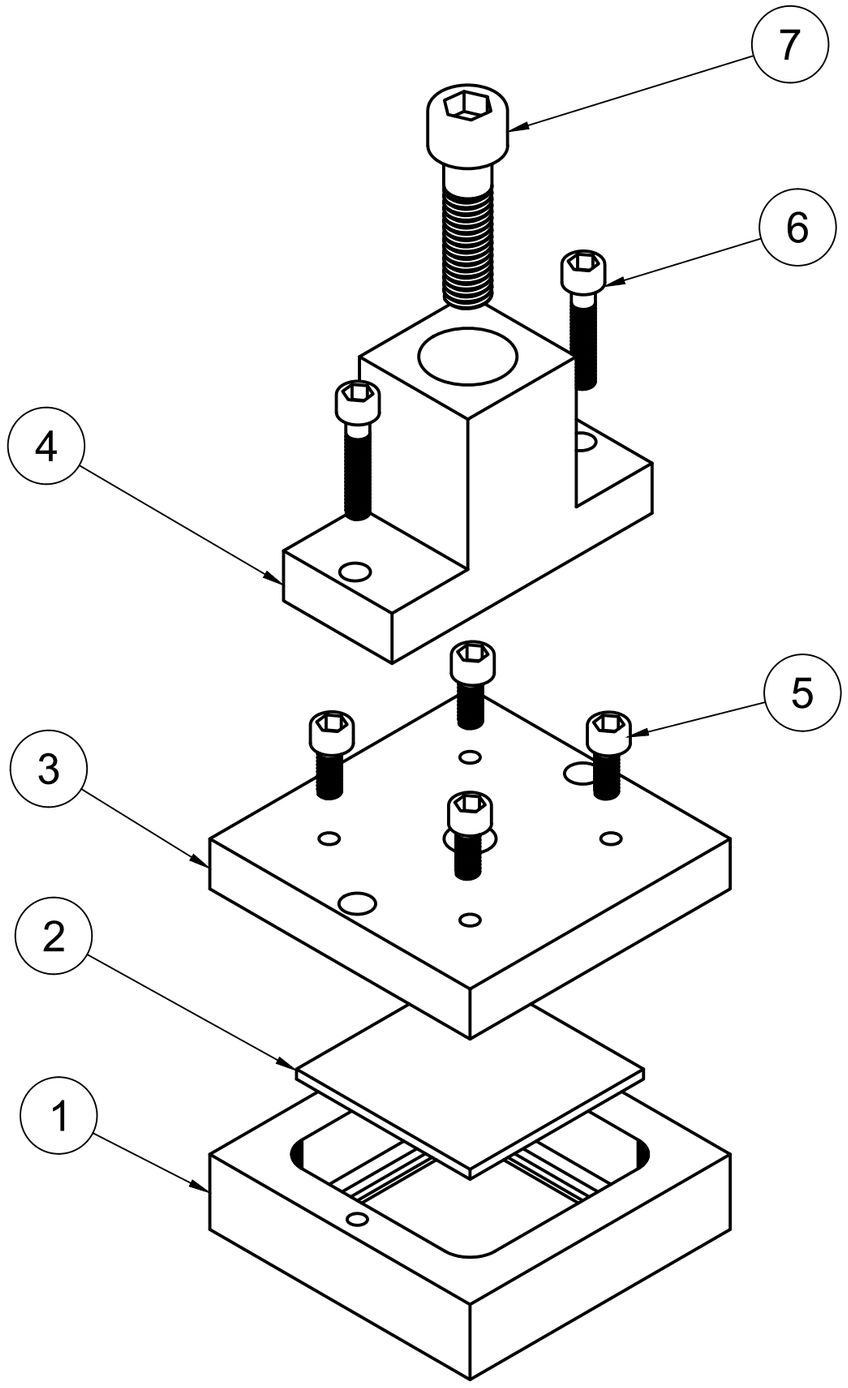
```
    control = 1;
  }
  }
void configura_corriente(){
  // limpia pantalla
  limpia_LCD();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Corriente de Ref:");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(i_nominal&&"A");
  tiempo=0;
  contador=millis();
  while (tiempo<2000){
   // espera a que se pulse el algún botón o se acabe el tiempo
   tiempo = millis()-contador;
   if (digitalRead (10) == HIGH) {
    tiempo=0;
    contador=millis();
    i_nominal = i_nominal + 0.01;
   }
   if (digitalRead (13) == HIGH) {
    tiempo=0;
    contador=millis();
    i_nominal = i_nominal - 0.01;
```

```
    }
  delay(100);
  if (i_nominal <= 0) i_nominal = 0;
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(i_nominal);
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print("A");
  }
limpia_LCD();
modo_autoLCD();
}

void modo_autoLCD(){
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.write("I: ");
      lcd.setCursor(2,0);
      lcd.print(corriente);
      lcd.setCursor(7,0);
      lcd.write("A");
      lcd.setCursor(9,0);
      lcd.write("Iref: ");
      lcd.setCursor(15,0);
      lcd.print(i_nominal);
      lcd.setCursor(19,0);
```

```
        lcd.write("A");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.write("Potencia: ");
        lcd.setCursor(10,1);
        lcd.print(potencia * 100 / 255);
        lcd.setCursor(15,1);
        lcd.write((char)37);
}

void modo_manLCD(){
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.write("Potencia: ");
        lcd.setCursor(9,0);
        lcd.print(potencia * 100 / 255);
        lcd.setCursor(14,0);
        lcd.write((char)37);
}
// Subrutina para limpiar pantalla LCD
void limpia_LCD (){
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.write("                ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.write("                ");
}
```



PLANOS

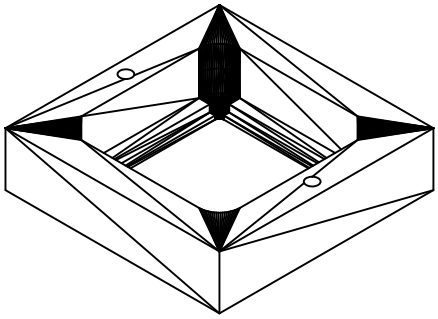


ID	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	PLANO Nº
7	Tornillo DIN912 M8x30	1	Acero inox. A4	-
6	Tornillo DIN912 M4x30	2	Acero inox. A4	-
5	Tornillo DIN912 M4x20	4	Acero inox. A4	-
4	Mecha	1	Aluminio EN-AW5083	5
3	Separador	1	Aluminio EN-AW5083	4
2	Placa de apriete	1	Aluminio EN-AW5083	3
1	Alojamiento	1	Aluminio EN-AW5083	2

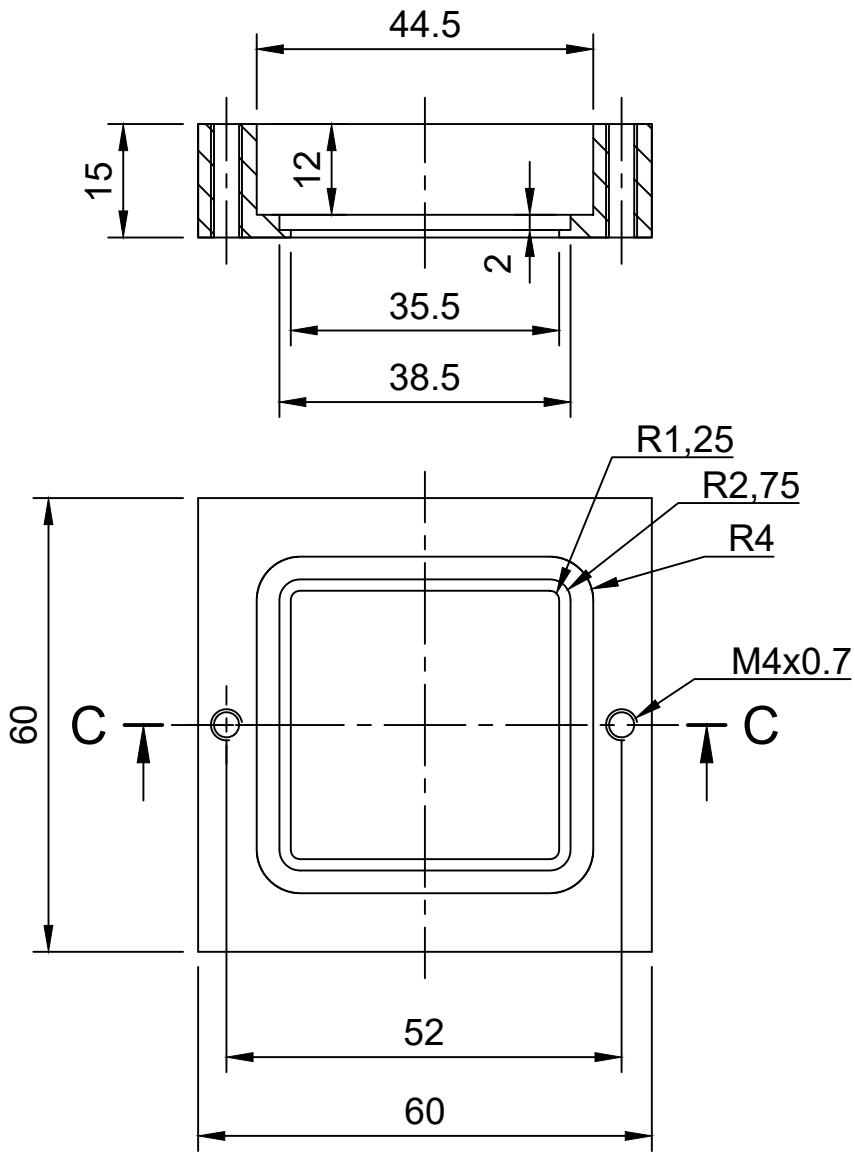
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL

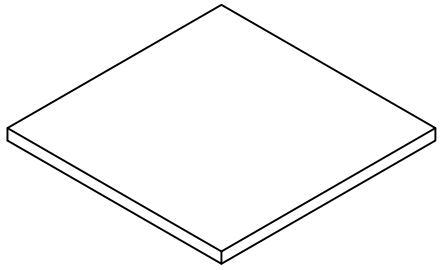
Autor: Carlos J. Sánchez Morales	Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Conjunto		Plano nº: 1	Firma:

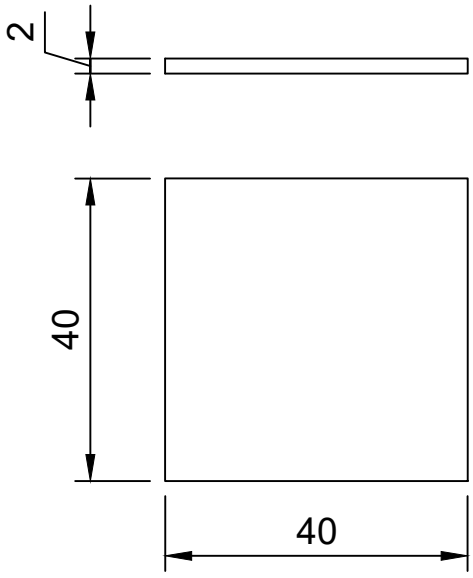


Sección C-C

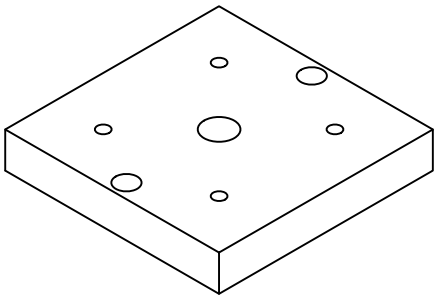


ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Alojamiento	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 2	Firma:

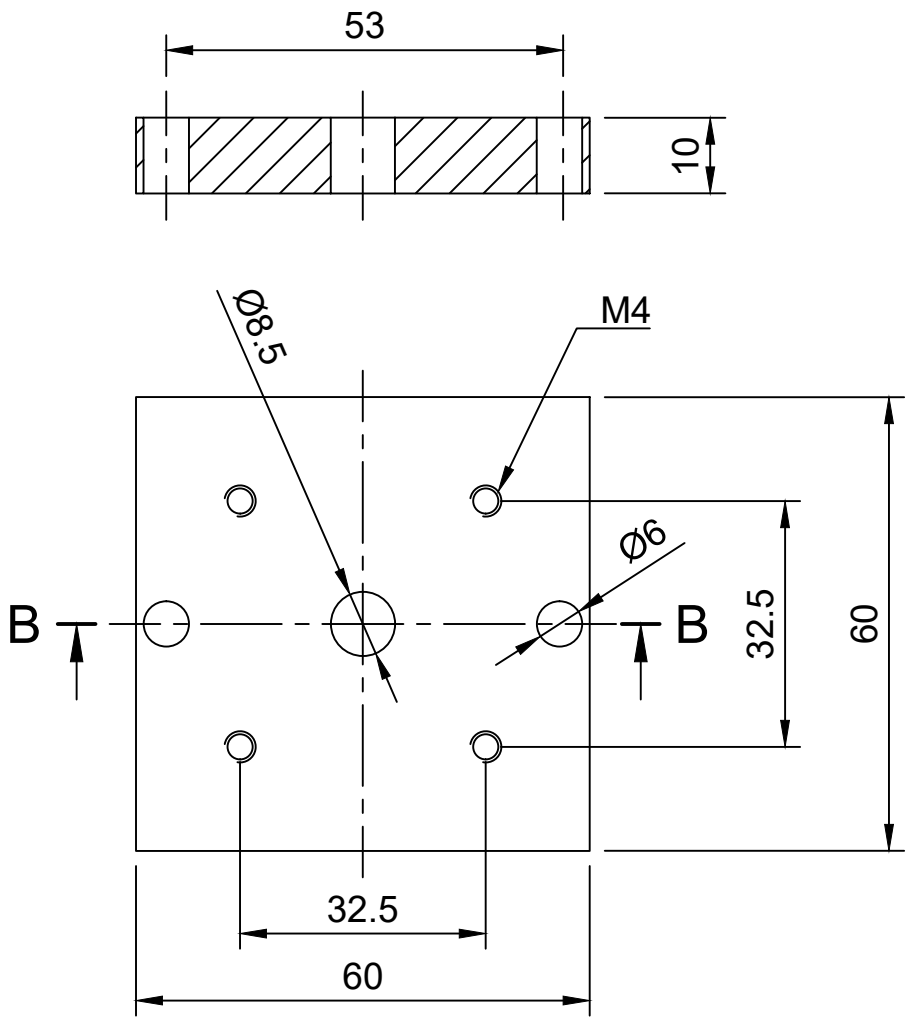




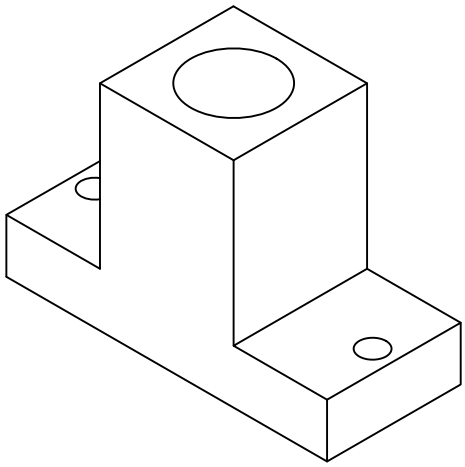
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Placa de apriete	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 3	Firma:



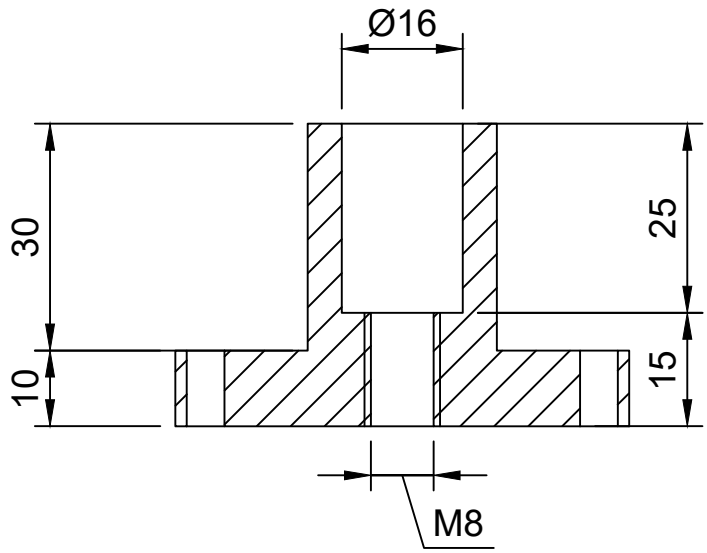
SECCIÓN B-B

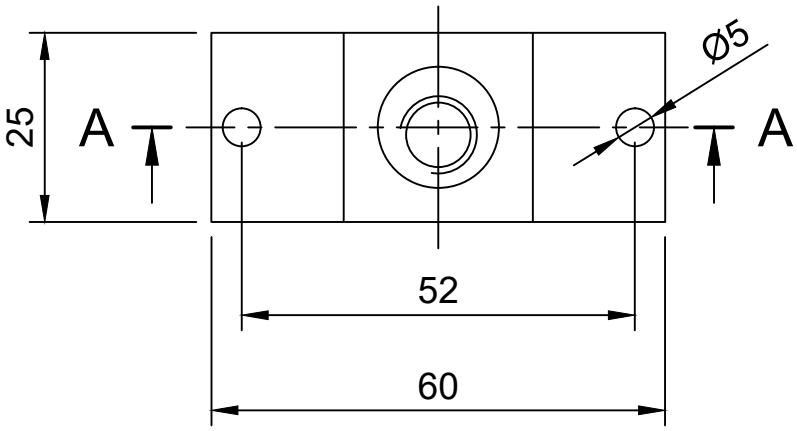


ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Separador	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 4	Firma:

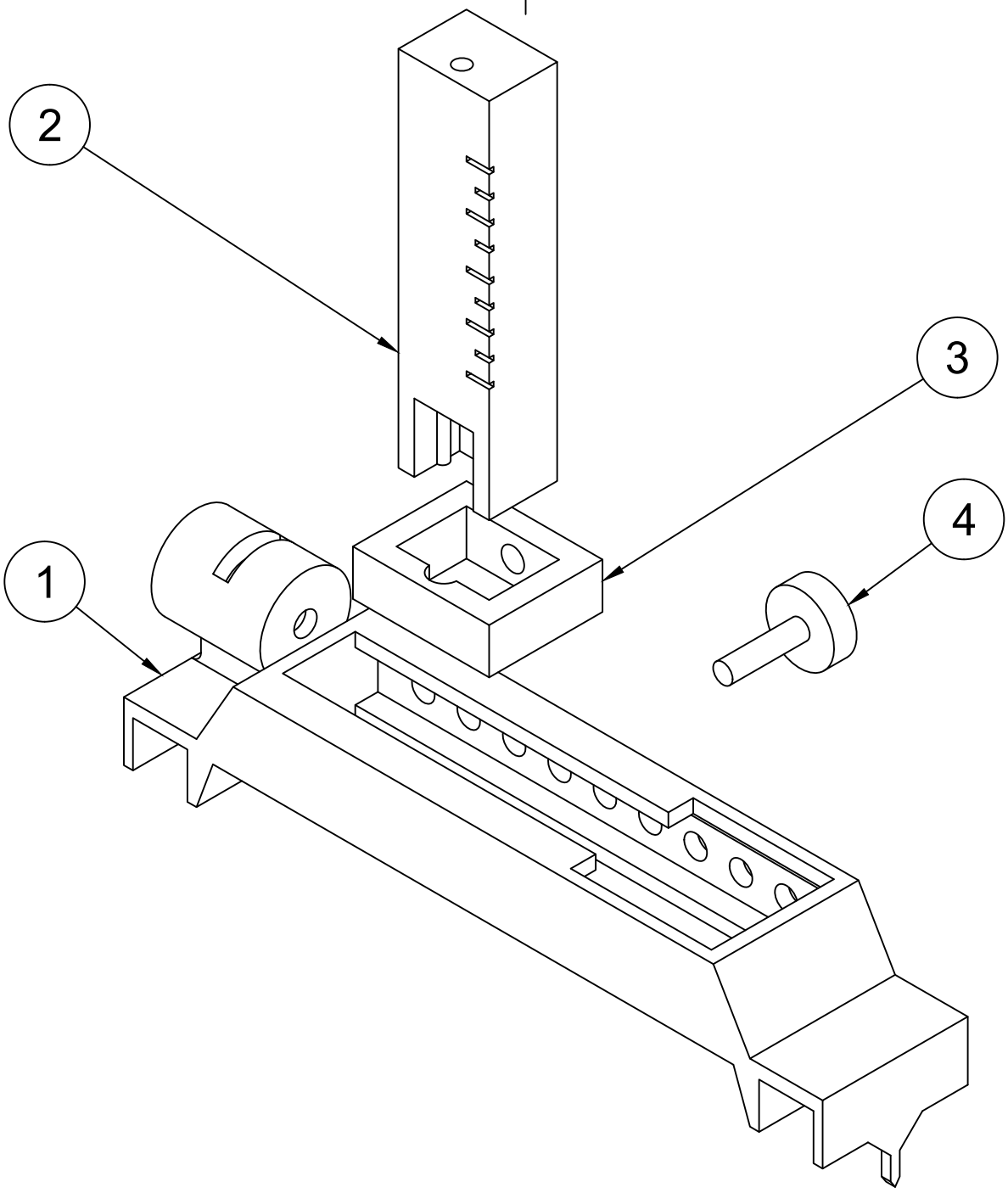


Sección A-A





ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	SOPORTE PARA ELECTRODO FUNCIONAL			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Mecha	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 5	Firma:

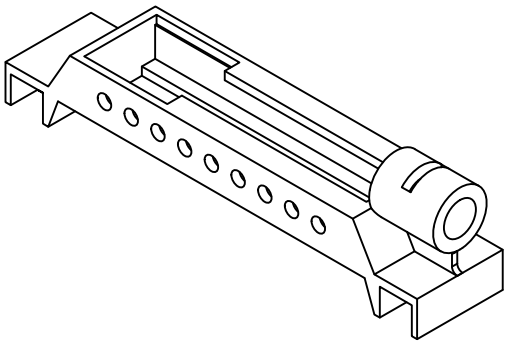


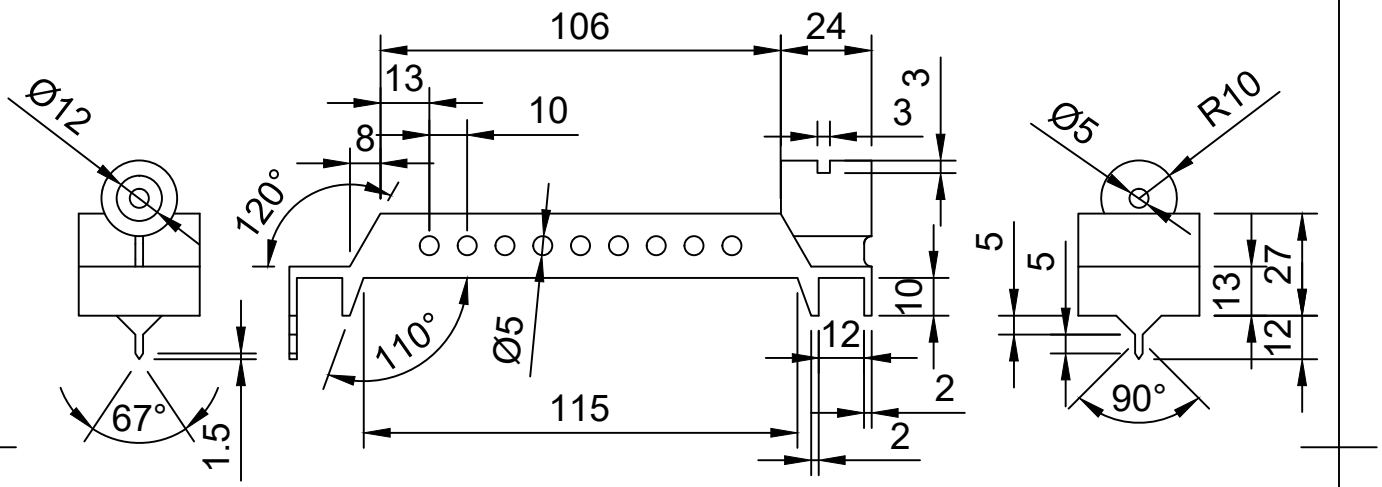
ID	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL	PLANO Nº
4	Bulón de bloqueo	1	PLA	10
3	Anillo de desplazamiento	1	PLA	9
2	Mecha	1	PLA	8
1	Estructura soporte	1	PLA	7

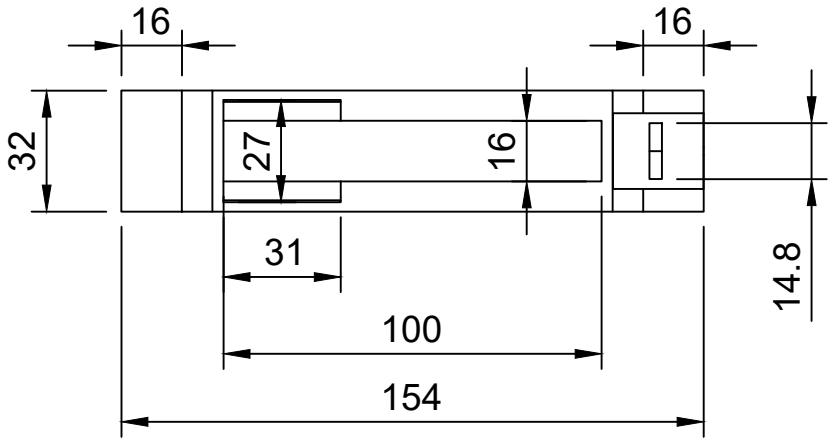
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO.
PUENTE DE SUJECIÓN

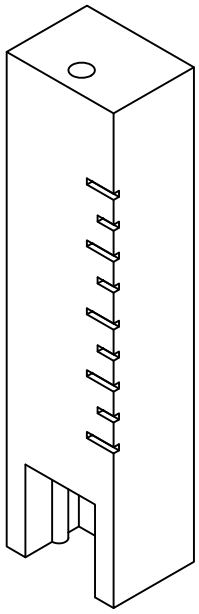
Autor: Carlos J. Sánchez Morales	Cotas en:	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Conjunto		Plano nº: 6	Firma:

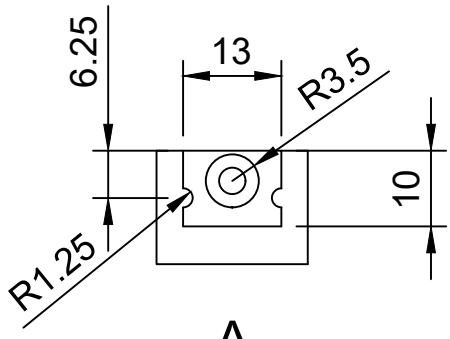


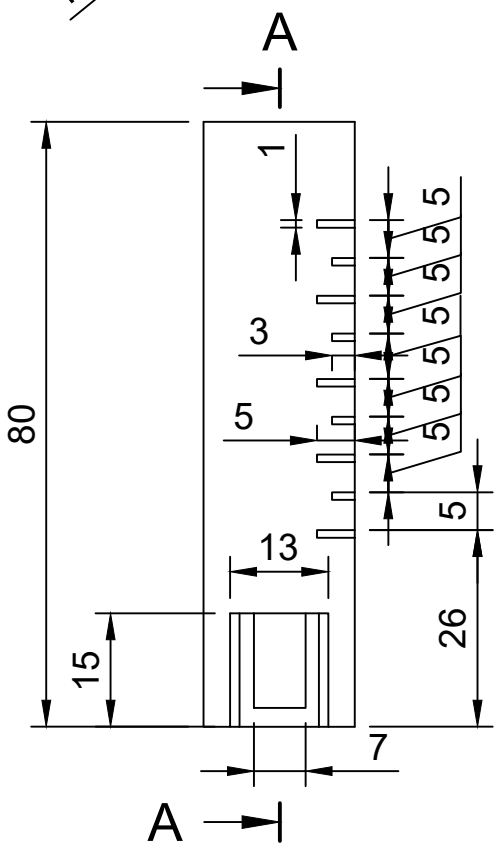


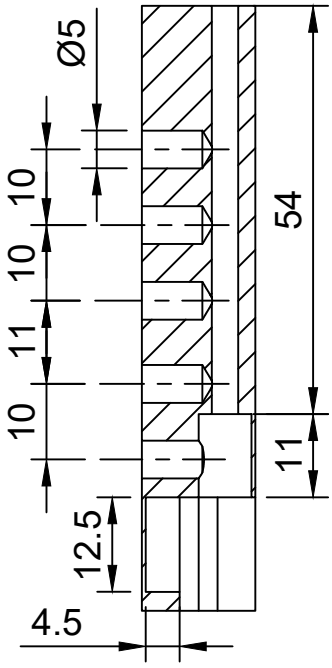


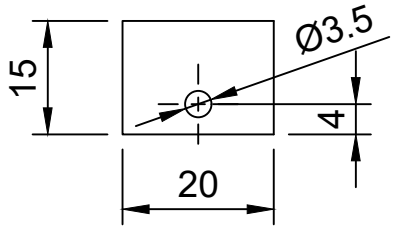
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. PUENTE DE SUJECIÓN		
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:2	Fecha: mayo 2021
Plano de: Estructura soporte	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 7	Firma:



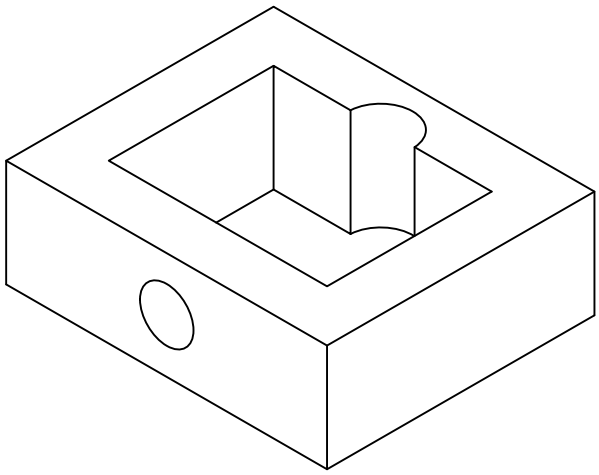


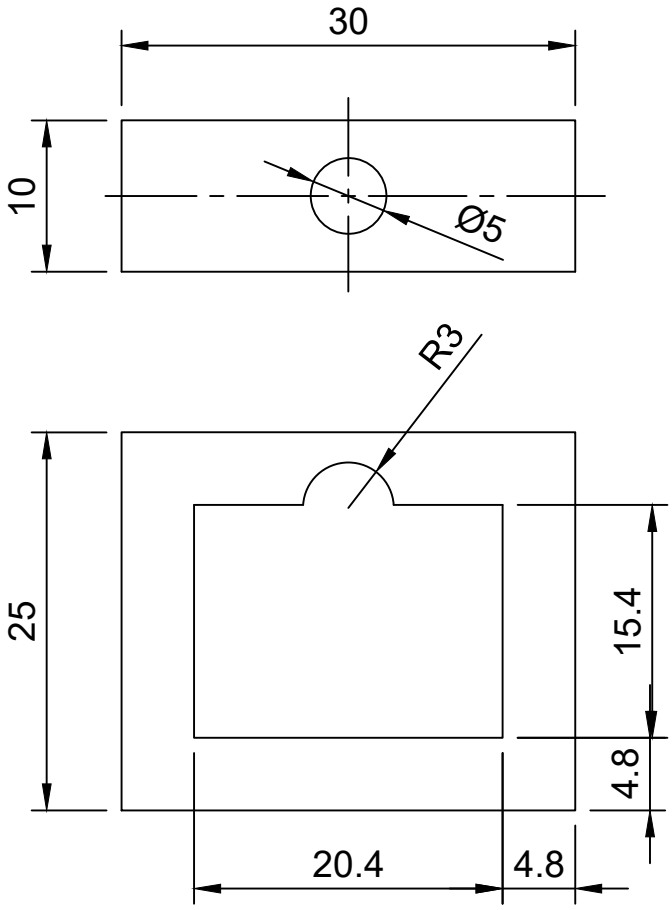


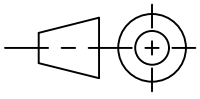


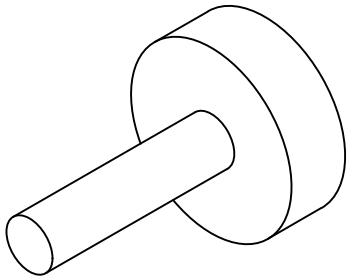


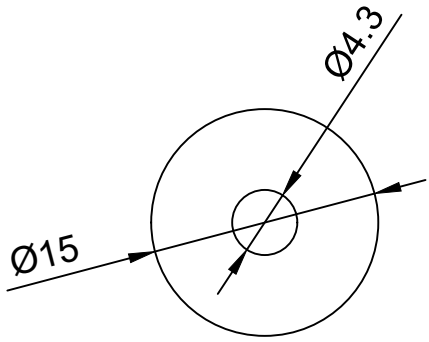
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. PUENTE DE SUJECIÓN		
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1
Fecha: mayo 2021			
Plano de: Mecha	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 8
Firma:			

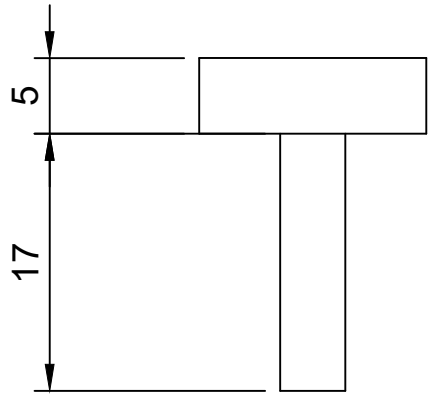


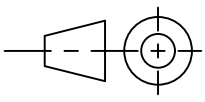


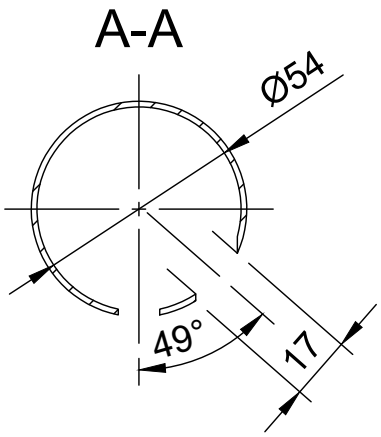
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. PUENTE DE SUJECIÓN		
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Anillo de desplazamiento	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 9	Firma:

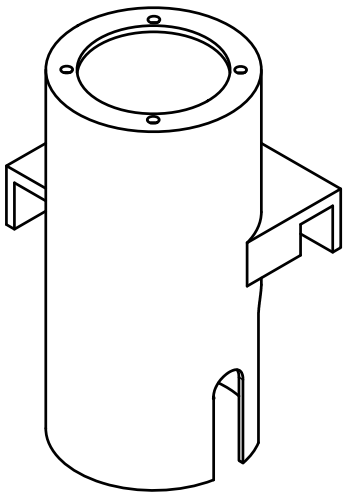


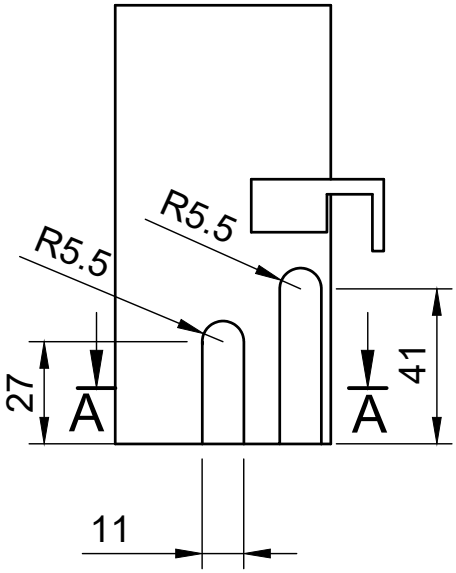


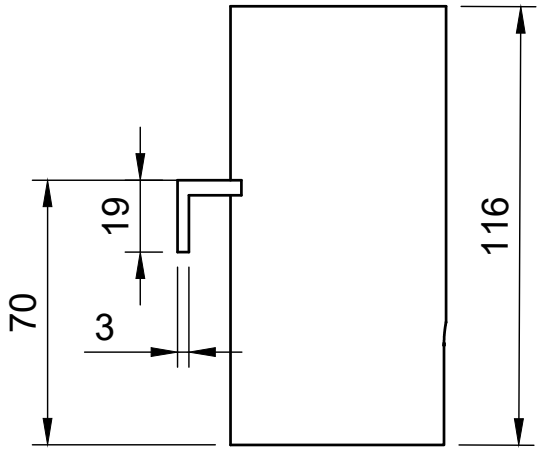


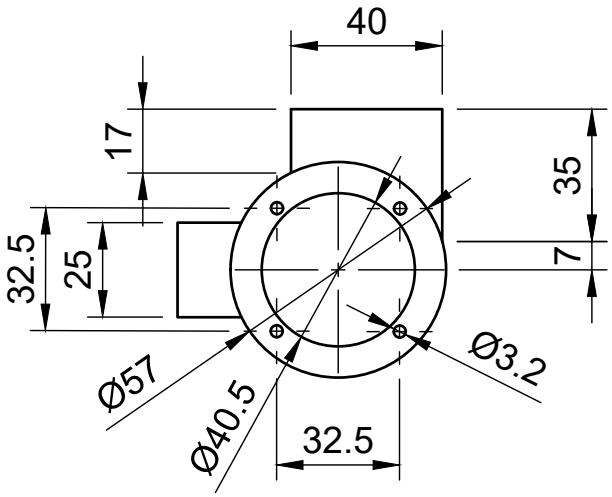
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. PUENTE DE SUJECIÓN			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 2:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Bulón de bloqueo	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 10	Firma:



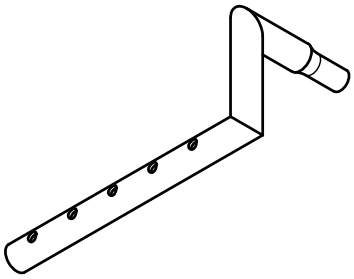


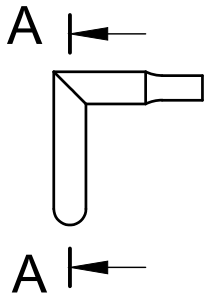


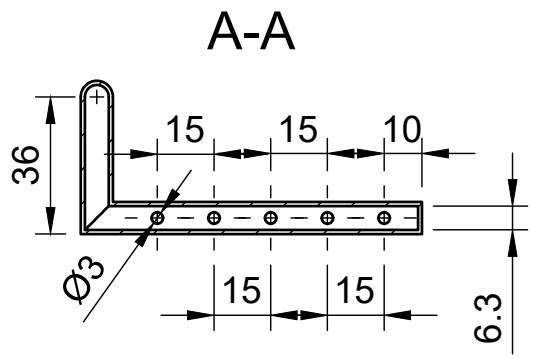


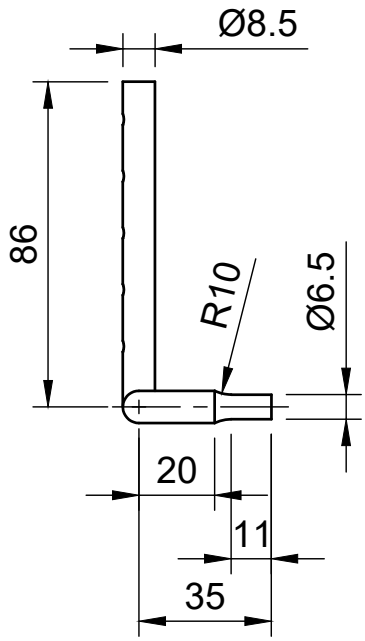


ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. SISTEMA DE AGITACIÓN			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:2	Fecha: mayo 2021
Plano de: Carcasa bomba	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 11	Firma:

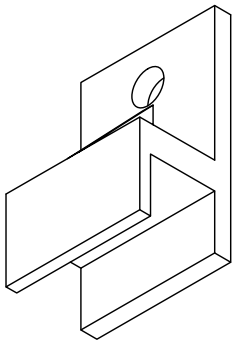


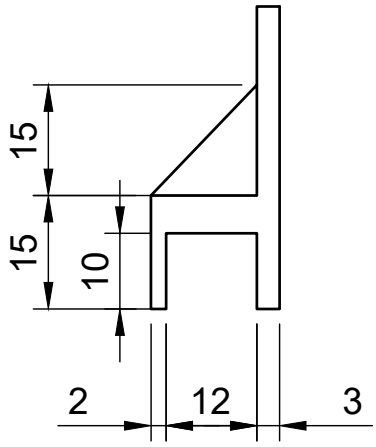


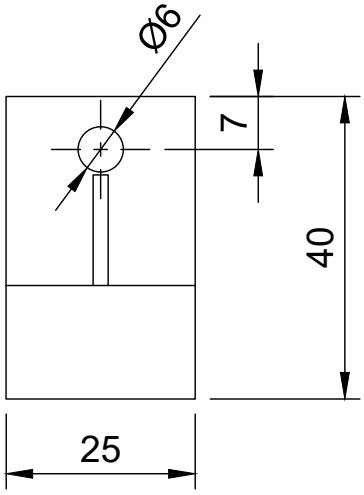


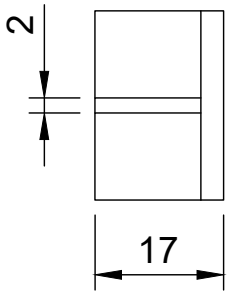


ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. SISTEMA DE AGITACIÓN			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Colector	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 12	Firma:







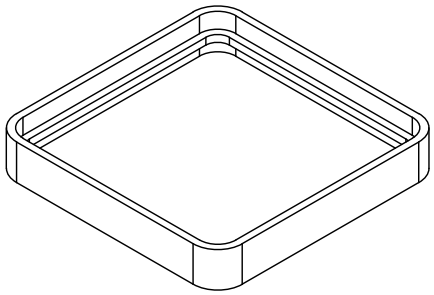


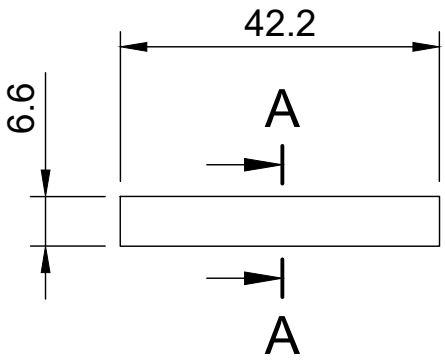
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

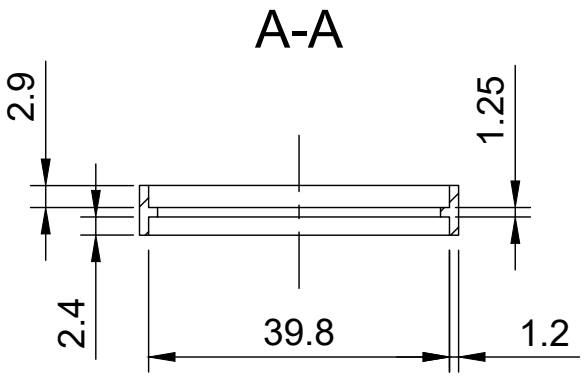
COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO

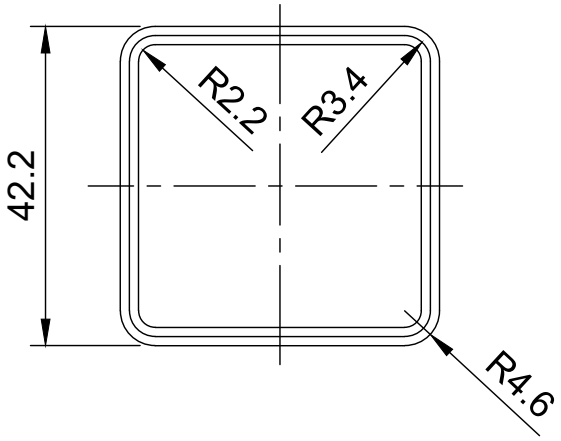
Autor:	Cotas en:	Escala:	Fecha:
Carlos J. Sánchez Morales	mm	1:1	mayo 2021

Plano de:	Rugosidad:	Tolerancias generales	Plano nº:	Firma:
Fijación ánodo	N10 N9		13	

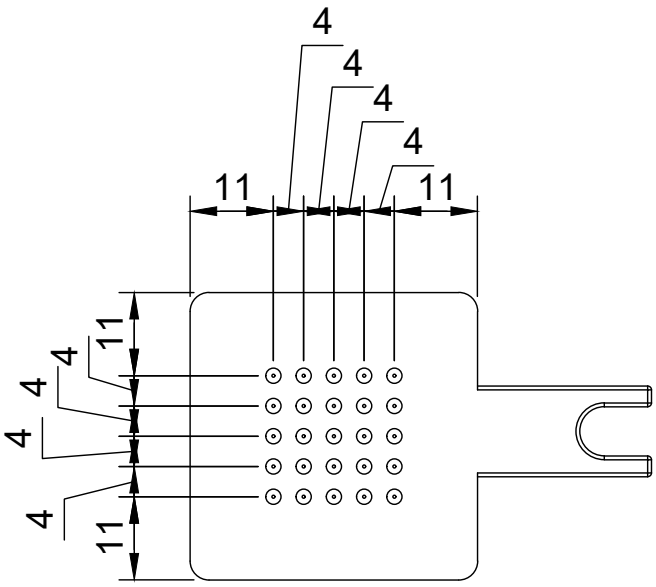


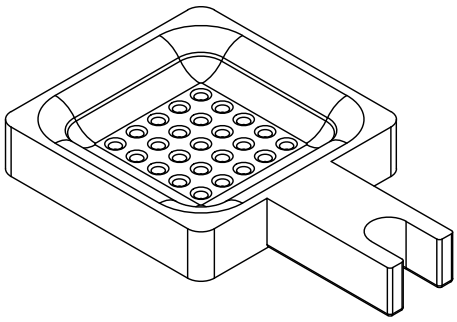


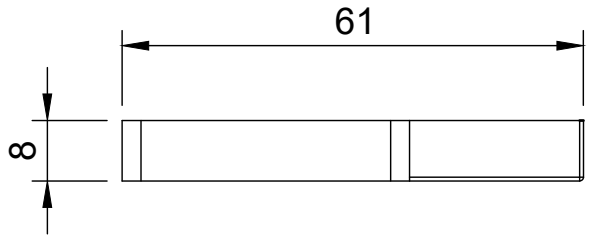




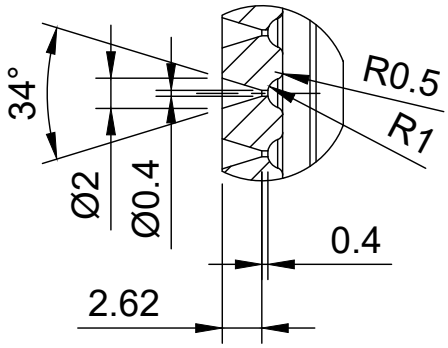
ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	COMPONENTES EQUIPO MICRO-ELECTROCONFORMADO. MODELO FUNCIONAL			
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Protector	Rugosidad: N10 N9	Tolerancias generales	Plano nº: 14	Firma:

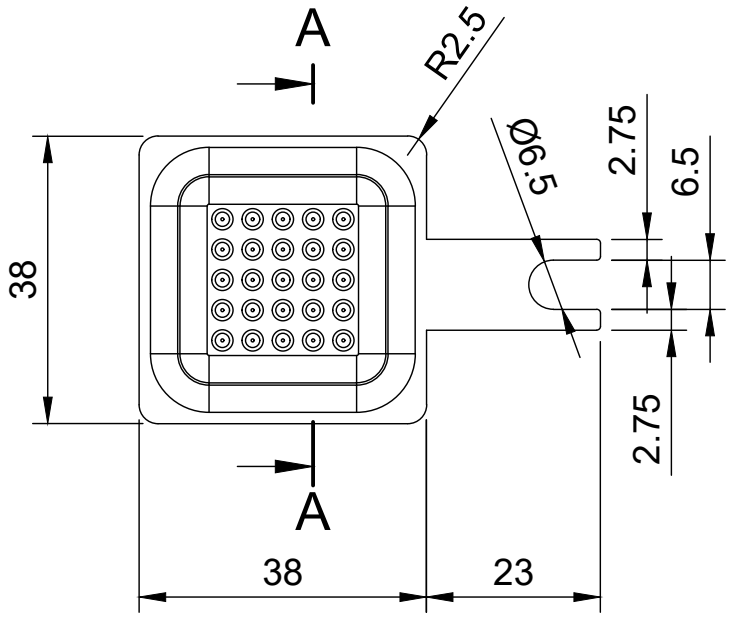




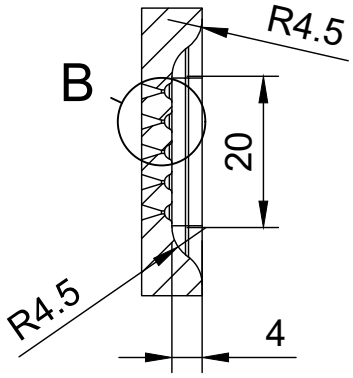


Detalle B (2:1)

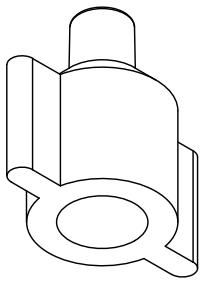


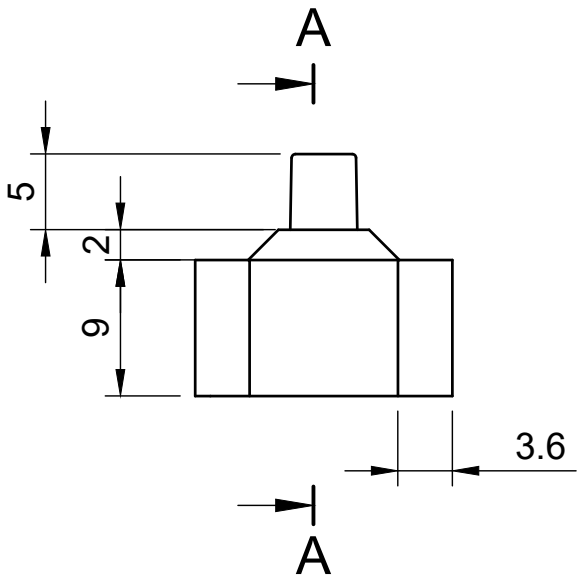


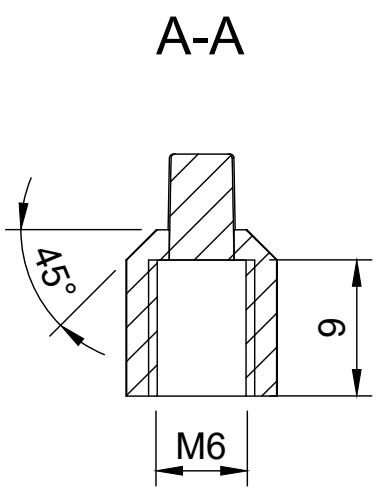
A-A

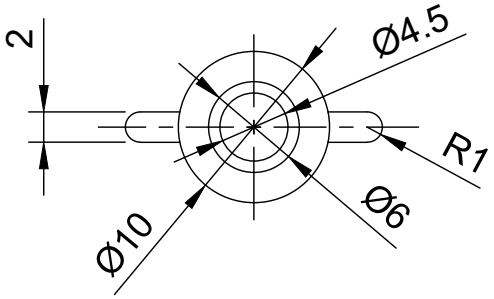


ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	MODELO FUNCIONAL		
Autor: Carlos J. Sánchez Morales		Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Modelo Evo4	Rugosidad: N6	Tolerancias generales	Plano nº: 15	Firma:



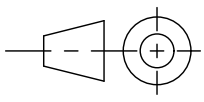






ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

UTIL DE MEDICIÓN



Autor: Carlos J. Sánchez Morales	Cotas en: mm	Escala: 1:1	Fecha: mayo 2021
Plano de: Conector	Rugosidad: N10	Tolerancias generales	Plano nº: 16
			Firma: