© Del documento, los sutores. Digitalización realizada por ULPGC, Biblioteca Universitaria, 2006

22/2003-04 UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA UNIDAD DE TERCER CICLO Y POSTGRADO

Reunido el día de la fecha, el Tribunal nombrado por el Excmo. Sr. Rector Magfco. de esta Universidad, el/a aspirante expuso esta TESIS DOCTORAL.

Terminada la lectura y contestadas por el/a Doctorando/a las objeciones formuladas por los señores miembros del Tribunal, éste calificó dicho trabajo con la nota de

SOBRESALIENTE CUM LAUDE (POR UNANIMIDAD)

Las Palmas de Gran Canaria, a 12 de diciembre de 2003.

El/la Presidente/a: Dr. D. Roque Calero Pérez

El/la Secretario/a: Dr. D. Antonio José Vera Castellano

El/la Vocal: Dra. Dña. Julia Claudia Mirza Rosca

El/la Vocal: Dr. D. Javier Castany Valeri

El/la Vocal: Dr. D. Angel Fernández Cuello

El/la Doctorando/a: D. Pedro Manuel Hernández Castellano

Anexo II

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Departamento: INGENIEF	INGENIERÍA MECÁNICA			
Programa de Doctorado:	TECNOLIGÍA INDUSTRIAL			

Título de la Tesis

SIMULACIÓN Y ENSAYO DE MOLDES RÁPIDOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO Y ELECTROCONFORMADO. APLICACIÓN A LA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS.

Tesis Doctoral presentada por D/Da. PEDRO M. HERNÁNDEZ CASTELLANO Dirigida por el Dr/a. D/Da. MARIO MONZÓN VERONA.

Codirigida por el Dr/a. D/Da.

El/la Director/a, El/la Codirector/a El/la Doctorando/a,

(firma) (firma)

Las Palmas de Gran Canaria, a 12 de NOVIEMBRE de 2003



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE FABRICACIÓN INTEGRADA

TESIS DOCTORAL

SIMULACIÓN Y ENSAYO DE MOLDES RÁPIDOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO Y ELECTROCONFORMADO. APLICACIÓN A LA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS.

Pedro Manuel Hernández Castellano

Director: Mario Monzón Verona

"La dicha de la vida consiste en tener algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar." Thomas Chalmers (1780-1842)

Gracias por tu amor y paciencia en este tramo inicial del camino. Eternamente Yolanda.

A mi familia, a los que he robado un tiempo que debía dedicarles y que han sabido comprender.

Al espíritu de trabajo de los miembros del Laboratorio de Fabricación Integrada.

"La vida de los muertos está en la memoria de los vivos." Marco Tulio Cicerón (106-43 a.C.)

ÍNDICE

ÍNDICE.

Capítulo 1

	INTF	RODUCCIÓN.	1-1
	1.1		1-3
		1.1.1 Fase I. Definición del proceso.	1-3
		1.1.2 Fase II. Definición y ensayo de insertos en moldes	de
		inyección.	1-4
		1.1.3 Fase III. Propuesta de un procedimiento global.	1-4
	1.2	Estructura de la tesis.	1-5
	1.3	Condicionantes de los trabajos y agradecimientos.	1-6
Cap	ítulo		
- -			
	EST	ADO DEL ARTE.	2-1
	2.1	Proceso de inyección de plásticos.	2-1
	2.2	Desarrollo de piezas por inyección.	2-2
	2.3	Tecnologías de prototipado rápido.	2-5
		2.3.1 Sinterización selectiva por láser (SLS).	2-8
		2.3.2 Estereolitografía (SLA).	2-8
		2.3.3 Modelado por deposición fundida (FDM).	2-9
	2.4	Técnicas de herramientas rápidas.	2-9
Cap	ítulo	3	
	DES	CRIPCIÓN DEL EQUIPO Y PROCESO DE	
		CTROCONFORMADO.	3-1
	3.1		3-1
	3.2		3-2
	3.3		3-2
	3.4	Campos de aplicación.	3-4
	J. 4	3.4.1 Herramientas y moldes.	3-4
		3.4.2 Productos de rejilla.	3-6
		3.4.3 Otros Productos.	3-6
	3.5	Principios electroquímicos.	3-8
	3.6	Fundamentos de electrodeposición.	3-0 3-11
	3.0	•	3-13
		3.6.1 Estructura de los electrodepósitos metálicos.	
		3.6.2 Parámetros influyentes en el proceso de crecimien cristalino.	3-15
		3.6.3 Baño electrolítico.	3-17
		3.6.4 Defectos de los depósitos.	3-19
		3.6.5 Propiedades mecánicas de la cáscara	0 10
		electroconformada.	3-20
		3.6.6 Espesor de depósito.	3-24
	3.7	Descripción del equipo de electroconformado.	3-26
	J.1	3.7.1 Baño electrolítico.	3-26
		3.7.2 Ánodos empleados en el sistema.	3-28
		3.7.3 Tangue v sistemas auxiliares.	3-28
		TILL INCOME TOURSING MANIGUES.	

0 000
and the same
177.00
Distant
40.00
lan and
dana
door
8

		 3.7.4 Sistema de soporte de ánodos y cátodos. 3.7.5 Sistema de calefacción. 3.7.6 Sistema de agitación. 3.7.7 Sistema de filtración. 3.7.8 Sistema de ventilación. 3.7.9 Cuadros de protección y regulación. 3.7.10 Rectificador. 	3-30 3-30 3-31 3-31 3-32 3-33 3-33
Capí	tulo 4	1	
		BORACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE NÍQUEL POR	
		CTROCONFORMADO.	4-1
	4.1		4-1
	4.2		4-2
		4.2.1 Consideraciones de diseño.4.2.2 Material del modelo.	4-2 4-5
		4.2.3 Preparación del modelo.	4-5 4-7
	4.3	Descripción de la tecnología FDM.	4 -7
	4.0	4.3.1 Materiales del modelo.	4-8
		4.3.2 Proceso de deposición fundida de material.	4-9
		4.3.3 Software de control.	4-10
	4.4	Materiales utilizados en moldes de inyección de	
		plásticos.	4-11
	4.5	Propiedades de las cáscaras electroconformadas por el	4.40
		LFI.	4-13
		4.5.1 Dureza. 4.5.2 Tensiones internas.	4-13 4-15
		4.5.3 Resistencia a tracción.	4-16
		4.5.4 Estructura metalográfica.	4-18
Caní	tulo 5	_	,
Oupi			
		DDOLOGÍA DE DISEÑO DE MOLDES RÁPIDOS CON	 .
		RTOS ELECTROCONFORMADOS.	5-1
	5.1	Descripción general de un molde de inyección.	5-1
	5.2	Componentes normalizados para moldes.	5-4
	5.3	Criterios básicos de diseño de moldes rápidos electroconformados.	5-5
	5.4	Molde para la inyección de probetas de ensayo.	5-6
	J. T	5.4.1 Descripción del inserto con dos cavidades.	5-8
		5.4.2 Descripción del inserto con una cavidad.	5-10
		5.4.3 Sistemas auxiliares.	5-12
	5.5	Molde para la inyección de carcasas.	5-16
Capí	tulo 6	3	
	ΔΝΙΆΙ	ISIS DE LOS MOLDES.	6-1
	6.1	Herramientas de simulación.	6-1
	6.2		6-2
	6.3	Simulación con Moldflow Plastic Adviser (MPA).	6-4

	6.3.1 Análisis del molde de las probetas.6.3.2 Análisis del molde de las carcasas.	6-6 6-9
6.4	Análisis con ANSYS.	6-12
	6.4.1 Análisis del molde para probetas.	6-12
	6.4.1.1 Proceso de modelado	6-13
	6.4.1.2 Tipos de elemento empleados en el	G 14
	modelado	6-14
	6.4.1.3 Componentes del modelo de análisis.	6-16 6-17
	6.4.1.4 Estado de cargas. 6.4.1.5 Condiciones de contorno.	6-17
	6.4.1.6 Resultados.	6-18
	6.4.2 Análisis estructural del molde de carcasas.	6-22
	6.4.2.1 Modelo de análisis para el inserto de placa	0-22
	de figura fija.	6-22
	6.4.2.2 Estado de cargas y condiciones de contorno	
	6.4.2.3 Resultados.	6-25
	6.4.2.4 Modelo de análisis para el inserto de placa	0 20
	de figura móvil.	6-27
	6.4.2.5 Estado de cargas y condiciones de contorno.	
	6.4.2.6 Resultados.	6-28
	6.4.2.7 Conclusiones.	6-32
Capítulo	7	
FABI	RICACIÓN DE MOLDE PROTOTIPO.	7-1
7.1		7-1
7.2		7-4
	7.2.1 Generación del modelo.	7-4
	7.2.2 Elaboración de la cáscara.	7-6
7.0	7.2.3 Características formales de las cáscaras.	7-8
7.3	Fabricación de resto de componentes del molde.	7-17
7. 4	Fabricación del inserto.	7-19
7.5	Ensamble y ajustes del molde.	7-23
Capítulo	8	
ENS	AYO DEL MOLDE CON INSERTO	
	CTROCONFORMADO.	8-1
8.1	Introducción.	8-1
8.2	Descripción de una máquina de inyección.	8-2
8.3	Instrumentación empleada.	8-3
8.4	Descripción del ensayo.	8-5
8.5	Ensayo sobre la placa con inserto de dos cavidades.	8-6
8.6	Ensayos sobre la placa con inserto y cavidad mecanizada.	8-8
	8.6.1 Pruebas con Polietileno.	8-9
	8.6.2 Prueba con Poliestireno.	8-12
	8.6.3 Pruebas con Policarbonato.	8-14
	8.6.4 Pruebas con Poliamida.	8-17
	8.6.5 Pruebas de exigencia.	8-19

	8.7	Conclusiones de las pruebas.	8-21
Cap	ítulo s	•	
	ENSA	AYO DE LAS PROBETAS.	9-1
	9.1		9-1
	9.2	Medición dimensional y de masas.	9-2
	9.3	Ensayos de tracción.	9-7
	9.5	9.3.1 Ensayos con el Policarbonato.	9-9
		9.3.2 Ensayos con el Poliestireno.	9-11
		9.3.3 Ensayos con la Poliamida.	9-13
			9-15
		9.3.4 Ensayos con el Polietileno.	9-15
		9.3.5 Ensayos pruebas de exigencia.	9-17
	9.4	9.3.6 Conclusión general. Pruebas de Fotoelasticidad.	9-19
	9.4	Fruebas de Foloeiasticidad.	9-20
Capi	ítulo 1	10	
	APLIC	CACIÓN INDUSTRIAL DE LA TECN. DESARROLLADA.	10-1
	10.1	Introducción.	10-1
	10.2	Propuesta de criterios de decisión.	10-2
	10.3	Estudio económico.	10-4
		10.3.1 Estudio del coste de fabricación por métodos	
		convencionales.	10-4
		10.3.2 Costo de fabricación mediante electroconformado	
		a partir de prototipado rápido.	10-7
	10.4	Aplicación práctica de la metodología propuesta.	10-9
		10.4.1 Opción de placa mecanizada.	10-10
		10.4.2 Opción de inserto con placa electroconformada.	10-11
		10.4.3 Conclusiiones.	10-12
Capi	tulo 1	1	
	CON	CLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.	11-1
	11.1	Conclusiones.	11-1
		Líneas futuras de investigación.	11-5
3 <i>ibli</i>	ograf	ia.	
	Refer	encias bibliográficas.	1
		pibliografía consultada.	5
		s de datos consultadas	7
Anes	νο Δ		

PLANOS.

Anexo B

INFORME MOLDFLOW PLASTICS ADVISERS.

Anexo C

GRÁFICAS ANSYS.

Anexo D

GRAFICAS MEDICIÓN.

Anexo E

REGISTROS DE PRESIÓN EN CAVIDAD.

Anexo F

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

"La vida debe ser una continua educación."

Gustave Flaubert (1821-1881)

1 INTRODUCCIÓN.

La tecnología industrial moderna aporta las herramientas para que las sociedades sean mucho más productivas. Se ha conseguido un estilo de vida más fácil y cómodo, lleno de productos increíbles que están al alcance de un gran número de personas. Éstas pueden elegir en un mercado amplio y cada vez más exigente, que obliga a la adopción de unas nuevas actitudes en el mundo de la industria.

La fabricación de grandes series de productos, con largos plazos de entrega y periodos elevados de almacenamiento hasta su venta, es cada vez más antieconómica en los mercados industriales con una creciente competencia. Cada vez más se demandan soluciones de automatización de series más pequeñas, que afectan a la mayor parte de las industrias manufactureras.

Con el fin de subsistir en una situación de competencia internacional cada vez más feroz, las empresas se ven obligadas a adoptar medidas encaminadas al incremento de la productividad. Otro aspecto importante que se debe imprimir es la flexibilidad en sus ciclos productivos, con el fin de mantener o mejorar sus posibilidades en el mercado y la rentabilidad de sus actividades. Estos objetivos sólo se pueden lograr dotando a los sistemas productivos de las siguientes capacidades.

- Acortar los ciclos de desarrollo de nuevos productos, de manera que den respuesta a los cambios y necesidades del mercado.
- Racionalización del diseño de los productos, con el objeto de reducir los costes de fabricación y a la vez ofertar productos más competitivos.

 Mejorar los sistemas productivos para reducir los tiempos de fabricación y aumentar la calidad de los productos.

En el futuro próximo, la manufactura de productos se realizará cada vez a un nivel más automatizado. Muchos de los productos que se volverán muy habituales, y que ni siquiera se han diseñado, requerirán de nuevos sistemas y métodos de fabricación de la más alta tecnología para producirlos. Una de las áreas de fabricación que son objeto de mayor estudio e investigación, es la del acortamiento de los ciclos de lanzamiento de productos. Más concretamente el desarrollo de herramientas que permitan validar la factibilidad del diseño antes de su fabricación, e iniciar la producción en el menor plazo de tiempo posible.

Los materiales plásticos han supuesto una revolución en el sector manufacturero debido a sus propiedades, y a la enorme variedad de tipos existentes y en continuo desarrollo. El proceso de inyección de plásticos es sin lugar a dudas el más empleado y versátil de cuantos procesos se emplean en la transformación de estos materiales. La evolución de los sistemas y técnicas de inyección de plásticos, muestra claramente los aspectos mencionados con anterioridad. Cada vez cuesta menos tiempo el poner un nuevo producto en el mercado y con mayores niveles de calidad. Las tecnologías de fabricación de moldes rápidos (Rapid Tooling) son, en este campo, uno de esos avances tecnológicos que posibilitan las mejoras en los procesos de diseño y fabricación de piezas inyectadas.

Hace algunos años el Grupo de Investigación de Procesos de Fabricación, formado por miembros del Laboratorio de Fabricación Integrada (LFI) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, tras analizar las diferentes soluciones existentes en el área de Rapid Tooling, se planteó el estudio de una técnica poco extendida, el electroconformado. En principio resultaba muy atractiva por los niveles de precisión y reproducibilidad que parecía tener según la información disponible en ese momento. Esta curiosidad luego se transformó en interés, llevó al LFI a definir una línea de investigación de: Análisis del comportamiento de moldes rápidos de inyección de termoplásticos fabricados mediante electroconformado (electroforming). Se contaba con un recurso disponible por el laboratorio en aquellos momentos, una máquina de prototipado rápido con tecnología FDM. Además el perfil del grupo de trabajo se adaptaba muy bien a esta línea de investigación ya que se contaba con Ingenieros Industriales en la especialidad Mecánica y Química. Este interés fue transmitido a otro grupo de investigación de la

Universidad de Zaragoza, más concretamente el Taller de Inyección para la Industria de los Plásticos, que apoyó también el inicio de esta nueva línea de investigación, pionera en la Universidad española. Se trataba pues de estudiar, definir, analizar, ensayar y proponer a nivel industrial la posibilidad de fabricar insertos para moldes de inyección, a partir de la obtención de cáscaras electroconformadas tomando como modelo inicial un prototipo realizado en el equipo FDM.

1.1 Fases de los trabajos de investigación.

Esta técnica de electroconformado no es nueva ya que sus aplicaciones en la industria son innumerables como se comentará en el siguiente capítulo. Este trabajo de investigación pretendía averiguar hasta qué punto era viable técnicamente y bajo qué parámetros, su utilización en la producción de herramientas rápidas. Todo ello de una manera rigurosa, sistematizada y proponiendo método de trabajo. La estrategia planteada se centraba en los siguientes puntos y fases de trabajo:

1.1.1 Fase I. Definición del proceso.

- Estudio en profundidad de los fundamentos físico-químicos del electroconformado en general y del níquel en particular. Valoración de todas las alternativas posibles.
- Estudio de los requerimientos exigidos por un molde de inyección de plásticos para elegir el procedimiento más adecuado, así como el tipo de inserto a valorar.
- Elegida la alternativa aparentemente más aceptable, diseño de un equipo de ensayos a nivel de laboratorio, que cumpliese con todos los requisitos necesarios para fabricar cáscaras de níquel de calidad aceptable.
- Fabricación y montaje de los elementos necesarios del equipo.
- Valoración de los productos químicos y parámetros de funcionamiento más adecuados.
- Adecuación y calibración del baño electrolítico con la posibilidad de cambiar sus condiciones de una manera lo más sencilla posible.
- Definición y propuesta de los análisis químicos del baño en función de su influencia sobre las características de las cáscaras de níquel.
- Fabricación de todas las cáscaras y testigos necesarios para elaborar los estudios de caracterización mecánica.

© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC, Biblioteca Universitaria, 2006

- Análisis metalográfico y caracterización mecánica de las cáscaras producidas teniendo su aplicación en moldes de inyección.
- Estudio en diferentes condiciones de las tensiones internas de las cáscaras producidas.
- Valoración de la influencia del modelo utilizado (FDM) en la calidad final de la cáscara.
- Establecimiento de las condiciones de trabajo más adecuadas en función de los resultados observados.
- Establecimiento de una metodología práctica de funcionamiento del proceso de cara a su aplicación industrial.

1.1.2 Fase II. Definición y ensayo de insertos en moldes de inyección.

- Estudio de las diferentes posibilidades de fabricación de insertos.
- Valoración de las geometrías más adecuadas para acoger la cáscara electroconformada de níquel, y de los rellenos para formar los insertos.
- Análisis por elementos finitos de diferentes tipologías de insertos para analizar la viabilidad de su utilización en equipos de inyección de termoplásticos debido a los elevados esfuerzos a soportar, presiones de inyección y fuerzas de cierre.
- Diseño completo de moldes de inyección con insertos electroconformados incorporando la instrumentación necesaria que permitan monitorizar diferentes parámetros durante el proceso de inyección.
- Fabricación de moldes con insertos electroconformados.
- Ensayo de los moldes en máquina de invección.
- Análisis del comportamiento de la herramienta.
- Análisis y ensayo de las piezas inyectadas, en diferentes materiales característicos de la industria de inyección, bajo diferentes condiciones de proceso.
- Analizar la viabilidad y aplicación industrial de esta tecnología.

1.1.3 Fase III. Propuesta de un procedimiento global.

Se propondrán desde la generación del modelo hasta la fabricación del molde, todas las pautas y operaciones para su aplicación industrial, tratando de eliminar los riesgos de fracaso en el intento de producción correcta del inserto. La presente tesis doctoral se centra principalmente en la **segunda fase**, y ha tenido como base la tesis de la Dra. Mª. Dolores Marrero Alemán de título, *Estudio del proceso de electroconformado para la fabricación de moldes rápidos (RT)*. Caracterización mecánica de los insertos de níquel para su aplicación a la inyección de termoplásticos, que se centró en la primera fase del trabajo.

1.2 Estructura de la tesis.

El presente documento queda definido con la siguiente estructura.

- Capítulo 1, Introducción.
- Capítulo 2, Estado del arte. Se realizará una revisión general de las tecnologías relacionadas con el tema de la tesis, para ubicar en su contexto la técnicas analizadas.
- Capítulo 3, Descripción del equipo y proceso de electroconformado. Este bloque se centrará en la descripción de la tecnología de electroconformado. Se mostrarán las aplicaciones del proceso, sus capacidades y limitaciones, y se introducirá en los fundamentos de la electrodeposición de níquel. Se incluye un apartado importante en este capítulo para describir el equipo de electroconformado, diseñado y fabricado por el Laboratorio de Fabricación Integrada, que se ha empleado en este trabajo de investigación.
- Capítulo 4, Elaboración de las cáscaras de níquel por electroconformado. Se tratarán en este capítulo los pasos necesarios para la obtención de las cáscaras de níquel. Se establecerán las recomendaciones de diseño de las cáscaras, que condicionarán a su vez el diseño de los modelos necesarios para el proceso. Se describirá la tecnología de prototipado rápido FDM (Fused Deposition Modeling) empleada para la generación de los modelos usados en esta tesis. Finalmente se expondrán las propiedades mecánicas obtenidas en las cáscaras de níquel que se han fabricado.
- Capítulo 5, Metodología de diseño de los moldes rápidos con insertos electroconformados. Se describirá el diseño mecánico de los moldes empleados en este trabajo de investigación. Se justificarán las soluciones adoptadas en los diferentes sistemas que integran este tipo de herramientas.
- Capítulo 6, Análisis de los moldes. Este capítulo se centrará en el análisis reológico del proceso de inyección en los dos moldes diseñados. Se comprobará la viabilidad técnica de las soluciones adoptadas y se estimarán

los esfuerzos a que se van a ver sometidos los moldes, durante la inyección de los diferentes polímeros estudiados. Se presentarán también los resultados obtenidos de un análisis estructural mediante el método de elementos finitos de los moldes diseñados.

- Capítulo 7, Fabricación del molde prototipo. Se describirán todas las fases de fabricación del molde para generar probetas de ensayo, desde la elaboración del modelo hasta el ensamblaje y ajuste de la herramienta.
- Capítulo 8, Ensayo del molde con inserto electroconformado. Se comentarán las pruebas del molde fabricado, realizadas en el Taller de Inyección de la Industria de los Plásticos (T.I.I.P.) de la Universidad de Zaragoza. Se describen las diferentes fases del ensayo del molde, así como el comportamiento de la herramienta durante las pruebas.
- Capítulo 9, Ensayo de las probetas. Se comentarán las diferentes pruebas de ensayo a que han sido sometidas las probetas obtenidas en los diferentes materiales finalmente inyectados. Se comparan los resultados obtenidos para las probetas generadas en el inserto de níquel, con las obtenidas a partir de la cavidad mecanizada en el molde.
- Capítulo 10, Aplicación industrial de la técnica desarrollada. Se presenta una metodología de evaluación de la viabilidad técnica y económica del empleo de insertos electroconformados, en comparación con las técnicas tradicionales de fabricación de moldes.
- Capítulo 11, Conclusiones y líneas futuras de investigación. Se exponen las conclusiones generales extraídas del trabajo realizado, y se indican las líneas futuras de investigación que se abren tras estos estudios.

1.3 Condicionantes de los trabajos y agradecimientos.

Los principales condicionantes a considerar en las fases iniciales de los trabajos han sido los siguientes:

El electroconformado es un campo extremadamente complejo y con grandes lagunas científicas y de difícil explicación, máxime si se centra el estudio en la aplicación pretendida. La bibliografía es bastante escasa en este sentido, donde la mayor parte de las referencias encontradas se centran en aspectos puramente químicos, para condiciones específicas y sin relación alguna con las condiciones necesarias para su utilidad para moldes de inyección.

- Se trata de una técnica con gran aplicación de tipo intuitivo pero con poca base científica en la industria, es decir se hacen las cosas pero sin saber muy bien porqué. Dado el cierto oscurantismo y secretismo que existe en algunos procedimientos es bastante difícil obtener ejemplos reales de utilización.
- El trabajo de investigación debe combinar una parte química con una parte mecánica sin olvidar el contexto y el objetivo pretendido (inyección de plásticos). Es pues un trabajo con altas dosis interdisciplinares.
- Dentro de las referencias, artículos, ponencias y libros localizados resulta difícil poder comparar resultados por su gran variabilidad y contradicción en ocasiones, donde no es frecuente encontrar supuestos que partan de las mismas condiciones de trabajo.

Durante el tiempo que se ha estado trabajando en esta línea de investigación han surgido muchos problemas. En la búsqueda de solución a los mismos se han aprendido muchas cosas, tanto en este campo como en otros interrelacionados. Aprovechando los resultados obtenidos, así como la experiencia y conocimientos adquiridos, se plantean otras líneas de trabajo de gran interés que se podrán observar en el capítulo de conclusiones y líneas futuras de investigación.

Han participado muchas personas tanto del LFI como de fuera, a las que es de justicia agradecer la colaboración inestimable que han prestado.

- A los amigos y compañeros del grupo de investigación, Mariola y Nizardo, por la ayuda prestada y el apoyo en los momentos críticos del trabajo. A Mario, compañero y amigo, cuyo impulso constante ha sido fundamental para la realización de este trabajo.
- A los responsables del Taller de la Industria de Inyección de Plásticos (TIIP), y a los miembros que han colaborado directamente en el trabajo, que han hecho posible la realización de la fase de ensayos del molde prototipo en sus instalaciones de Zaragoza.
- A Juan Francisco Cárdenes, compañero del Laboratorio de Ciencias de los Materiales, que ha colaborado en la realización de las pruebas de ensayo de las probetas.
- A Mayoli que ha realizado un arduo trabajo en su proyecto fin de carrera con el análisis estructural de los insertos.

"El hombre se descubre cuando se mide con el obstáculo."

Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944)

Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE

2 ESTADO DEL ARTE.

2.1 Proceso de inyección de plásticos.

El empleo de plásticos en la industria no deja de incrementar, debido al gran desarrollo que han sufrido en las últimas décadas. Las propiedades de estos materiales son tantas y tan variadas, que amplían constantemente su campo de aplicación sustituyendo o complementando a otros materiales. Sus principales ventajas son: [1][59]

- Facilidad de conformar.
- Baia densidad.
- Relación resistencia/peso muy favorable.
- Resistentes a la corrosión y ataques químicos.
- Flexibilidad, tenacidad y capacidad de amortiguamiento.

Los procesos más importantes de transformación de estos materiales son la extrusión y la inyección. Entre ambos representan más del 60% del volumen de material procesado. Este sector industrial representa en España un 1.7% del PIB, con un consumo de materias plásticas cercano a 100 kg. por habitante y año. Sin lugar a dudas, el proceso más versátil de ellos es el moldeo por inyección. En torno a un 75% de las piezas plásticas que podemos encontrar a nuestro alrededor, han sido fabricadas mediante este proceso, y en torno al 60% de las máquinas de transformación de plásticos que se fabrican hoy día, son máquinas de inyección. [2]

Básicamente el proceso consiste en calentar el plástico hasta que funde, para posteriormente inyectarlo a presión en el interior de un molde, donde se enfría y solidifica. Permite fabricar piezas desde unos pocos miligramos hasta alrededor de un centenar de kilos. Una de las principales ventajas que ofrece el moldeo de piezas de plástico por inyección, es la posibilidad de producir piezas de extrema complejidad geométrica con forma neta. Además es un proceso totalmente automatizable que permite la utilización continua de los equipos, con lo que las altas inversiones requeridas son amortizadas en periodos relativamente cortos.

Las máquinas empleadas en este proceso se denominan inyectoras o prensas de inyección, siendo su función la de fabricar piezas a partir de masas de moldeo de elevado peso molecular, con ayuda de presiones elevadas. Constan de tres partes principales: la unidad de inyección, la unidad de cierre y la unidad de control del proceso. Los moldes son las herramientas encargadas de dar la forma deseada al material y enfriar la pieza. Están formados básicamente por un conjunto de placas agrupadas en dos bloques o semimoldes, uno fijo desde donde entra la colada y otro móvil que se abre para permitir la extracción automática de la pieza tras enfriarse. Posteriormente se vuelve a cerrar el molde y se repite el ciclo de trabajo. [3]

La gran mayoría de los materiales plásticos pueden ser conformados por inyección. Algunos no pueden hacerse lo suficientemente fluidos y no pueden ser inyectados o presentan grandes dificultades. La gran mayoría de los materiales inyectados son polímeros termoplásticos, que se ablandan con el calor y recuperan sus propiedades al enfriarse. Los plásticos reticulados, tanto termoestables como elastómeros, también pueden ser moldeados por inyección de forma más compleja y costosa, y representan tan solo en torno al 5% de la producción global de componentes inyectados.[4]

2.2 Desarrollo de piezas por inyección.

Una necesidad fundamental de las industrias, en esta situación de competencia feroz de los mercados, es la de acortar los ciclos de desarrollo de nuevos productos. Desde que surge la idea hasta que se comercializa el producto, es necesario un periodo de evolución del mismo, donde la fase de diseño adquiere importancia primordial.

La fase de diseño supone aproximadamente el 5% del coste total de un producto y, sin embargo, las decisiones tomadas en esta fase condicionan más del 70% del coste final. Además cuanto más tarde se producen los cambios en el ciclo de desarrollo del producto, más caro resulta el mismo. Por esta razón, cuanto antes se hagan las mejoras necesarias, mayor será la reducción de costes y menor la inversión en mejoras.





Fig. 2.1: Influencia de la fase de diseño en el coste final de producto

Fig. 2.2: Enfoque tradicional de desarrollo de producto

El enfoque tradicional del salto de muro "yo lo diseño, y tú lo construyes", ha quedado obsoleto. Lleva a tomar decisiones inadecuadas que requieren numerosos cambios de diseño y suponen considerables retrasos en el lanzamiento del producto. Esto se traduce en una gran reducción de los beneficios, cuando no en pérdidas considerables. Se hace necesario por tanto, atar las causas del retraso en el proceso de desarrollo, sobre todo cuando los productos tienen un corto tiempo de vida.

Hoy en día, se impone una integración del diseño y la fabricación, surgíendo el concepto de ingeniería concurrente. Esta nueva filosofía de trabajo requiere que todas las actividades relacionadas con el ciclo de vida del producto, se inicien cuanto antes y de forma simultánea. Este nuevo concepto ha de considerarse de forma global y sostenible: diseño, fabricación, ensamblaje, control, distribución, uso, mantenimiento, retirada y reciclaje. Además ha de evaluar su influencia en el medio ambiente, salud laboral y en el uso racional de los recursos.[5]

En particular en piezas fabricadas en moldeo por inyección, se requiere cubrir una serie de etapas hasta la producción final de esa pieza y su comercialización. La secuencia lógica de fases del desarrollo de una pieza se relacionan a continuación.[6]

 Diseño preliminar. Se intentará dar satisfacción a todos los requerimientos que permitan cubrir las necesidades a satisfacer.

- 2. Generación de prototipos. Estos pueden ser virtuales o físicos y permitirán validar los soluciones de diseño tomadas, o realizar las modificaciones necesarias para cumplir las especificaciones de diseño. En esta etapa se están imponiendo en los últimos años las técnicas de prototipado rápido (Rapid prototyping), que permiten obtener réplicas físicas de los componentes en plazos de tiempo muy cortos.
- 3. Elección del material. Debido a la gran variedad de propiedades y características que los materiales plásticos pueden tener incluso dentro de una misma familia. Es necesario establecer el polímero concreto que se va a emplear atendiendo a criterios tanto técnicos como económicos.
- 4. **Diseño detallado.** Se analiza el componente desde diferentes puntos de vista (mecánico, térmico, reológico, etc.), para concretar el diseño preliminar.
- 5. Preseries de diseño. Se requieren para verificar el cumplimiento de todos los requerimientos de diseño, para lo que se necesitan piezas prácticamente idénticas a las definitivas. Muchas veces se requiere incluso emplear el mismo proceso de fabricación que en producción, e incluso en condiciones de proceso similares. Aquí se hacen necesarias las técnicas de herramientas rápidas (Rapid Tooling), para cubrir esta etapa de desarrollo.
- 6. **Diseño final.** Con todas las aportaciones recogidas de las etapas previas, se define totalmente la pieza y comienza la etapa de diseño de las herramientas de producción necesarias para la fabricación.
- 7. Definición del equipamiento de producción. Se concreta el diseño del molde, la herramienta necesaria para la fabricación de las piezas. Su tipología, tamaño y materiales están directamente interrelacionados con las características de la máquina inyectora a emplear y con los parámetros operativos que serán necesarios.
- 8. Preseries de producción. Necesarias para realizar la puesta a punto definitiva del equipamiento a utilizar, de las condiciones de control del proceso, y para realizar ensayos de validación u homologación del componente si fueran necesarios.
- 9. **Producción.** Se obtienen las piezas definitivas y se realiza el control de calidad del proceso.
- 10. Comercialización del producto.

2.3 Técnologías de prototipado rápido.

En el campo de la fabricación de piezas en general, y en el desarrollo de nuevos productos en particular, es fundamental hoy en día disponer de prototipos que permitan realizar mejoras al producto desde un punto de vista de:

- Ingeniería de diseño.
- Ingeniería de producción, y
- Marketing previo a la producción en serie.

En este contexto se han desarrollado herramientas que permiten reducir las posibilidades de error. En planos 2D ó 3D sobre papel pueden no transmitirse de forma clara todos los detalles del diseño, e inducir a interpretaciones erróneas que pasen inadvertidas a las siguientes fases. Incluso el modelado en sólidos sobre aplicaciones CAD, que nos permite generar prototipos virtuales, puede ser insuficiente para observar de forma clara determinados detalles que sólo quedan clarificados con un objeto físico. Surge de ahí la necesidad de los prototipos, entendiendo como tales cualquier modelo físico de un producto, que se realiza previamente a la industrialización, al objeto de validar todas o algunas de sus características o funciones: estética, dimensional, funcional, y experimental. [7][61]



Fig. 2.3: Prototipo virtual y plano 2D.

Tradicionalmente, estos prototipos se han venido realizando con procedimientos convencionales y de forma casi artesanal. Requerían operaciones de ajuste manual, por parte de especializados modelistas de gran habilidad y destreza. De esta forma, cualquier prototipo requería un período de realización de semanas o incluso meses. Posteriormente se empezaron a utilizar para este fin, y se siguen empleando hoy día, procesos de mecanizado mediante máquinas CNC con la ayuda de aplicaciones de programación asistida. Se consiguen prototipos de una precisión bastante alta, y en una gran variedad

de materiales. El plazo de entrega se acorta apreciablemente pasando a unos días o semanas.

Recientemente han aparecido, debido a las demandas del mercado, nuevas técnicas específicas para la construcción de prototipos basadas en procesos MIM de aporte de material (Material Increase Manufacturing). Con estos procedimientos los plazos de realización de prototipos se reducen a horas. Todas estas técnicas tienen en común que parten de un diseño en sólido 3D realizado en aplicaciones CAD. Estos diseños son importados en unas aplicaciones específicas para cada tecnología. Ellas generan y transfieren toda la información necesaria al equipo de prototipado rápido, que realiza una réplica física de la pieza. Una limitación importante es que únicamente se puede trabajar con determinados materiales, que rara vez coinciden con el material de la pieza definitiva. Esto implica que en este primer paso la pieza obtenida puede tener utilidad estética, dimensional o funcional, dependiendo de la tecnología empleada, pero no experimental para realizar ensayos salvo casos excepcionales.[46]

En caso de requerir un prototipo con utilidad experimental, hay que recurrir a una segunda fase mediante técnicas de obtención de preseries o series prototipo. Estas nuevas técnicas emplean la primera pieza obtenida como modelo para obtener los utiliajes necesarios. Algunas tecnologías de prototipado rápido, permiten obtener directamente utiliajes prototipo (Rapid Tooling). Éstos pueden ser empleados en procesos similares o idénticos a los definitivos y conseguir piezas en los mismos materiales que finalmente se emplearan.

La utilización de estas técnicas de prototipado rápido tienen las siguientes ventajas fundamentales:

- Incremento de la capacidad de visualización.
- Detección de defectos de diseño antes de la fase de fabricación.
- Mejora del desarrollo y optimización de los productos.
- Reducción de costes y tiempos de fabricación del prototipo.
- Versatilidad al poder reproducir cualquier tipo de geometría.
- Fiabilidad al obtener piezas idénticas al diseño original.

Así como una imagen vale más que mil palabras, un prototipo vale más que mil imágenes. Los prototipos físicos sirven entre otros usos como:

Modelos de ingeniería para comprobar forma, tamaño y funcionalidad.

- Simulación y análisis mecánico de prototipos.
- Modelos maestros para la fabricación de herramientas y utillaje.
- Modelos para presentaciones de marketing, compras y ventas.

Las ventajas, desde un punto de vista industrial, que se obtienen son:

- Menor tiempo para el diseño conceptual.
- Más rapidez en el flujo de información para conseguir el diseño final.
- Más rapidez en la visión del diseño.
- Reducción de errores.
- Identificación temprana de problemas de producción.
- Aumento en la calidad del producto.
- Inmediata retroinformación.
- Reducción en la producción de moldes y patrones.
- Reducción del tiempo de salida del producto al mercado con un estudio más intenso.
- Reducción de costes en las fases de diseño, prototipo y reproducción.

Entre las múltiples aplicaciones y sectores en los que se emplean las tecnologías de prototipado rápido destacan:

- Sector publicitario.
- Sector comercial y turístico.
- Sector de la alimentación (envases y embalajes).
- Sector de la joyería y bisutería.
- Sector de la electrónica.
- Sector del electrodoméstico.
- Sector de la automoción.
- Sector de la cosmética.

Otra de las aplicaciones inmediatas es la de la Ingeniería Inversa, en la que se parte de un modelo físico y mediante digitalización se reconstruye o modela la pieza en 3D, y de aquí se obtiene el prototipo. [8]

Prácticamente la totalidad de estas técnicas emplean como procedimiento para la construcción de piezas, la generación de capas sucesivas en dos dimensiones. Se diferencian en el tipo, estado y proceso de solidificación del material. Estas técnicas están en constante evolución, siendo las más empleadas hoy día las siguientes:

- Sinterización selectiva por láser (SLS).
- Estereolitografía (SLA).
- Modelado por deposición fundida (FDM).
- Otras (BPM, EOS, LOM, SGC, etc.).

2.3.1 Sinterización selectiva por láser (SLS).

El principio general de funcionamiento consiste en un haz láser, que recorre una superficie de material en forma de polvo, y solidifica sucesivamente diferentes capas de material. La solidificación se produce mediante la incidencia puntual del láser, que provoca un calentamiento superior a la temperatura de sinterización. Los granos de polvo no calentados permanecen sin adherirse, actuando como soporte de las sucesivas capas, y posteriormente son retirados al terminar el proceso de fabricación. Pueden utilizarse como materiales: cera de fundición, policarbonato, poliamidas, PVC, ABS, e incluso metales y cerámicas. Las piezas producidas no requieren post-curado para cohesionar su estructura, siendo muy resistentes aunque de superficie porosa.

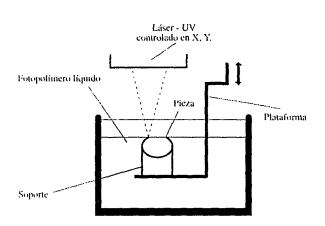


Fig. 2.4: Esquema de funcionamiento del sistema SLS

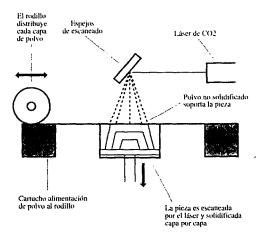


Fig. 2.5: Esquema de funcionamiento del sistema SLA

2.3.2 Estereolitografía (SLA).

La pieza es construida sobre una plataforma sumergida en una cubeta con resina líquida. La solidificación se produce por la fotopolimerización resultante de la incidencia de un haz láser, que recorre toda la superficie de la pieza en la sección 2D correspondiente. El proceso de solidificación total se completa con una fase posterior de postcurado en un horno, que representa una desventaja frente a otros procedimientos, al

igual que la necesidad de soportes. Como ventajas principales de este sistema destacan su buen nivel de detalle, de acabados superficiales y de precisión.

2.3.3 Modelado por deposición fundida (FDM).

La pieza se realiza con un material termoplástico, en estado de semifusión, que es extruido a través de unas boquillas, y depositado capa a capa hasta completar el modelo. El material al mismo tiempo que es depositado por el cabezal, es sometido a presión, para garantizar la unión entre capas, y fijar el espesor deseado. Es una tecnología que no emplea sistemas peligrosos ni productos tóxicos, y tiene una precisión similar al sistema SLS. No requiere instalaciones adicionales, y puede ser instalado sin problemas en entornos de oficina. Los materiales empleados son: ABS, ceras e incluso elastómeros. Como desventajas se podrían mencionar la necesidad de soportes, y una menor capacidad resistente de los prototipos en dirección perpendicular a las capas.

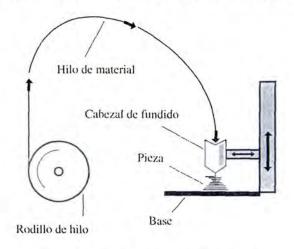


Fig. 2.6: Esquema de funcionamiento del sistema FDM.



Fig. 2.7: Equipo de sobremesa con tecnología FDM

2.4 Técnicas de herramientas rápidas.

Los moldes de producción solamente son viables en la gran mayoría de los casos para tiradas superiores a varios centenares de miles o incluso millones de piezas. Se obtienen normalmente mediante combinación de procesos de mecanizado y electroerosión. Se necesitan varios meses para su elaboración y puesta a punto, ya que pueden llegar a ser enormemente complejos. Hoy en día con la aparición del mecanizado a alta velocidad y el empleo de materiales de fácil mecanización, se están consiguiendo moldes de producción o "semi-producción" en plazos de tiempo más cortos. Esto permite

incorporar cambios en el diseño de productos con una frecuencia más alta, ya que el tamaño de la serie requerido para amortizar la inversión efectuada se reduce. Aun con ello las tiradas mínimas siguen siendo de varias decenas de miles de piezas.[9]

Los diferentes sistemas de RP existentes en el mercado nos permiten, en muchos casos, obtener prototipos funcionales, sin embargo dichos prototipos no tienen parecidas cualidades a los que se obtendrían, por ejemplo, por inyección y por supuesto tienen un costo elevadísimo por unidad. Es por ello que se hace necesario un paso intermedio entre un prototipo y la fabricación en serie, que nos permita validar el diseño con una serie corta de piezas; este es uno de los objetivos del Rapid Tooling (RT). No obstante en los últimos años el RT va incluso mas allá de esta obtención de series cortas de prototipos para convertirse en un conjunto de técnicas idóneas incluso para lo que podríamos llamar pequeñas series de producción en máquinas de inyección; estamos hablando de series que van desde las 100 unidades hasta las 10.000.

El RT no es en sí mismo un conjunto de técnicas que hayan aparecido en los últimos años, de hecho muchas de ellas son procedimientos que llevan utilizándose hace décadas de forma bastante artesanal. Lo que ha ocurrido es que con la aparición del Rapid Prototyping y con la posibilidad de disponer de mejores modelos, más precisos y de mejor calidad, en menor tiempo, se han desarrollado enormemente todas estas técnicas aprovechando dicha circunstancia para imprimirles un avance tecnológico considerable.

Existen dos formas de producir moldes rápidos, de forma directa y de forma indirecta. La forma directa consiste en fabricar directamente en prototipado rápido la cavidad del molde o el inserto; la forma indirecta requiere un modelo previo a la fabricación del inserto o molde. Atendiendo a la cantidad de piezas que nos permiten fabricar, los moldes rápidos se clasifican en dos grandes grupos: los moldes blandos y los moldes duros. [10]

Los moldes blandos se emplean para series relativamente pequeñas en materiales parecidos, pero no idénticos de los finales de diseño. En el mejor de los casos se consiguen en los mismos materiales pero en condiciones de proceso diferentes a las definitivas. Tienen la gran ventaja de ser rápidos de obtener y en unos pocos días podemos tener piezas prácticamente iguales a las definitivas. Son una herramienta valiosa que prestan su ayuda en el desarrollo de productos, pero en muchas ocasiones

no permiten cubrir todas las etapas previas a la producción. Las pruebas funcionales de ensayos, verificaciones, homologaciones, entre otras, requieren de productos con materiales finales y obtenidos con los procesos definitivos.

Los métodos más habituales para la elaboración de estos moldes blandos son:

- Colada en vacío sobre moldes de silicona, empleando resinas de poliuretano como material de colada, que permiten conseguir en geometrías sencillas hasta un centenar de piezas.
- Moldes realizados total o parcialmente mediante resinas epóxicas, obtenidos directamente por estereolitografía (Direct AIM). Se han conseguido series de varios centenares de piezas en materiales finales, aunque con condiciones de proceso diferentes.
- Insertos realizados con resinas epóxicas coladas, que se montan sobre moldes soportes. Se pueden conseguir tiradas de hasta mil piezas dependiendo de la complejidad de las mismas y del material inyectado.



Fig. 2.8: Molde de silicona realizado en el LFI.



Fig. 2.9: Molde con insertos realizados en resinas epóxicas.

Los moldes duros, también denominados moldes rápidos metálicos tienen su campo de actuación entre los moldes de producción y los descritos previamente. Pocos son los procesos comercializados para la obtención de este tipo de moldes, y muchos suelen quedar como desarrollo de uso interno de las empresas. Los detalles concretos para su elaboración son celosamente guardados, pues estas herramientas representan una ventaja comercial frente a sus competidores. Los plazos de elaboración son variables entre los diferentes procesos y suelen ser de varias semanas. Los métodos más conocidos para su obtención son los siguientes.[11]

Evolución y mejora del proceso Direct AIM, obteniendo insertos en forma de cáscara tanto para núcleos como para cavidades. Estas cáscaras se rigidizan mediante el relleno posterior de una resina con granalla metálica o aleaciones metálicas de bajo punto de fusión, que mejoran su conductividad térmica. Se incorporan además unos canales de refrigeración que permiten acortar los tiempos de ciclo, y se añade además un recubrimiento a las superficies de la cavidad de los insertos. Con estos moldes se pueden cubrir tiradas desde algunos centenares hasta varios miles de piezas, dependiendo de las condiciones de proceso empleadas y del material a inyectar.



Fig. 2.10: Insertos fabricados con Direct AIM, con relleno de resina epóxica.



Fig. 2.11: Proceso de proyección metálica MCP.

Proyección metálica (MCP). Consiste en la pulverización de metales por arco eléctrico sobre una pieza modelo realizada en materiales que pueden ser: madera, yeso, cera, plásticos o metales. Estas piezas son obtenidas con técnicas tradicionales o mediante técnicas de prototipado rápido, en función de la complejidad y de los tiempos de elaboración. Se crea una cáscara de unos pocos milímetros de espesor, que tiene una alta capacidad de reproducción de detalles. Las aleaciones metálicas proyectadas tienen un punto de fusión relativamente bajo inferior a los 500°C, y pueden ser recicladas y reutilizadas. Se han de escoger en función de la aplicación a la que se destine la herramienta: estampación metálica. inyección de termoplásticos, termoconformado, soplado, etc.. En su aplicación para moldes de inyección se emplean las aleaciones de más elevado punto de fusión para obtener las cáscaras. Con la ayuda de unos bastidores de acero, y tras ubicar adecuadamente las cáscaras se procede al relleno posterior de las mismas con una aleación metálica de bajo punto de fusión o con una resina epóxica con alto contenido en granalla o polvo de aluminio. La tirada de piezas con estos moldes puede estar entre varias decenas o unos pocos miles de piezas dependiendo de la presión de inyección, del plástico a inyectar y su carga, así

como de la complejidad de la pieza. Las ventajas de este proceso consisten en la rapidez de obtención de la cáscara metálica, y el que no existen grandes limitaciones dimensionales. Sin embargo presenta ciertos problemas en piezas con geometrías complejas y por la porosidad de la cáscara. [12]

Procedimiento 3D Keltool (3D System). El proceso requiere de un modelo preciso y de muy buen acabado superficial, que se emplea para obtener un molde de silicona. En él se vierte una mezcla de acero para herramientas A6 y carburo de tungsteno en polvo, con un aglutinante de polimerización. Tras unas dieciocho horas de curado se extrae la pieza resultante y se sinteriza las partículas metálicas en un horno con atmósfera reductora de hidrógeno, donde se quema también el aglutinante. El proceso continúa con la infiltración de cobre en la porosidad de la pieza con un volumen aproximado del 30% del total. Finalmente se mecaniza el inserto para su ensamble en la placa de un molde soporte. El acero A6 aporta una excelente resistencia al desgaste, mientras el carburo de tungsteno una elevada dureza y el cobre mejora la conductividad térmica, especialmente importante en los moldes de inyección. Este proceso también se emplea para la obtención de electrodos EDM. 3D Keltool se adapta mejor a moldes complejos de múltiples cavidades, consiguiendo capacidades similares a moldes de producción. Se producen ahorros en un 50% del tiempo necesario con respecto a los procesos tradicionales. [13]



Fig. 2.12: Molde fabricado con insertos 3D Keltool.



Fig 2.13: Piezas generadas por el sistema SLS rapid Tool.

Proceso SLS Rapid Tool (DTM). Es un método directo para la obtención de insertos metálicos a partir de la técnica de sinterización selectiva. Consiste en emplear como material de sinterizado una mezcla de polvo de acero, cromo, níquel o bronce con una resina aglutinante. Se obtiene en primer lugar el inserto completo, incluyendo los canales de refrigeración, por sinterización de la resina. El segundo paso consiste en llevar a un horno donde se produce simultáneamente la sinterización de las partículas metálicas, la eliminación de la resina y la infiltración de bronce por efecto capilar en los huecos del inserto. Este último paso requiere de un tiempo aproximado a 24 horas, que implica un ahorro muy significativo en comparación con el proceso anterior. El proceso concluye con la adaptación y ensamble en el molde soporte.

- Proceso DMLS (EOS). Consiste en la sinterización directa de polvo de acero con un láser de gran potencia. Se obtiene el inserto con su circuito de refrigeración directamente y sin necesidad de procesos térmicos adicionales. Este inserto queda con unas tensiones internas originadas por la deposición capa a capa del metal fundido, que provocan deformaciones que han de ser controladas mediante elementos de refuerzo en acero, y limita las dimensiones del inserto. La rugosidad superficial resultante es deficiente para muchas aplicaciones presentando problemas en el desmoldeo de piezas. Esto obliga a recubrir las superficies de cavidad con resinas epóxicas de altas prestaciones, aluminio fundido, o a la compactación de las mismas mediante la proyección de microesferas de acero.[11]
- Níquel electroconformado (CEMCOM). Proceso electrolítico que describiremos en más detalle en los siguientes capítulos. En este caso concreto consiste en aplicar una delgada capa de níquel de 0.25 décimas de milímetro sobre una pieza modelo SLA con un excelente acabado superficial. La cáscara electroconformada es reforzada con un relleno cerámico para formar el inserto, y posteriormente ajustada y ensamblada en el portamoldes. Con este tipo de herramientas se han conseguido tiradas de varias decenas de miles de piezas, convirtiéndose casi en utillajes de producción. Este proceso es capaz de reproducir hasta el más mínimo detalle, siendo empleado a menudo en texturizados y piezas en miniatura. [14]

Ninguna de estas alternativas presenta ventajas notorias y aplastantes frete a las otras, por lo que todas ellas son usadas en aplicaciones para las que mejor se adaptan. La combinación de estas técnicas y las tradicionales permitirán sin duda reducir los tiempos y costes para obtener esas preseries funcionales, e incluso cambiar la filosofía constructiva de las futuras herramientas de producción.

Capítulo 3

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y PROCESO DE ELECTROCONFORMADO

3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y PROCESO DE ELECTROCONFORMADO.

En este capítulo se presentan los distintos elementos que constituyen un sistema de electroconformado desarrollado en el Laboratorio de Fabricación Integrada (LFI) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Se describe también el proceso de electroconformado, y del equipo empleado en este trabajo de investigación. El electroconformado se puede aplicar con diferentes metales, aunque en este proyecto nos hemos concentrado en el níquel como material a electrodepositar.

3.1 Definición de electroconformado.

Según la definición estándar adoptada por Comité B 8 del ASTM, "electroconformado o electroforming es la producción o reproducción de artículos mediante electrodeposición sobre un mandril o modelo, que posteriormente es separado del depósito de metal".[15][28]

Ampliando un poco más esta definición podemos indicar que el electroconformado de níquel, implica la deposición electrolítica de una capa de níquel procedente de la disolución de un electrodo de este elemento que es el ánodo del sistema, sobre un modelo electrodo que constituirá el cátodo del sistema. Se aplica para ello corriente continua entre el ánodo (+) y el cátodo (-) estando todo el sistema inmerso en una solución o baño apropiado.

3.2 Reseña histórica.

Los orígenes del electroconformado están bien documentados. El profesor B.S. Jacobi, de la Academia de las Ciencias de St. Petersburg en Rusia descubrió el proceso de electroconformado durante sus investigaciones sobre celdas galvánicas. Jacobi empleó una lámina impresa con cobre como cátodo en una solución de sulfato de cobre y electrodepositó cobre sobre la misma. A pesar de que tuvo dificultades para separar la capa electrodepositada, una vez hecho pudo observar como se había reproducido con gran precisión los detalles presentes en la lámina original. Jacobi continuó realizando sus estudios y mostró oficialmente sus resultados el 4 de Octubre de 1838 en la Academia de las Ciencias en los siguientes términos: "en el experimento con una lámina impresa cubierta por una delgada película de aceite vegetal, fue posible reproducir otra lámina de cobre en la cual hasta los más ligeros detalles del original fueron reproducidos con la mayor precisión."

En 1842, el profesor R. Boettger de Alemania electroconformó elementos de níquel con éxito empleando soluciones de sulfato de amonio y níquel. Durante la segunda mitad del siglo diecinueve se investigó también el electroconformado con hierro. Los tres metales - cobre, níquel y hierro – fueron de esta forma electrodepositados y aplicados a la producción de artículos electroconformados antes de 1870.

Nada más producirse su descubrimiento, el electroconformado fue inmediatamente aplicado a la reproducción de objetos de arte como bajo relieves, esculturas, estatuas y en la duplicación de láminas grabadas para la impresión de dinero debido a su capacidad para reproducir cualquier mínimo detalle con la máxima precisión.

Respecto a la situación actual y perspectivas de futuro podemos afirmar que las aplicaciones modernas del electroconformado son muy variadas y constituyen este proceso como una tecnología de la máxima importancia cuyo progreso y versatilidad en el futuro está plenamente garantizada.[16][28]

3.3 Capacidades y limitaciones del proceso.

Las capacidades más destacadas del electroconformado son las siguientes:[17]

- El proceso puede reproducir los detalles de una superficie con gran precisión. Un buen ejemplo de ello es la producción de moldes electroconformados con níquel para CDs. La precisión de reproducción es de una fracción de micras y es este grado de precisión lo que hace posible hoy en día la altísima calidad de las grabaciones digitales.
- Una extensión de esta capacidad radica en la posibilidad de reproducir superficies complejas, superficies lisas, rugosas, pulidas, semi-pulidas, así como combinaciones de las mismas sin la necesidad de mecanizar o pulir los componentes tras el proceso de fabricación.
- La combinación de modernos métodos fotolitográficos para generar plantillas con el proceso de electroconformado hace posible reproducir componentes lisos con extremada precisión y elevado nivel de detalle.
- Las piezas pueden reproducirse en grandes series con una elevada precisión dimensional, esto es, las piezas son casi idénticas entre sí. La precisión que se pueda obtener dependerá de la naturaleza del material del modelo y de la precisión con que éste pueda ser elaborado.
- Las propiedades físicas y mecánicas de la pieza electroconformada pueden controlarse de un modo muy estricto mediante la selección de la composición de la solución y de las condiciones de deposición. Podemos crear composites de varios metales; por ejemplo, las guías de ondas de radar realizadas en cobre y níquel con recubrimientos interno de oro o plata han sido realizadas mediante electroconformado.
- No existe virtualmente límite al tamaño del objeto que pueda electroconformarse. Se han producido tanto láminas de níquel de 4 micras de espesor como planchas de impresión textil de 6 metros de largo.
- Se pueden producir formas geométricas imposibles de realizar por cualquier otro método; por ejemplo, las guías de ondas de radar sin juntas con el interior realizadas bajo unas tolerancias muy estrictas y un acabado superficial muy alto.
- El electroconformado es aplicable a la fabricación de piezas individuales o a grandes series. En el segundo caso es posible comenzar con un "master" y construir varias generaciones de piezas electroconformadas positivas y negativas. A medida que aumenta el número de positivos, éstos son empleados para generar más negativos, incrementando la producción hasta el nivel deseado.
- En el caso específico de la producción de moldes para la fabricación de piezas de plástico, zinc y vidrio, el electroconformado puede proporcionar componentes con resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y alta resistencia al desgaste en la producción de grandes series.

Las principales limitaciones del proceso se derivan de:

- Baja velocidad de deposición.
- Dificultad para controlar las superficies exteriores.
- Aplicación casi exclusiva a productos con paredes delgadas.
- Dificultad para electroconformar determinados detalles geométricos.

3.4 Campos de aplicación.

Los campos de aplicación más representativos de este proceso son:[18]

- Herramientas y moldes.
- Productos de rejilla.
- Otros productos.

3.4.1 Herramientas y moldes.

La mayoría de los productos que se realizan mediante electroforming son herramientas. Incluidas en este grupo se encuentran los moldes, herramientas de prensa, matrices de fundición, bandas de diamantes para cortes y ruedas abrasivas. Un ejemplo bien desarrollado son los moldes para producir texturas granuladas de piel sobre superficies plásticas. Moldes electroconformados se emplean en la fabricación de reposabrazos, reflectores y paneles de instrumentos. Asimismo se emplean para obtener bolígrafos tipo "ballpoint", tapas de plástico, interruptores, productos para la industria de la goma, el chocolate o los helados, muñecos de plástico y lentes Fresnel de plástico.



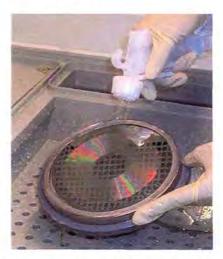


Fig. 3.1: Máster electroconformado con níquel y disco grabable de policarbonato cubierto de platino.

Tiene amplia aplicación en aquellos procesos donde la habilidad para reproducir hasta el más mínimo detalle es crítica tal y como puede ser en fonógrafos, video disc, compact disc y placas de impresión para sellos y monedas.

Las planchas para reproducir imágenes holográficas se realizan en electroforming de níquel debido a la necesidad de reproducir fielmente líneas muy finas que varían en profundidad y anchura, a fin de obtener el efecto holográfico deseado. Estas imágenes multicolor aparecen en tarjetas de crédito, informes corporativos anuales, portadas de revistas y papel moneda para evitar su falsificación.

En los últimos años podemos observar una tendencia a aumentar las dimensiones de los productos realizados con moldes fabricados a partir del electroconformado de níquel. La compañía Electronics Metal Finishing (EMF) de Colorado Springs, se ha especializado en la producción de moldes de grandes dimensiones. Lleva más de 25 años de experiencia en la investigación y desarrollo del proceso. Posee uno de los mayores tanques dedicado exclusivamente al electroforming en el mundo con 191.000 litros de capacidad y 166.000 litros de solución de sulfamato de níquel.

Un logro singular lo ha constituido la producción de herramientas de electroconformado para el moldeo de recubrimientos de alas de grafito-epoxi para aviones a reacción que necesitó modelos de 10 metros de largo por 3,6 metros de ancho.

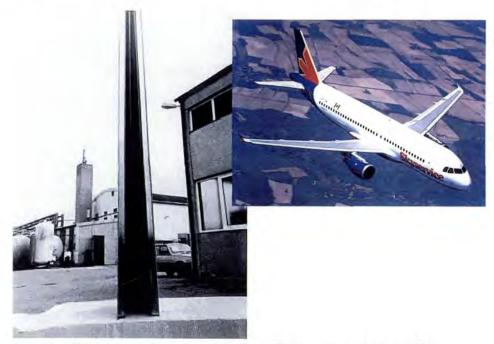


Fig. 3.2: Molde electroconformado para perfilado de alas del Airbus 320.

3.4.2 Productos de rejilla.

Los productos de rejilla electroformados con níquel comprenden una amplia gama de aplicaciones. Entre las principales destacamos las planchas de impresión para la industria textil empleadas para producir las texturas multicolores sobre los tejidos, papel de paredes y alfombras. Las planchas más populares son cilindros electroformados de níquel sin costuras consistentes en una rejilla con infinidad de pequeños orificios de elevada precisión.



Fig. 2.9: Estampaciones realizadas con cilindros electroconformados con níquel.

Un desarrollo relativamente reciente podemos encontrarlo en el electroforming continuo de sustratos porosos para la fabricación de electrodos de baterías. Aunque los detalles no son revelados, es sabido que se están empleando rejillas porosas impregnadas con hidróxido de níquel activo para la fabricación de baterías de níquel-cadmio. Otros productos de rejilla que se realizan mediante electroforming son las típicas pantallas de las máquinas de afeitar eléctricas.

3.4.3 Otros Productos.

Aparte de las herramientas y productos de rejilla podemos obtener una larga serie de productos fabricados mediante técnicas de electroconformado.

Por citar diversos ejemplos tenemos láminas de níquel con espesores entre 4 y 50 micras producidas en tambores rotacionales mediante soluciones de sulfamato de níquel concentrado, espejos espaciales y una gran variedad de productos ópticos, cámaras de combustión de cohetes, toberas y carcasas de motores, fuelles sin costuras sensibles a los cambios de presión atmosférica que se emplean en la industria aeroespacial. Las guías de ondas de radar constituyen una de las más antiguas aplicaciones de este tecnología del electroforming, mientras que los cinturones de níquel sin costuras usados en copiadoras y máquinas de cigarrillos se cuentan entre las aplicaciones firmemente establecidas.

Un campo en el que el electroconformado se está implantando con fuerza es el de la micro y nanofabricación, para la elaboración de micro dispositivos para aplicaciones médicas, ópticas y mecánicas. En la siguiente foto se observa una rueda de engranaje situada en el ojo de una aguja de costura.

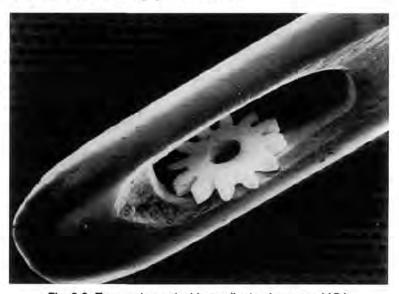


Fig. 3.3: Engranaje producido mediante el proceso LIGA

Esta relación de aplicaciones muestra los importantes segmentos de la industria donde el electroconformado tiene una amplia aplicación: aeroespacial, automoción, estampados textiles, copiadoras, productos de consumo, baterías, etc...

3.5 Principios electroquímicos.

La electrodeposición de metales es un proceso electroquímico en el que, como su propio nombre indica, se origina un cambio químico en el seno de un electrólito al pasar una corriente eléctrica a través de él.

El proceso de electrodeposición, y por tanto el de electroconformado que nos ocupa, requiere para su desarrollo un baño electrolítico de sales metálicas con dos electrodos sumergidos, un ánodo y un cátodo, por los que se hace pasar una intensidad procedente de una fuente de corriente continua. Cuando la corriente circula por el circuito los iones metálicos presentes en la solución se convierten en átomos que se depositan sobre el cátodo creando una capa más o menos uniforme de depósito, según las siguientes reacciones:

Semirreacción del ánodo: $A \leftrightarrow A^{Z^+} + ze^-$ (Oxidación) Semirreacción del cátodo: $B^{Z^+} + ze^- \leftrightarrow B$ (Reducción)



Figura 3.4: Esquema básico de un proceso de electrodeposición de cobre.

A diferencia de la mayoría de las reacciones químicas, en las reacciones electroquímicas las partículas reaccionantes no chocan entre sí, sino con fuentes y sumideros de electrones independientes, produciéndose las reacciones parciales de transferencia de electrones comentadas anteriormente.[19][28]

El mecanismo de estas reacciones catalíticas heterogéneas de electrodo, que ocurren en la interfase metal-electrolito, suele ser complejo y consta de una o varias de las siguientes etapas:

- Etapa de transporte de la especie reaccionante desde la interfase o hacia la interfase.
- Etapa de transferencia de carga a través de la interfase.
- Etapa de reacción química, que puede preceder o seguir a la reacción de transferencia de carga.
- Etapa de formación de una fase, es decir, nucleación de un cristal o crecimiento del mismo.

En cualquier mecanismo de reacción de electrodo la etapa de transferencia de carga, que es la que constituye el fundamento de este tipo de reacciones, siempre se encuentra presente, no sucediendo lo mismo con las restantes, las cuales pueden aparecer o no en función del proceso electroquímico particular que se esté considerando.

Además del mecanismo de reacción, otro parámetro importante en la electrólisis es la denominada densidad de corriente que provoca el desarrollo de las reacciones. Se designa por "f" y se define como:

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

donde I: intensidad de corriente circulante, en amperios, v

A: área del electrodo, en cm².

Se denomina corriente anódica a aquella corriente eléctrica que va en el sentido metal-electrólito, con lo que el electrodo actúa como ánodo o electrodo positivo. Por el contrario, cuando la corriente eléctrica va en el sentido opuesto, es decir desde el electrolito al metal, el electrodo actúa como cátodo o electrodo negativo, denominándose corriente catódica.

La velocidad de reacción asociada a estas reacciones, en moles por segundo y por unidad de área de la superficie del electrodo, se puede expresar en función de la densidad de corriente "i", en la forma:

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

siendo "I" la densidad de corriente, "z" el número de cargas y "F" la constante de Faraday (96.487 C/mol).

El cálculo de la cantidad de metal que se deposita al final de un tiempo determinado se calcula mediante las leyes de Faraday, cuyos enunciados son los siguientes: [20]

- La masa de cualquier sustancia depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución.
- 2. Las cantidades de las diversas sustancias liberadas en los electrodos por el paso de la misma cantidad de electricidad son proporcionales a los pesos equivalentes de las sustancias.

Si en el electrodo se deposita más de una sustancia, por ejemplo, en los casos de codeposición de hidrógeno o de electrodeposición de aleaciones metálicas, las leyes de Faraday se deben aplicar al número total de sustancias depositadas, sin especificar proporciones.

Dado que en los procesos de electrodeposición de metales, además de la deposición metálica propiamente dicha se pueden producir otras reacciones laterales, como por ejemplo, la producción de hidrógeno o la formación de hidruros, resulta que la cantidad de metal depositada puede ser inferior a la obtenida tras la aplicación de las leyes de Faraday. Esto lleva a la definición de los denominados rendimientos de corriente, o eficacia de la deposición.

Se define el rendimiento de corriente catódico (R.C.C.), como:

Además, y dado que los ánodos o fuentes de iones metálicos también experimentan procesos de disolución parcial, se define el rendimiento de corriente anódico (R.C.A.), en la forma siguiente:

3.6 Fundamentos de electrodeposición.

De todos los procesos electroquímicos existentes, es quizás el de la electrodeposición de metales el que presenta una mayor implicación en casi todos los campos industriales de fabricación: industrias del automóvil, ferretería, fontanería, bicicletas, motocicletas, herramientas, matrices, equipos de comunicaciones, equipos eléctricos y electrónicos, joyería, óptica, aeronáutica, imprenta, etc.

El proceso de la electrodeposición de un ión metálico es un proceso que tiene lugar por etapas. Cuando no circula corriente, los iones están distribuidos en la disolución-electrolito completamente al azar. Sin embargo, tras aplicar un campo eléctrico se produce una migración de esos iones hacia el cátodo, llegando primero a la doble capa eléctrica. Tras atravesarla, los iones metálicos se incorporan plenamente en la red cristalina metálica del cátodo por transferencia de carga.[20]

Si el ión metálico no está como ión simple sino en forma de ión complejo, puede existir una película superficial intermedia, de manera que solamente ocurre la transferencia de carga cuando el ión alcanza la superficie metálica catódica y siempre que se haya sobrepasado la sobretensión de activación. Una vez que ha perdido su carga, el átomo metálico se puede incorporar a la superficie catódica en un punto de mínima energía.

La descarga de iones también se puede producir si estos no son metálicos, en cuyo caso darán lugar a la formación de moléculas gaseosas, caso de moléculas de hidrógeno, pudiendo no producirse el deposito metálico. Si esto sucede aparecería un defecto conocido como picado (pitting), fenómeno que será objeto de estudio en apartados posteriores.

Por tanto, en la electrodeposición de un metal se pueden distinguir las siguientes etapas:

• Migración iónica. En el electrólito los iones metálicos están habitualmente en forma de hidratos, como es el caso, por ejemplo, del níquel en un electrólito de tipo sulfato ([Ni(H₂O)_x]²⁺), o en forma de iones complejos. En principio, los iones metálicos se encuentran ocupando toda la masa o seno del electrólito. Sin embargo, cuando se aplica un campo eléctrico, se orientan, dirigiéndose hacia la región catódica. En esta etapa los fenómenos de convección y

difusión presentan una importante influencia, sobre todo debido al empobrecimiento de esos iones, ya depositados sobre el cátodo, en la capa líquida que rodea al electrodo.

- Deposición del ión metálico. En esta etapa, el ión metálico atraviesa la denominada doble capa eléctrica y se incorpora a la estructura cristalina del depósito. La doble capa eléctrica es la región de baño electrolítico adyacente al metal y que se caracteriza por poseer un aumento del número de cationes de disolución y un exceso de electrones en el metal. En esta etapa se pueden distinguir dos subetapas simultáneas:
 - Adsorción del ión y electronación. Aquí, el catión procedente de la primera etapa atraviesa la interfase electrodo-disolución, mediante una reacción de transferencia de carga, lo que implica el paso de uno o varios electrones desde el cátodo al catión. El ión, neutralizado, se posa sobre la superficie del cátodo, pero solamente se incorpora plenamente a su retículo cristalino cuando haya perdido el agua de hidratación que lo rodea.
 - o Difusión superficial o deshidratación del ad-ión. Las dos formas en que el ión puede presentarse adsorbido sobre la superficie del cátodo son: como ad-átomo, sin carga eléctrica, o como ad-ión, con carga eléctrica residual, siendo ésta la que se admite como la más real. En esta subetapa, ese ad-ión difunde sobre la superficie del cátodo buscando el lugar más favorable para su inclusión en la red, dejando en ese caminar las moléculas de agua de hidratación y adquiriendo en su sustitución, como vecinos, a los átomos metálicos de la superficie catódica.
- Electrocristalización (crecimiento cristalino). En esta etapa del proceso se produce el crecimiento del cristal que se ha depositado en la anterior etapa. Se sabe que el ad-ión se introduce en el retículo cristalino del electrodo positivo. Entre los huecos de la red cristalina, los puntos más favorables son los puntos en el borde de un escalón, ya que una vez se haya nucleado una nueva capa, a medida que la superficie crezca, creará necesariamente un gran número de puntos en el borde.

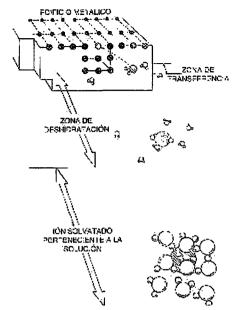


Fig. 3.6: Esquema del proceso de electrocristalización

3.6.1 Estructura de los electrodepósitos metálicos.

La estructura macroscópica final que adopta un electrodepósito variará en función de dos circunstancias primordiales:

- Que haya formación continua de núcleos, a partir de los cuáles proseguirá la formación de nuevos cristales, o bien
- Que haya crecimiento únicamente de los cristales ya existentes, inicialmente va formados.

Cuando estén presentes condiciones que favorezcan la formación de nuevos núcleos se obtendrán recubrimientos de grano fino, que contendrán un gran número de cristales pequeños. Cuando existan condiciones que favorezcan el crecimiento de los cristales primeramente formados, se obtendrán cristales grandes, aunque en número pequeño.[21]

Para los recubrimientos metálicos más comunes, las estructuras que podemos encontrar son las cuatro siguientes:

 Columnar. Son características de soluciones ácidas de iones simples que no contienen aditivos. Los depósitos con esta estructura muestran las resistencias a tracción y las durezas más bajas, así como alta ductilidad.

- Fibrosa. Esta estructura se obtiene cuando se emplean determinados aditivos en el baño, o se emplean bajas temperaturas con altas densidades de corriente, lo que favorece la formación de nuevos núcleos más que el crecimiento de los ya existentes. Sus propiedades mecánicas suelen ser intermedias entre las estructuras columnar y de grano fino.
- De grano fino. Esta estructura suele obtenerse en baños de iones complejos o con ciertos agentes de adición. Son depósitos menos duros, menos densos y muestran resistividades eléctricas más altas debido a la presencia de impurezas depositadas. En lo que respecta a las propiedades mecánicas se cumple que son relativamente duros y fuertes y algunos de ellos bastante dúctiles (30% de elongación).
- Laminar. Los granos de este tipo de estructura se distribuyen en el interior de láminas o bandas. Son características de depósitos brillantes que resultan de la adición de sustancias que contienen azufre. Son los que presentan las mayores resistencias a tracción y durezas, aunque con baja ductilidad.

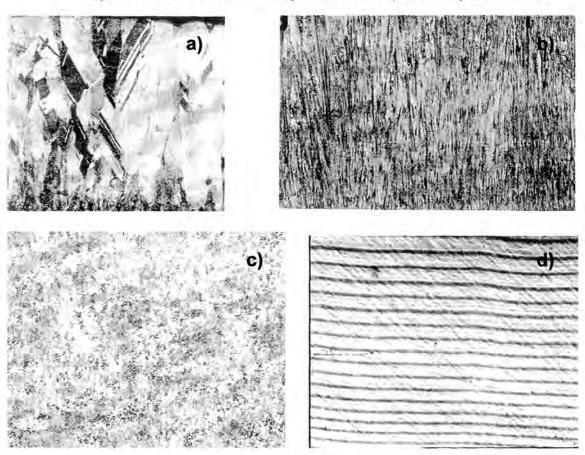


Fig. 3.7: Tipos de estructura metalográfica: a) columnar, b) fibrosa, c) de grano fino y d) laminar.

3.6.2 Parámetros influyentes en el proceso de crecimiento cristalino.

Los parámetros prácticos relacionados con los factores que permiten controlar el proceso de la electrodeposición en las diversas etapas del mismo y modificar la estructura del recubrimiento metálico, son los siguientes:[22]

- Naturaleza v estado superficial del cátodo (metal-base).
- Densidad de corriente aplicada.
- Agitación del electrolito.
- Temperatura aplicada.
- Concentración de los iones metálicos presentes.
- Concentración de iones hidrógeno (pH).
- Agentes de adición presentes.

Analicemos cada uno de ellos.

- Naturaleza y estado superficial del cátodo. Dado que no todos los recubrimientos metálicos se pueden depositar sobre cualquier metal-base, la naturaleza del modelo es de gran importancia en el proceso de electrodeposición. Si el metal-base no es el idóneo, el electrodepósito o bien se depositará de manera imperfecta o bien se desprenderá al menor golpe de tensión. El estado de la superficie del cátodo, también es muy importante, pues la estructura que posea influirá decisivamente en la electrocristalización.
- Densidad de corriente aplicada. La densidad de corriente es un parámetro que está fuertemente ligado a la temperatura de trabajo, la agitación, la concentración de la solución electrolítica, la geometría de la pieza, etc. En definitiva, se trata de un parámetro complejo a la hora de establecer cuál es el valor óptimo a utilizar en la electrodeposición. De forma genérica, se puede establecer que en las primeras etapas de la electrodeposición se ha de trabajar a densidades de corriente relativamente bajas, para posteriormente aumentar a valores que supongan una mayor velocidad de deposición. Las razones de esta variación de densidad de corriente son las siguientes: las primeras capas se deben depositar a densidades de corriente bajas para conseguir una reproducción fiel del modelo, así como no crear imperfecciones que puedan dificultar el crecimiento cristalino del metal. Por otro lado, las densidades posteriores serán las adecuadas para lograr una estructura cristalina lo más uniforme posible en un tiempo específico.
- Agitación del electrólito. Una agitación adecuada favorece los cambios entre la zona catódica y el resto del baño electrolítico, lo que provoca un espesor de

electrodepósito más uniforme. Además, permite elevar la densidad de corriente y con ello la velocidad de electrodeposición sin que ese aumento lleve consigo un aumento de electrodepósitos nodulares o del tipo arborescente.

- Temperatura aplicada. Un aumento de temperatura del baño se traduce en un mejor desprendimiento de las burbujas de hidrógeno que aparecen en el cátodo. Esto trae consigo un aumento de la movilidad de los iones metálicos y una disminución de la viscosidad, que supone un mayor reaprovisionamiento de la zona catódica, es decir, provoca que la estructura del electrodepósito sea de grano fino y brillante, sin llegar a aparecer estructura arborescente. Cuando el aumento de temperatura no va acompañado de aumento de la densidad de corriente, el efecto de ésta se traduce en un aumento del tamaño de los cristales por existir una disminución de la polarización.
- Concentración de los iones metálicos. La composición electrolítica más idónea es aquella en la que se posea pocos iones metálicos y muchas moléculas no disociadas dispuestas a disociarse rápidamente, liberando los iones metálicos que sustituyen a los que desaparecen de la película catódica durante la deposición.
- Concentración de iones hidrógeno (pH). El pH del electrolito es muy importante cuando el metal a depositar es electronegativo. El electrólito debe contener suficientes iones H⁺ para evitar la formación de hidratos y sales básicas poco solubles, y no demasiada cantidad de iones H⁺ para que sea posible su descarga en el cátodo. Para regular la cantidad de iones H⁺ se acostumbra a emplear sustancias que actúan como reguladoras o soluciones tampón, como el ácido bórico.
- Agentes de adición. Son aquellos agentes que modifican la textura cristalina del electrodepósito en cualquiera de las etapas del proceso. Su naturaleza puede ser orgánica o inorgánica y se añaden al electrolito en pequeñas cantidades. Las funciones que cumplen estos agentes son específicas y pueden ser:
 - Abrillantadores. Influyen en el crecimiento cristalino, modificando el tamaño de grano y orientando el crecimiento en una dirección determinada.
 - Nivelantes. Estos agentes se utilizan para conseguir un espesor de electrodepósito más homogéneo ya que, inhiben el crecimiento en las zonas de puntas y da más velocidad de crecimiento a los valles.

- <u>Humectantes.</u> Sustancias cuya misión es reducir la tensión superficial de las burbujas de hidrógeno y facilitar su desprendimiento. Previene el fenómeno de picado.
- o *Ductilizantes*. Agentes que se usan para disminuir las tensiones internas que se provocan por el propio proceso de electrodeposición.

3.6.3 Baño electrolítico.

El baño electrolítico conjuntamente con los ánodos empleados son los elementos básicos que establecen qué metal vamos a electrodepositar. En este trabajo nos centramos en la deposición de níquel, que se puede conseguir con varios tipos de soluciones, siendo las más importantes las mostradas en la siguiente tabla.[23]

	Níquel Watts	Sulfamato convencional	Sulfamato concentrado
Sulfato de níquel (g/l)	250 – 400	-	-
Sulfamato de níquel (g/l)	-	350 – 450	550 – 650
Cloruro de níquel (g/l)	25 – 60	5 – 30	5 – 15
Ácido bórico (g/l)	30 – 40	35 – 40	30 – 40

Tabla 3.1: Concentración de los baños electrolíticos más frecuentes.

Las soluciones de sulfamato se han convertido en las ideales para el proceso de electroconformación, ya que con ellas se obtienen depósitos con menores tensiones internas, aunque cuentan con las desventajas de ser más caras y más sensibles a los efectos de las impurezas que las soluciones Watts. La variación en la concentración de sulfamato, que permite distinguir entre convencional y concentrada, se traduce en una modificación de la velocidad a la cual se deposita el metal, es decir, entre mayor es la concentración más rápido se obtiene el espesor de capa deseado a los mismos valores de densidad de corriente, temperatura y pH.

En las soluciones de sulfamato de níquel la resistencia disminuye con el aumento de la temperatura para valores superiores a 50°C, aumenta con el aumento de pH, disminuye cuando aumenta la densidad de corriente en el cátodo, y por último, disminuye ligeramente con el aumento de níquel y cloruro en la solución.

Al baño de níquel se le añade cloruro de níquel por dos motivos fundamentales: a) mejora la conductividad de la solución y b) tiene un efecto beneficioso sobre la uniformidad de la distribución metálica en el cátodo. Además, la presencia de cloruro es esencial para la disolución de los ánodos de níquel. No obstante, su presencia aumenta las tensiones internas del depósito, con las complicaciones que ello implica, de ahí la importancia de mantener su concentración a un nivel de compromiso entre los beneficios y las desventajas que genera su presencia en el depósito.

En los procesos de electroconformado es muy habitual el uso del parámetro níquel total, que se usa para definir la concentración de iones níquel procedentes de las sales de cloruro y sulfamato de níquel presentes en el baño. Se trata éste de un factor significativo en la densidad de corriente límite, valor en el cual el crecimiento nodular o los depósitos quemados empiezan a aparecer.

La incorporación de acido bórico se realiza para que actúe en el sistema como solución tampón o reguladora, manteniendo el pH entre los valores límites de 3.5 y 4.5. La ausencia de este producto provocaría que, en las zonas de densidades de corriente más altas, el pH exceda el valor de 6,0, con la consiguiente precipitación de hidróxido de níquel. Esto último daría lugar a la obtención de depósitos quemados o a la aparición de nódulos verdes en dicho depósito. Un indicador de que el contenido en ácido bórico del baño ha bajado es la presencia de picado o rugosidad en la electroforma, especialmente en regiones de altas densidades de corriente (protuberancias o salientes).

Además de los anteriores, los baños electrolíticos de níquel suelen llevar aditivos orgánicos. Una observación a tener en cuenta cuando se emplean soluciones electrolíticas con aditivos orgánicos es la necesidad de reposición de los mismos transcurridos un cierto período de tiempo. Esto se debe a que, con el funcionamiento del sistema, se van degradando en el baño y apareciendo productos de descomposición que modifican, en la mayoría de las ocasiones de manera negativa, las propiedades de la cáscara. Para eliminar esos productos degradados es necesario realizar filtraciones periódicas en el baño con carbón activo y reponer los aditivos hasta sus valores óptimos.

Independientemente del tipo de baño elegido, en el proceso de electroconformado se debe realizar un cuidadoso control del mismo para asegurar la correcta deposición de material. Los principales parámetros a tener en cuenta son la densidad de corriente, el pH, la temperatura y la pureza del baño. No obstante, también hay que decir que la

calidad de la cáscara se encuentra influenciada, además de por los anteriores, por factores tan variados como la agitación de la solución, la adecuada filtración, la presencia de compuestos orgánicos, etc.

3.6.4 Defectos de los depósitos.

Es importante que el valor del pH del baño se mantenga dentro de un cierto intervalo que asegure la reducción de los metales antes de que se genere hidrógeno según la reacción:

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

La presencia de burbujas de hidrógeno en el baño electrolítico produce un defecto conocido como picado (pitting). Éste aparece cuando la burbuja se adhiere a la superficie del modelo e impide la deposición del metal. Además, se debe mantener el baño con una cierta agitación, mecánica o por aire. Esto favorece la homogeneidad de la solución al mismo tiempo que rompe las anteriormente mencionadas posibles burbujas de hidrógeno generadas en el proceso redox y proporciona las turbulencias necesarias para prevenir una excesiva disminución de iones.[24][28]

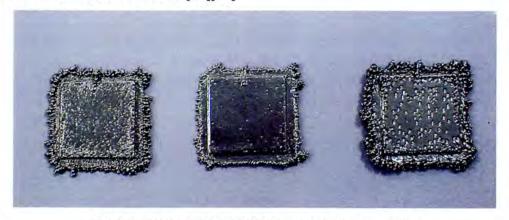


Fig. 3.8: Pruebas de control de pitting realizadas por el LFI.

Por otro lado, cualquier circunstancia que pudiera provocar rugosidades debe eliminarse ya que acarrea problemas importantes. La existencia de pequeñas pepitas, nódulos, etc., provoca que hayan mayores densidades de corriente en estas zonas, lo que se traduce en un rápido crecimiento de las ya mencionadas rugosidades debidas, por ejemplo, a la presencia de impurezas. En este sentido, la velocidad de filtración se convierte en un factor importante para evitarlas y, por tanto, de control del baño.

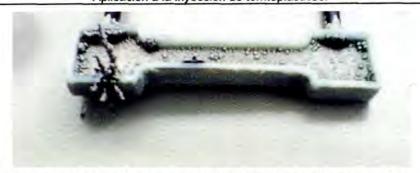


Fig. 3.9: Crecimiento nodular y arborescente en una probeta electrodepositada por el LFI.

3.6.5 Propiedades mecánicas de la cáscara electroconformada.

Las propiedades mecánicas del níquel electroconformado están influenciadas primordialmente por las siguientes variables de trabajo: pH, temperatura y densidad de corriente del cátodo. Estas variables están relacionadas entre sí y normalmente cuando se toman las pautas para aumentar la dureza del deposito de níquel se consigue además un aumento de las tensiones a tracción y unos valores significativamente inferiores de ductilidad.[25][28]

De forma genérica se puede decir que en un baño de sulfamato de níquel las tensiones a tracción de la cáscara disminuyen cuando se opera a temperaturas por encima de 50°C, aumentan cuando se aumenta el pH, y disminuyen cuando se aumenta la densidad de corriente en el cátodo. Así mismo se ha comprobado que disminuyen ligeramente cuando se aumentan las concentraciones de níquel y cloruro en el baño.

Algunas de las propiedades mecánicas se ven afectadas por el espesor de níquel en el cual se realiza el ensayo mecánico. Entre estas propiedades destaca la ductilidad o elongación porcentual, la cual aumenta cuando aumenta el espesor de níquel. Para valores superiores a 250 µm. de espesor la ductilidad permanece aproximadamente constante.

Si se comparan las propiedades mecánicas de una cáscara obtenida en un baño tipo Watts (240-300 gr/L sulfato de níquel hexahidratado, 40-60 gr/L cloruro de níquel hexahidratado, 25-40 gr/L ácido bórico) con una cáscara obtenida en un baño de sulfamato de níquel convencional (315-450 gr/L sulfamato de níquel tetrahidratado, 0-22 gr/L cloruro de Níquel hexahidratado, 30-45 gr/L de ácido bórico) se sacan las siguientes conclusiones:

- Resistencia a tracción. La resistencia a tracción de las cáscaras obtenidas por un baño de sulfamato pueden presentar valores entre 415MPa y 620 MPa, mientras que en un baño Watts estos valores oscilan entre 345MPa y 485 MPa.
 - La variabilidad de este parámetro para un baño tipo Watts sigue la siguiente tendencia:
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Permanece constante con variaciones de temperatura.
 - Permanece constante con variaciones de pH.
 - Permanece constante con variaciones de densidad de corriente.
 - o Para un baño tipo sulfamato convencional:
 - Disminuye cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Disminuye cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Presenta valores mínimos en torno a 50 °C.
 - Aumenta cuando aumenta el pH.
 - Disminuye cuando aumenta la densidad de corriente.
- Dureza: Las cáscaras obtenidas por baños de sulfamato presentan durezas de 10 HV superiores a las obtenidas en un baño Watts. Por término medio las durezas obtenidas en baño de sulfamato son del orden de 230 HV aunque pueden elevarse hasta 550 HV con aditivos. Su variación con los distintos parámetros es:
 - o Para un baño tipo Watts:
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Presenta valores mínimos en torno a 50°C.
 - Permanece constante con variaciones de pH.
 - Disminuye de forma genérica con el aumento de densidad de corriente.
 - o Para un baño tipo sulfamato convencional:
 - Disminuye cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Permanece constante con variaciones del contenido en cloruro.
 - Aumenta cuando aumenta la temperatura.
 - Aumenta cuando aumenta el pH.
 - Disminuye de forma genérica con el aumento de densidad de corriente.

- Ductilidad. Por término medio las cáscaras obtenidas por un baño de sulfamato de níquel convencional tienen un valor de un 20% de elongación y son menos dúctiles que las obtenidas por un baño Watts, que pueden llegar a ser de un 25%. La influencia de los distintos parámetros se describe a continuación:
 - o Para un baño tipo Watts:
 - Disminuye cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Disminuye cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Presenta valores máximos en torno a 60°C.
 - Permanece constante con variaciones de pH.
 - Aumenta cuando aumenta la densidad de corriente.
 - o Para un baño tipo sulfamato convencional:
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Presenta valores máximos en torno a 50°C.
 - Disminuye cuando aumenta el pH.
 - Aumenta cuando aumenta la densidad de corriente.
- Tensiones internas. Aunque en todos los procesos de electrodeposición se generan unas tensiones entre el modelo y el material que se deposita, en el proceso de electroconformado es especialmente necesario controlar las tensiones internas que tienen lugar en el material electrodepositado. Ello se debe a la necesidad de conseguir que la adhesión entre el modelo y el material depositado sea mínima, ya que deben separarse una vez haya concluido el proceso de formación. Por tanto, estas tensiones deben mantenerse lo más bajas posible. Las tensiones residuales tienen su origen en el proceso de electrocristalización y en la codeposición de impurezas tales como hidrógeno y azufre. Estas tensiones pueden provocar fallos, como por ejemplo:
 - Deformaciones de la cáscara, principalmente en el momento de separación del modelo.
 - Roturas de la cáscara, grietas, al someterla a esfuerzos en el proceso de inyección de piezas plásticas.



Fig. 3.10: Pruebas de control de tensiones internas realizadas por el LFI.

Las tensiones internas están influenciadas por el tipo de solución electrolítica a emplear. De entre todas las opciones para la deposición de níquel, los baños de sulfamato sin cloruros son los que presentan los depósitos con menores tensiones internas. Otra posibilidad de control de las tensiones internas en baños de sulfamato que contengan cloruro, aunque en pequeñas cantidades, es la adición de agentes ductilizantes. Sin embargo, a pesar del efecto reductor que se consigue con su introducción en el baño, poseen una desventaja importante. La mayoría de ellos incorporan azufre al depósito lo que significa un aumento de fragilidad del mismo cuando se opera a temperaturas superiores a 200°C. El incremento de temperatura de la solución reduce las tensiones en la capa depositada y permite intensidades más altas.

Las tensiones internas obtenidas en las cáscaras difieren en gran medida si son obtenidas por un baño o por otro. En el caso de un baño de sulfamato los valores pueden oscilar entre 3 MPa si están en ausencia de cloruros, y 50 MPa para soluciones que contenían cloruro del orden de 30gr/l. En cambio para un baño tipo Watts estos valores de tensión pueden ser de 125 MPa a 185 MPa. La influencia de las condiciones operativas modifica las tensiones internas en el sentido indicado a continuación:

- Para un baño tipo Watts:
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en níquel.
 - Aumenta cuando aumenta el contenido en cloruro.
 - Permanece constante con variaciones de la temperatura.
 - Permanece constante con variaciones de pH.
 - Aumenta cuando aumenta la densidad de corriente.
- Para un baño tipo sulfamato convencional:
 - Permanece constante con variaciones en el contenido en níquel.

- Aumenta cuando aumenta el contenido en cloruro.
- Disminuye ligeramente cuando aumenta la temperatura.
- Presenta valores mínimos en torno a valores de pH 4.
- Aumenta cuando aumenta la densidad de corriente.
- Irregularidad superficial. La presencia de rugosidades en el depósito da lugar a la formación de nódulos, crecimiento arbóreo y pepitas. Para evitarlas es importante asegurar una buena velocidad de filtración del baño, del orden de 1 o más veces el volumen del tanque por hora. La principal fuente de rugosidad procede de la suciedad del aire.

3.6.6 Espesor de depósito.

Las condiciones del baño electrolítico determinan las propiedades mecánicas de la cáscara electrodepositada, al mismo tiempo que influyen en gran medida en el espesor obtenido. El espesor del material electrodepositado sobre el modelo varía debido a la distribución de corriente. Es decir, existen zonas donde la densidad de corriente es mayor que en otras, y por lo tanto en éstas habrá una mayor electrodeposición. Éste es un aspecto importante que debe tenerse en cuenta en la fabricación del modelo y en la ubicación de los electrodos correspondientes.[26][19]

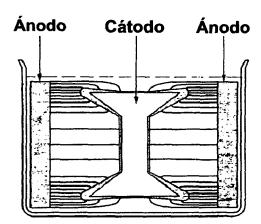


Fig. 3.11: Esquema de distribución de la densidad de corriente.

El parámetro que nos permite medir la capacidad de una solución para producir depósitos gruesos uniformemente es el conocido como throwing power. Se define como la relación entre la distribución de metal y las variables: conductividad, eficiencia de corriente, polarización y geometría. Diversos estudios han demostrado que este parámetro mejora al reducir la densidad de corriente, incrementar la distancia entre ánodo y cátodo, e incrementar pH, temperatura y contenido de metal en el baño.

Un aspecto importante a considerar, con respecto a la uniformidad de espesor, es el hecho de que el acondicionamiento del baño se debe hacer más desde el punto de vista de obtención de las propiedades mecánicas buscadas que del throwing power.

La determinación del espesor de depósito medio se realiza de forma teórica mediante la ecuación:

$$V = E \cdot C \cdot I \cdot t$$

siendo V: volumen teórico de níquel depositado.

E: eficiencia del cátodo, cuyo valor oscila entre 92 y 96%.

C: constante de deposición, que para el caso del níquel es de 3.42 · 10⁻⁵ cm³/A·sg.

I: intensidad, en Amperios, a la que se ha realizado la deposición.

t: tiempo de depósito en segundos.

Una vez conocido el volumen teórico se calcula el espesor medio en función de la superficie expuesta mediante:

$$e = \frac{V}{A}$$

siendo "e": espesor medio depositado.

A: área de depósito.

La determinación práctica del valor del espesor se lleva a cabo por pesada, es decir, calculando la masa depositada como diferencia entre la masa total después del depósito y la masa inicial antes del mismo.

Una vez conocida la masa se determina el volumen con la fórmula:

$$V=\frac{m}{d}$$

siendo "d" la densidad del níquel, cuyo valor es 8.9 g/cc.

Finalmente, una recomendación adicional a tener en cuenta en el proceso de electrodeposición para electroconformado hace referencia al área del ánodo, que debe ser de 2 a 4 veces el área del cátodo, para garantizar una deposición más uniforme.

3.7 Descripción del equipo de electroconformado.

En este apartado se describe la solución adoptada para la fabricación del equipo empleado en el presente trabajo de investigación. La finalidad del equipo es su empleo como sistema para la fabricación de moldes rápidos, con costes razonables y elevada precisión. Concretamente, se trata de obtener por electrodeposición, cáscaras de níquel que sean mecánicamente apropiadas para elaborar insertos que formen parte de moldes de inyección de termoplásticos.[27]

Los elementos que componen el equipo son los siguientes:

- Baño electrolítico.
- Ánodos de níquel.
- Tanque de proceso.
- Resistencias calefactores.
- Elementos de agitación.
- Elementos de filtración.
- Elementos de ventilación.
- Rectificador.
- Conductores.
- Bastidores o soportes de las piezas.
- Instrumentos de control.

A continuación se describen los mismos agrupándolos en diferentes sistemas.

3.7.1 Baño electrolítico.

El baño electrolítico en el cual tiene lugar el proceso de obtención de la cáscara de níquel, que habrá de constituir el inserto del molde de inyección para el presente trabajo, presenta la siguiente composición:

Sulfamato de níquel	400 ml/l
Cloruro de níquel	10g/l
Ácido bórico	50 g/l
Allbrite SLA	30 cc/l
Allbrite 703	2 cc/l

Tabla 3.2: Composición del baño electrolítico.

Los aditivos empleados en la solución objeto de estudio son los dos siguientes:

- Allbrite SLA. Actúa como nivelante mejorando la uniformidad de la deposición y como ductilizante que permite: reducir las tensiones internas, disminuir el tamaño de grano, aumentar la dureza y la resistencia a tracción. Sin embargo, el uso de este aditivo orgánico también presenta incovenientes. Estos están relacionados con la codeposición de azufre (presente en la composición del Allbrite SLA) en el depósito y el aumento de la posibilidad de fragilización de la electroforma a altas temperaturas. Es por ello que la concentración a la que debe encontrarse en el baño no debe superar los 30 cc/l.
- Allbrite 703. Es una solución acuosa de agentes tensioactivos biodegradables, que actúa en el baño disminuyendo su tensión superficial y previniendo o eliminando la producción de picado.

La siguiente tabla muestra los parámetros óptimos y los intervalos de los mismos en los cuales se debe trabajar el baño electrolítico:

Níquel total	70 g/l	60 – 90 g/l
Ión cloruro	3.5 g/l	2 – 5 g/l
Ácido bórico	50 g/l	45 – 60 g/l
pH	4.0	3.8 – 4.5
Temperatura	55°C	50 - 60°C
Densidad de corriente catódica	3 A/dm ²	1 – 4 A/dm ²

Tabla 3.3: Parámetros de referencia para el baño electrolítico utilizado.



Fig. 3.12: Baño electrolítico de sulfamato de níquel.



Fig. 3.13: Ánodos de níquel S-rounds utilizados

3.7.2 Ánodos empleados en el sistema.

En el equipo de electroconformado que se ha desarrollado se ha optado por emplear ánodos "Inco S-Rounds Electrolytic Nickel" en forma de piezas individuales, redondeadas de unos 25 mm de diámetro y 6.5 mm de espesor.

Estas piezas de níquel no presentan las esquinas o bordes afilados característicos de las piezas cuadradas, geometría que da lugar a las siguientes ventajas: mejor asentamiento en las cestas, manipulación segura, mejor fluidez que las placas cuadradas de diversos tamaños, y una buena actividad anódica.

Además, estos ánodos se caracterizan por:

- Disolución uniforme.
- Eficacia del ánodo del 100 % en cualquier tipo de solución a base de níquel, incluidas aquellas sin cloruros.
- Ausencia de residuos metálicos.
- Potenciales de disolución bajos para altas densidades de corriente.

Además, estos ánodos contienen azufre, lo que aumenta su actividad tal y como se mencionó en apartados anteriores. La composición química de los ánodos empleados es la siguiente:

Níquel más cobalto: 99.97%.

Cobalto: 0.055%.

Azufre: 0.023%.

Cobre: 0.001%.

Arsénico: 0.001%.

Carbono: 0.003%.

Plomo: 0.0001%.

Hierro: 0.0004%.

Zinc: 0.0003%.

3.7.3 Tanque y sistemas auxiliares.

El tanque de proceso o cuba de electrólisis es el recipiente donde se realiza el proceso de deposición. Por tanto, contiene la solución de electroconformado y los

siguientes dispositivos físicos: ánodos, cátodo, sistema de agitación del cátodo, conductores de corriente y diferentes sensores de control.

Se optó por la instalación de un único tanque, suficiente para realizar el trabajo de investigación aplicada que se pretende. En él se realizan tanto los procesos de electrodeposición como los de acondicionamiento del baño para la obtención de cáscaras de níquel en las mejores condiciones físicas y mecánicas.

El material empleado en su construcción debe resistir el ataque de la solución ácida que va a contener, así como el rango de temperatura que tiene que soportar. Nuestro equipo tiene un tanque de polipropileno de dimensiones de 600x400x500 (mm).

La popularidad del polipropileno (PP) se atribuye a su excelente resistencia química. Este último es superior al PVC, sobre todo, por mayor resistencia física y térmica. Utiliza técnicas de fabricación similares a las empleadas en el PVC, obteniéndose unos resultados altamente satisfactorios.

Las dimensiones fueron establecidas en función del volumen máximo de solución de sulfamato de níquel a emplear, en torno a los 100 l, y las dimensiones máximas de cáscaras a generar de 300x200 mm.

La cuba se encuentra calorifugada y se halla equipada con armadura anódicacatódica con pletina de cobre de 20x10 mm, y equipo para agitación mecánica horizontal.

Este tanque se ubica en el interior de una estructura soporte, pudiendo acceder a la
misma a través de dos tapas de metacrilato transparente. Éstas permiten reducir la
evaporación del baño durante el funcionamiento del equipo, así como evitar la caída de
impurezas en el mismo. Además se ha instalado en el lateral de la estructura, un
equipo extractor cuyo propósito fundamental es eliminar los vapores generados en el
tanque durante el desarrollo del proceso.



Fig. 3.14: Tanque de polipropileno del equipo.



Fig. 3.15: Cestas de titanio para el soporte de los ánodos.

3.7.4 Sistema de soporte de ánodos y cátodos.

Los ánodos se encuentran colocados en cestas de titanio y el conjunto se forra con bolsas de polipropileno. Las cestas de titanio son de sección rectangular con unas dimensiones de 170x200x35 mm y de 1 mm de espesor. Los laterales y el fondo son láminas sólidas mientras que el frontal y la cara trasera están constituidas por láminas perforadas. El fondo sólido de la base soporta el peso del níquel y asegura el contacto eléctrico con pequeños fragmentos de níquel hasta que se disuelven completamente.

Las cestas disponen de unos ganchos de titanio soldados a las caras sólidas que permitan colgar las mismas directamente de la barra anódica. Estos ganchos se han diseñado de forma que sea sencillo y cómodo levantar las cestas para la reposición del níquel o para mantenimiento.

Como se mencionó, se emplean bolsas fabricadas en polipropileno, material que presenta las mejores características con un coste aceptable. Su función es la de retener las impurezas que se generan en la disolución de los ánodos, y evitar que estos pasen al baño.

El cátodo o cátodos del sistema se sujetan de la barra catódica, para conseguir la agitación requerida y establecer la conexión eléctrica con la misma a través de un cable conductor.

3.7.5 Sistema de calefacción.

La resistencia o calentador tiene como misión mantener el baño a la temperatura adecuada que permita realizar el proceso de electroconformado, siendo el calentador de inmersión un método muy empleado por su facilidad de regulación y bajo coste para estos procesos de calentamiento.

Se han instalado tres resistencias de inmersión fabricadas en teflón, situadas en las paredes laterales del tanque. Tienen una potencia individual de 800 W, con lo que se satisfacen las necesidades de calentamiento previstas. El control de la temperatura se hace mediante sonda PT-100, funda pirex y caja de mando con indicador visual digital de temperatura.

3.7.6 Sistema de agitación.

La presencia de dispositivos de agitación en un baño electrolítico es necesaria en cualquier proceso de deposición, especialmente si este proceso es de electroconformado. La agitación permite mantener cierta homogeneidad de la solución, garantizando el adecuado transporte iónico, mejorando algunas propiedades mecánicas y evitando la aparición de defectos como el pitting.

El sistema de agitación más empleado es el de oscilación del cátodo. Este tipo de agitación contribuye a la obtención de depósitos uniformes incluso a altas densidades de corriente. En el equipo diseñado se ha empleado un sistema sencillo y eficiente, como es el de oscilación horizontal del cátodo. Consiste en hacer que la barra catódica desarrolle un movimiento alternativo a lo largo del tanque, lo que favorece la homogeneización del baño.

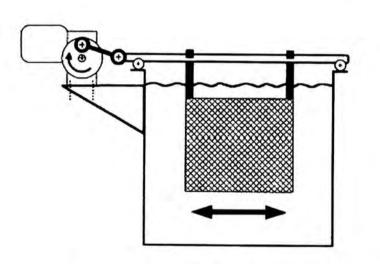




Fig. 3.16: Esquema del sistema de agitación y componentes del equipo de electroconformado.

Para ello se emplea un motor reductor que posee una velocidad de 25 r.p.m., y un mecanismo de excéntrica que genera el movimiento oscilatorio.

3.7.7 Sistema de filtración.

La obtención de depósitos de buena calidad hace imprescindible que el baño electrolítico esté libre de cualquier tipo de sustancias en suspensión. Es precisamente el sistema de filtración el encargado de mantener el baño libre de partículas y agentes

contaminantes que pudieran entorpecer el proceso de electroconformado dando lugar a piezas finales con calidades deficientes.

Se ha optado por un conjunto filtro-bomba-motor cuyas características técnicas son las siguientes: motor asíncrono trifásico de 0.18 HP y con capacidad de filtración de 1000-3500 l/hr. Se trata de una bomba centrífuga de arrastre magnético, con eje horizontal, aspiración axial e impulsión radial hacia arriba. Este tipo de bombas son las más comunes dentro de la industria del electroconformado ya que proporcionan altas relaciones de flujo y presión moderada, cumpliendo con la mayoría de las necesidades de filtración.

En el sistema que se ha fabricado, se emplea un filtro para eliminar las partículas orgánicas y las contaminantes presentes en la solución de sulfamato de níquel. La filtración se realiza mediante minifiltro modelo MF120 1M – 160/20 con cartucho de polipropileno de 20".

La aspiración e impulsión de la solución desde y hacia el tanque se realiza mediante conductos plásticos flexibles reforzados, tal como se puede observar en la figura.



Fig. 3.17: Sistema de recirculación y filtrado



Fig. 3.18: Equipo de ventilación forzada

3.7.8 Sistema de ventilación.

Dado que la mayoría de los procesos galvanotécnicos desprenden vapores de tipo tóxico e irritante, se precisa de una ventilación importante de la zona donde se hallen ubicados los equipos. Si la ventilación natural no es suficiente, se hace necesario proveer

a los tanques de equipos de aspiración adecuados que extraigan los vapores generados, especialmente si se trabaja a temperaturas relativamente altas.

Para evacuar los gases generados durante el proceso de electroconformado de níquel, se ha colocado en la estructura que encierra el tanque de proceso un extractor de aspiración lateral.

3.7.9 Cuadros de protección y regulación.

Para poder controlar el baño electrolítico y el proceso de electroconformado, es necesario disponer de una serie de instrumentos que nos den una idea de las condiciones en las que se está desarrollando el proceso. Estos se han agrupado básicamente en dos cuadros de control.

- Cuadro general de protección. Es el cuadro de conexión desde el que se realiza la alimentación mediante corriente alterna trifásica al equipo, y desde el que se establecen las conexiones de los distintos dispositivos eléctricos del sistema. Cuenta con el interruptor general, indicador luminoso de funcionamiento, pulsador de emergencia, y pulsadores de arranque y parada del sistema de filtración.
- Cuadro de regulación de los sistemas de calefacción y agitación. Este cuadro permite controlar la temperatura del baño, y activar el movimiento de agitación. Dispone de un interruptor de puesta en marcha de cada uno de los sistemas, así como un display digital y botonera del regulador de temperatura. La temperatura es controlada mediante un regulador en el que introducimos el valor de consigna que queremos conseguir. Este actúa sobre las resistencias cuando detecta una temperatura inferior a la anterior en el termopar que se encuentra dentro del baño.

3.7.10 Rectificador.

Dado que un proceso de electrodeposición requiere para su realización de corriente continua, se hace necesario el empleo de un rectificador que nos permita convertir la corriente alterna de la red. Esta es la fuente de alimentación de energía que permite las reacciones químicas, tanto en el ánodo como en el cátodo, que hacen posible el proceso.

Se ha empleado un rectificador capaz de suministrar una intensidad de hasta 50 A y un voltaje máximo de 16 V. Con estas capacidades se pueden conseguir un amplio rango de parámetros de proceso en piezas de tamaño medio, suficiente para los objetivos marcados en estos trabajos de investigación.

Sus características técnicas son:

Tensión red: 220 V-II...

Intensidad: 4,5 A.

Frecuencia: 50 Hz.

Tensión corriente continua: 0-16 V.

Intensidad máxima continua: 50 A.

Potencia útil: 0,8 kW.

Regulación continua por volante.

Refrigeración por aire.



Fig. 3.19: Cuadros de protección, regulación y rectificador.



Fig. 3.20: Equipo de electroconformado desarrollado por el LFI.

Capítulo 4

ELABORACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE NÍQUEL POR ELECTROCONFORMADO

4 ELABORACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE NÍQUEL POR ELECTROCONFORMADO.

4.1 Introducción.

Para generar estas cáscaras de níquel por electroconformado para su aplicación como inserto en moldes de inyección de termoplásticos, es necesario la realización previa de una pieza modelo. El modelo o cátodo del sistema es el elemento sobre el que se desea realizar la electrodeposición de níquel metálico.

El diseño de una cáscara arranca con el diseño de la pieza a inyectar. La cáscara puede abarcar parcial o totalmente la geometría de la pieza, o incluso generar además parte del sistema de alimentación.

Algunos de los condicionantes más importantes a considerar son:

- Complejidad geométrica propia de los núcleos o cavidades.
- Características de las tecnologías de obtención de las piezas modelos para la deposición.
- Capacidades y limitaciones del proceso de electroconformado.
- Propiedades y características aportadas a la cáscara.
- Integración de las cáscaras con el resto de componentes del molde.

4.2 Generación de modelos para electroconformado.

El modelo empleado se puede fabricar por cualquier proceso de conformación convencional, o en cualquiera de las diferentes técnicas de prototipado rápido existentes. No obstante, sea cual sea la tecnología empleada, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- Recomendaciones de diseño.
- Material del modelo.
- Operaciones de preparación.

4.2.1 Consideraciones de diseño.

El efecto de un diseño elemental sobre un producto o componente en base a la efectividad o durabilidad de la electroforma realizada, ha sido objeto de muchos estudios e investigaciones. Estos han permitido descubrir que muchos fallos anteriormente atribuibles al proceso eran realmente achacables al diseño original. El programa para mejorar y controlar la calidad del proceso debe empezar en la mesa de diseño, ya que el ingeniero se encuentra limitado debido a ciertos principios elementales del acabado mecánico y del propio proceso de electroconformado, debiendo aceptar las limitaciones impuestas por la forma y tamaño de la pieza a fin de facilitar una calidad final a un coste aceptable.[22][18]

Las características de la capa electrodepositada son determinadas principalmente por los siguientes factores:

- El sistema electrolítico empleado. Generalmente, el diseñador no tendrá capacidad para influir sobre el sistema electrolítico empleado pero sí puede intervenir de una forma más contundente sobre los otros factores. Es asimismo evidente que la experiencia llevará a la obtención de mejores resultados.
- La carencia de uniformidad local de la densidad de corriente sobre la pieza de trabajo. Considerando que la corriente desde el ánodo a la pieza sigue el camino más corto, hay que ajustar el diseño para conseguir un depósito uniforme sin acumulaciones en zonas puntuales.

 La dependencia del grado de deposición respecto a la intensidad de corriente, tiempo de deposición, eficacia de la misma, uso de ánodos auxiliares o pantallas.

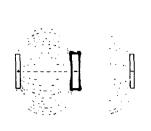


Fig. 4.1: Esquema de distribución de la densidad de corriente.

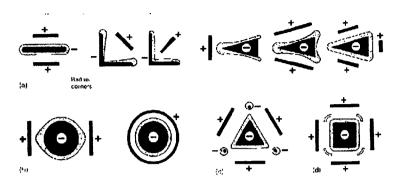


Fig. 4.2: Recomendaciones para mejorar la uniformidad del depósito.

La experiencia y el estudio de costes muestran que los modelos con geometrías sencillas resultan con acabados mejores y más económicos que aquellas que presentan geometrías complejas. Ésta debe ser la principal regla para el diseñador siempre y cuando lo permita el proyecto que se esté desarrollando. Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente se pueden establecer unos principios básicos o recomendaciones que afectan a un diseño correcto de una pieza que va a ser sometida a electroconformado.[16][19]

- Evitar cambios de sección muy pronunciados.
- Uniformidad en espesores de pared en todas las zonas para eliminar tensiones internas, distorsiones y agrietamientos.
- Evitar protuberancias y huecos que puedan retener aire o burbujas.
- Evitar ángulos agudos y entrantes profundos.
- Evitar ranuras estrechas y orificios pequeños, con profundidad inferior al doble de su diámetro.
- Evitar bordes cortantes.
- Las superficies no deben ser totalmente planas, sino ligeramente convexas con radios amplios y curvas suaves, además de amplios espacios entre entrantes poco profundos.
- Las entradas a las cavidades se deben situar en zonas de la pieza en las que queden ocultas o poco visibles, pues las señales quedarían muy exageradas al metalizar.
- Los ángulos de salida de las cavidades serán por lo menos de un grado, para asegurar la fácil extracción de la pieza.

- En caso de emplear modelos plásticos el coeficiente de expansión térmica de este material, en relación con el del metal utilizado para la electrodeposición, puede llegar a ser hasta cinco veces mayor.
- Evitar las inserciones metálicas ya que el contacto de diferentes partes metálicas puede interferir el proceso.
- Se debe considerar la temperatura de deformación por calor de los materiales empleados modelos, pues han de soportar las temperaturas del baño.
- Se deben marcar claramente en los planos las superficies significativas, aquellas de importancia crítica para el modelo.
- Se debe estudiar la forma de sujetar la pieza, quedando asegurado el contacto eléctrico sin que ello implique ocultar superficies significativas. Muchos de estos problemas pueden resolverse mediante ligeros cambios en el diseño.
- Se debe proporcionar un buen drenaje de la pieza para que pueda eliminar la solución al ser extraída del tanque. Ciertas geometrías tienden a atrapar solución, lo que puede ocasionar contaminación, corrosión y desperdicio de material, con el consiguiente incremento de costes por pérdidas químicas.
- Se deben evitar geometrías que puedan atrapar bolsas de aire al introducirse en el tanque si éstas pueden bloquear el acceso de la solución a las áreas que requieran tratamiento.

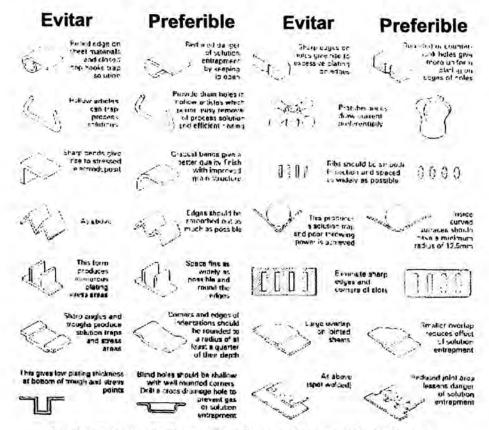


Fig. 4.3: Recomendaciones de diseño para piezas a electroconformar.

4.2.2 Material del modelo.

El modelo utilizado puede ser conductor o no, además de ser permanente, semipermanente o desechable. Dependiendo de estas características se procederá a su preparación para electroconformar y a su posterior separación de la cáscara depositada.[28][17]

El empleo de un modelo permanente o desechable dependerá en gran medida de la pieza en concreto que se vaya a electroconformar. Si no se presentan ángulos o filos entrantes con contrasalidas, es posible usar modelos rígidos permanentes que puedan separarse mecánicamente o por dilatación térmica, y ser reutilizados. En caso contrario, será necesario emplear modelos que puedan eliminarse fusión térmica, disolución química o bien emplear materiales que puedan fracturarse con cierta facilidad.

Aunque los diferentes materiales empleados para modelos tiene sus propias ventajas y desventajas, se pueden dar una serie de recomendaciones generales a seguir:

- Los modelos permanentes son más adecuados cuando se necesitan reproducciones muy exactas o se deseen producir grandes series.
- Los modelos desechables deben emplearse cuando el diseño de la pieza evite la extracción de un modelo permanente, pudiendo emplearse aleaciones con bajo punto de fusión cuando no se requieran tolerancias muy estrictas.
- Los modelos plásticos que puedan fracturarse al finalizar el proceso deben emplearse en piezas con ángulos o entradas acusadas.

Modelos conductores.

Los modelos conductores suelen ser fabricados en metales puros o aleaciones de metales que necesitan también una preparación previa. Requieren la aplicación de un recubrimiento no conductor en las superficies donde no se desea la deposición. También pueden requerir la aplicación de una delgada película que facilite la separación posterior de la cáscara electroconformada.

Los materiales más empleados como modelos conductores permanentes, son los siguientes: los aceros convencionales, los aceros inoxidables austeníticos, cobre, bronce, aleaciones de baja dilatación térmica como Invar o Kovar, o incluso níquel puro. Todos ellos presentan diferentes ventajas de uso en función de aplicaciones concretas.

También se emplean materiales conductores para realizar modelos desechables en geometrías complejas. Para estas aplicaciones los más empleados son: el aluminio y sus aleaciones, y las aleaciones de zinc. Son de fácil mecanización y pueden ser disueltos con cierta facilidad.

Modelos no conductores.

Los materiales no conductores más empleados son el vidrio, las ceras y algunos plásticos.

- El vidrio presenta como principal ventaja su gran estabilidad dimensional y su buen acabado superficial. Como desventajas están su fragilidad, su difícil mecanización y metalización.
- Las ceras pueden moldearse fácilmente y derretirse sin problemas una vez finalizado el proceso siendo además muy baratas, pero presentan numerosos inconvenientes tales como fragilidad, acabado superficial pobre, incapacidad de mantener tolerancias estrictas.
- En general los plásticos son relativamente baratos, fáciles de conformar, aunque presentan propiedades mecánicas inferiores a los modelos metálicos y su precisión y reproducción de detalles no es tan elevada. Es sin duda el grupo de materiales más empleados para la fabricación de modelos no conductores.

Modelos Plásticos

Como primer paso en el empleo de estos materiales se ha de garantizar la impermeabilización frente al agua y a otras soluciones, ya que no deben alterar su geometría cuando se introduzcan en el baño. Cuando el material no posea esta propiedad, se han de aplicar recubrimientos superficiales como: ceras, barnices, pinturas, esmaltes o lacas para hacerlos impermeables al agua. Una vez conseguido esta cualidad, deben hacerse conductoras aquellas superficies donde se quiera realizar la deposición. Normalmente se emplean recubrimientos metalizados a base de plata para lograr dicha conductividad.

Como se mencionó en el apartado anterior, es importante que el modelo mantenga su estabilidad dimensional en baños de electroconformado templados o calientes. La cera y la mayoría de los plásticos se expanden al trabajar en baños a elevadas temperaturas, por lo que en tales casos será necesario emplear soluciones que puedan trabajar a temperatura ambiente o relativamente bajas.

4.2.3 Preparación del modelo.

Como se ha comentado anteriormente, los modelos no conductores deben hacerse impermeables al agua y otras soluciones del proceso. Ello se debe a que su porosidad es muy elevada y pueden sufrir deformaciones importantes al entrar en contacto con la solución electrolito, especialmente si se encuentra a temperaturas relativamente altas.[28]

Otro aspecto importante a considerar es el buen acabado del modelo. Dado que una de las principales ventajas del proceso de electroconformado es su alta reproducibilidad de la superficie del modelo en la cáscara, es necesario que éste cuente con unos valores formales acordes con las características buscadas en el inserto.

Finalmente, el modelo hay que hacerlo conductor. Para ello se pueden emplear diversos procedimientos, entre los que cabe mencionar:

- Empleo de polvos metálicos finos dispersados mediante aglomerantes.
- Aplicación de finas trazas de grafito a las ceras y cauchos sintéticos o naturales que presenten afinidad con dicho elemento.
- Aplicación sobre la superficie del modelo de una película de plata reducida químicamente. Este proceso es el más común y se lleva a cabo mediante pulverizado o aplicación con pincel. En el proceso de pulverización, se han de proyectar al mismo tiempo sobre la superficie del modelo, la plata y el agente reductor específico empleando para ello un equipo de proyección de doble tobera. En caso de ser necesario, la película de plata puede eliminarse posteriormente de la cáscara de níquel con ácido nítrico, ácido sulfúrico templado o una solución de cianuro.

El proceso de electroless convencional no se usa generalmente para metalizar un modelo no conductivo debido a la gran adhesión que posee la cáscara con el modelo, lo que dificulta su posterior separación.

4.3 Descripción de la tecnología FDM.

Esta tecnología de prototipado rápido que vamos a emplear para generar los modelos, ha sido desarrollada por Stratasys Inc.. En concreto se utilizará la máquina

FDM 8000 que se encuentra en el Laboratorio de Fabricación Integrada del Departamento de Ingeniería Mecánica de la U.L.P.G.C..

Los prototipos son creados mediante la deposición de un hilo extruído de material en estado de semifusión que se deposita capa a capa hasta completar la pieza diseñada. El material inicialmente se encuentra en bobinas de filamentos de 1.8 mm (0.07") de diámetro y en dos tipos: a) el material propio de la pieza, y b) el soporte, material de la misma naturaleza pero de mayor fragilidad.[8]

La existencia del soporte en la elaboración de prototipos, es imprescindible en este tipo de tecnología. La cantidad que interviene de cada uno de los materiales varía dependiendo de la forma y orientación de la pieza. El soporte ayuda a mantener la estabilidad dimensional de la pieza durante su conformación, evitando desfondamientos y deformaciones.

4.3.1 Materiales del modelo.

El material de pieza más empleado con la tecnología FDM es un ABS, con las siguientes propiedades.

- Densidad específica = 1,05 gr/cm³.
- Dureza = 105 Rockwell (78 Shore D).
- Temperatura de reblandecimiento = 105°C,
- Alargamiento a la rotura = 50%.
- Resistencia a la tracción = 34.5 MPa.
- Módulo de elasticidad = 2480 MPa.
- Resistencia a la flexión = 65.5 MPa.
- Módulo de flexión = 2618 MPa.
- Resistencia al impacto con entalla Izod = 107 J/m
- Resistencia al impacto sin entalla = 1282 J/m

Este material ABS es más parecido, en la mayoría de los casos, al material definitivo de las piezas, que el utilizado en otras técnicas de prototipado rápido. Es de alta resistencia y dureza, baja contracción, rápida solidificación y facilidad de trabajo posterior mediante procesos tradicionales, y no es tóxico. Es también muy apto para recibir muchos tipos de recubrimientos superficiales. Existen otros materiales que se pueden emplear en la generación de los prototipos, entre los que destacan:

- MABS (Medical ABS): una variedad específica para prototipos que van destinados al sector médico.
- ABSi: tratado para mejorar la respuesta a los impactos, y también apto para el uso en aplicaciones médicas.
- ICW06 (Investment Casting Wax): se trata de una cera muy adecuada, para su uso posterior, en procesos de microfusión o en algunas técnicas de Rapid Tooling.
- E20: material elastomérico a base de poliester, que posibilita la obtención de piezas flexibles.

4.3.2 Proceso de deposición fundida de material.

El proceso de deposición de material para la realización de un prototipo con la tecnología FDM es el siguiente. El material es conducido por unas ruedas guías hasta el cabezal donde experimenta un aumento de temperatura ligeramente superior a su punto de fusión, de forma que es depositado en estado casi fundido y sometido a presión. Con ello se consiguen dos objetivos. Por un lado, que el material quede soldado a la capa anterior, y por otro, obtener el espesor de capa deseado, entre 0.05 a 0.762 mm, así como el ancho del material depositado, entre 0.254 y 2.54 mm. La precisión de los prototipos oscila entre 0.127 y 0.254 mm.



Fig. 4.4: Máquina FDM 8000 de Stratasvs.



Fig. 4.5: Esquema de funcionamiento del sistema FDM.

El cabezal cuenta con dos boquillas o tips: uno para el material y otro para el soporte. Además existen varios tamaños de tips: 0.254 mm (0.010"), 0.305 mm (0.012") y 0.406 mm (0.016"), que pueden intercambiarse con facilidad. Ello permite controlar el flujo de material y adaptarse a las dimensiones y detalles de cada pieza. Las temperaturas de proceso varían dependiendo de la boquilla con la que se trabaje. Para los tips de 0.012" y

0.016" la temperatura en el cabezal es de 270°C, para el material, y 265°C, para el soporte y 70°C la temperatura de la cuba. Si se trabaja con el tip de 0.010" las temperaturas son 290°C, para material, 265°C, para el soporte, y 50°C la de la cuba.

4.3.3 Software de control.

Al igual que las otras tecnologías se parte de un fichero generado en aplicaciones CAD tridimensionales donde se obtiene el modelo en sólido de la pieza a fabricar. En estos se genera el fichero de triangularización con formato STL, que en la mayoría de las diferentes tecnologías de prototipado se utiliza para la comunicación de la geometría con el software de control propio del sistema, en este caso denominado Quickslice.

A partir del formato STL, el proceso comienza con la elección del tip a utilizar y la orientación en la cual va a ser creada la pieza. Este aspecto es importante porque definirá la resistencia que vaya a tener el prototipo, así como el gasto de soporte. A continuación se procede al seccionado de la pieza en capas, y la verificación y arreglo de los posibles errores que pudiera tener el archivo en formato STL. Dentro de esta aplicación se puede arreglar con sencillas operaciones, pequeños problemas en la definición de la geometría, que por otro lado se dan con cierta frecuencia.

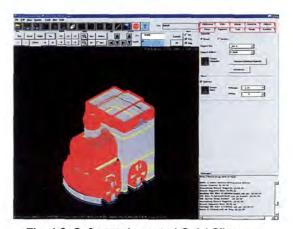


Fig. 4.6: Software de control QuickSlice.



Fig. 4.7: Proceso de construcción de pieza.

Una vez creadas las capas (Slices), se genera el soporte y la base. Ésta última consiste en unas pocas capas que son creadas con material soporte, para dar al prototipo la planitud y anclaje necesario para su desarrollo. Finalmente se han de generar las sendas (Roads), que no son más que las trayectorias que tiene que seguir el cabezal en cada una de las capas, para depositar el material y soporte necesario.

4.4 Materiales utilizados en moldes de inyección de plásticos.

Los diferentes componentes de un molde de inyección están sujetos a unas condiciones de trabajo exigentes, y de los que se espera una alta fiabilidad de funcionamiento. Esto requiere del empleo de materiales de altas prestaciones para poder soportar dichas condiciones, siendo los más usados los aceros.[29]

Sin duda alguna para validar la idoneidad o no de las cáscaras electroconformadas de níquel para su aplicación a moldes de inyección se hace necesario efectuar una breve descripción de las propiedades necesarias para esta aplicación.

Las propiedades principales que deben cumplir los materiales empleados en la fabricación de moldes de inyección, las podemos resumir en las siguientes:

- Buena resistencia al desgaste. En función del tipo de material a inyectar en general las paredes interiores del molde de inyección van a estar sometidas a una elevada fricción que será más determinante a medida que la producción aumente. Dicha fricción se verá incrementada de forma apreciable si se inyecta con fibra de vidrio o con aditivos de especial abrasión como pudieran ser determinados pigmentos de color.
- Alta resistencia a la corrosión. La abrasión de determinados componentes del plástico (relleno, refuerzos, etc.) junto con determinados agentes químicos y la acción atmosférica pueden provocar pequeños núcleos de corrosión que con el paso del tiempo pueden dañar la superficie del molde, sobre todo en aquellas zonas sometidas a gran presión.
- Buenas propiedades resistentes. El material y el diseño mecánico del molde deben ser adecuados a los elevados esfuerzos (fuerza de cierre, presión de inyección, presión de compactación) que se producen en el proceso. No obstante una baja calidad de material en este sentido se compensa con un sobredimensionamiento de las paredes y espesores del molde.
- Estabilidad dimensional. La estabilidad hay que considerarla en dos aspectos:
 - o Estabilidad de la estructura del material si el molde debe estar sometido en determinados casos a muy altas temperaturas durante el proceso de inyección. Un cambio en dicha estructura podría ocasionar deformaciones y cambios dimensionales que afectarían a la precisión.

- Estabilidad dimensional cuando, una vez mecanizado el molde y la cavidad, es necesario efectuar un tratamiento térmico para mejorar, por ejemplo la dureza. Éste es sin duda uno de los inconvenientes de los aceros que requieren un tratamiento posterior, donde incluso podrían aparecer grietas.
- Buena conductividad térmica. Independientemente del sistema de refrigeración del molde, éste debe evacuar una buena parte del calor por sí mismo. Conseguir la combinación de una mejor conductividad térmica con una buena dureza no siempre es posible. La solución de utilizar, por ejemplo aleaciones de cobre con recubrimiento de la superficie (níquel, cromo, etc.) tiene el inconveniente de que la pequeña capa del mismo se puede agrietar y fracturar en determinadas zonas por las altas presiones existentes.

Decir que en general uno de los mayores inconvenientes de los aceros es que deben ser tratados térmicamente, una vez han sido mecanizados. Esto trae como consecuencia un cambio dimensional, que en algunos casos puede ser muy considerable. Esto se podría evitar utilizando, previa a su mecanización, aceros ya tratados, pero significaría una mayor dificultad en el mecanizado por la elevada dureza de los mismos. La solución mas adecuada irá en función por un lado del nivel de dureza que se pretende conseguir y por otro lado del nivel de precisión que se considere como aceptable.

Los aceros más empleados son los siguientes.

- Aceros bonificados. El bonificado es un tratamiento cuyo fin es el de mejorar la tenacidad y resistencia del acero. Una vez bonificado se puede continuar con un temple pero que, salvo que fuese necesario para aumentar la dureza, se puede eliminar y mecanizar el molde una vez bonificado; dicho temple podría ocasionar deformaciones e incluso grietas.
- Aceros de cementación. El objetivo es aumentar la resistencia al desgaste mediante un cementado entre 900 y 1000 °C, con amplia presencia de carbono en la superficie.
- Acero para el temple integral. La dureza, resistencia y tenacidad se pueden adaptar individualmente a las necesidades por medio del proceso de revenido. Funcionan muy bien para inyección de plásticos con fibras de vidrio.
- Aceros resistentes a la corrosión. Son recomendables si se quiere evitar el inconveniente del recubrimiento de los aceros para mejoras sus características anticorrosivas. Las altas presiones pueden dañar la capa de recubrimiento.

Los procesos más habituales que mejoran la superficie y en consecuencia sus propiedades son los siguientes: nitruración, cementación, cromado duro, niquelado duro, y recubrimiento con metal duro. En términos generales estos tratamientos térmicos comentados mejoran la dureza, la resistencia al desgaste y las propiedades anticorrosivas.

4.5 Propiedades de las cáscaras electroconformadas por el LFI.

Analizamos en este apartado algunas de las propiedades mecánicas más relevantes que se obtuvieron en las cáscaras electroconformadas, que se han empleado para la elaboración de insertos en este trabajo de investigación.[27]

4.5.1 Dureza.

El valor de la dureza es una magnitud que normalmente se usa para dar una indicación de la resistencia a tracción del material, así como de su resistencia al desgaste y penetración. Un material de grano fino es más duro y más fuerte que un material de grano grueso, dado que tiene un área límite de grano mayor para impedir dislocaciones.

Las mediciones de dureza implican hacer una indentación sobre la superficie o sección transversal para depósitos delgados. El indentador tiene una geometría específica y se aplica con una carga determinada. En el caso de los recubrimientos de níquel industriales, la determinación de dureza más común es el método Vickers que fuerza una punta de diamante de forma piramidal con un ángulo de 136º en la superficie bajo una carga determinada P (normalmente 100 g). La dureza se expresa como:

$$H_V = \frac{P}{S}$$

donde "S" es la superficie de la huella medida con un microscopio.

La superficie de la probeta debe ser pulida, plana, estar limpia, homogénea y perpendicular a la punta, sin óxidos ni lubricantes. Este método permite medir piezas muy delgadas con cargas pequeñas, hasta espesores del orden de 0.05 mm. La medida de la microdureza de los recubrimientos depositados se recoge en la ASTM B 578. La medición de dureza se llevó a cabo con Microdurómetro HX-1000-TM de la firma Remet, con cámara digital acoplada modelo KC-581C.

Existen agentes que, añadidos al baño electrolítico, aumentan la dureza del depósito en un rango relativamente amplio de condiciones operativas. Estas sustancias normalmente actúan de forma que a medida que se incrementa la concentración de aditivo, la dureza aumenta, hasta que, a partir de un cierto valor de concentración, más adiciones influyen muy poco en dicha dureza.

Los resultados obtenidos en distintas condiciones operativas ensayadas, esto es, con modificación de densidad de corriente, temperatura y pH, se se mantuvo prácticamente constante y en el rango de 500 – 600 HV, muy apropiadas para su aplicación como insertos de moldes de inyeción.

Dureza Vickers frente a densidad de corriente

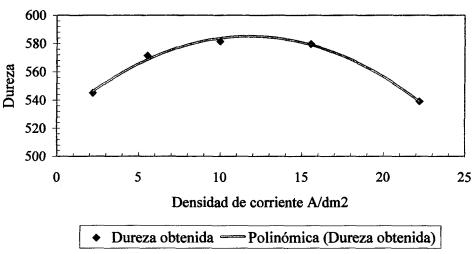


Fig. 4.8 Pruebas de variación de la dureza con la densidad de corriente para pH=4 y Temperatura=45°C, realizadas por el LFI.

En la siguiente tabla se pueden observar las características de dureza de algunos de los materiales mencionados en comparación con los de las cáscaras de níquel electroconformado, tomando como base las durezas obtenidas en los ensayos para diferentes condiciones de proceso. En general se puede decir que un acero a partir de 300 Vickers de dureza se considera como apto para su aplicación como molde de inyección. El rango de aplicabilidad oscila entre 300 y 1000 Vickers, siendo este valor último tan solo obtenible en los casos de aleaciones de metal duro para condiciones de uso extremas. Observando los valores de la tabla se puede apreciar que la dureza obtenida en los ensayos se encuentra en la gama alta de materiales en lo que a este parámetro se refiere, teniendo en cuenta que se trata de los mejores materiales y con las mejores características de dureza.

Material	Tipo de material	Dureza Vickers	
CK15	Acero de cementación	760-800	
21 MnCr15	Acero de cementación	670-760	
40CrMnMoS8	Acero para bonificación	290	
X45NiCrMo04	Acero para temple integral	520-595	
X210Cr12	Acero para temple integral	710-760	
X42Cr13	Acero resistente a la corrosión	590-630	
X36CrMo17	Acero resistente a la corrosión	525	
Cáscara de Niquel Electroconformada LFI	Cáscara de Níquel obtenida en los ensayos del LFI en diferentes condiciones de proceso y composiciones del baño	534-610	

Tabla 4.1: Dureza de algunos materiales empleados en moldes de inyección.

4.5.2 Tensiones internas.

En los procesos de electrodeposición metálica siempre se generan tensiones internas. Éstas se han de controlar con las condiciones operativas de la electrodeposición para intentar que estas alcancen el valor mínimo posible. Ya se ha mencionado los problemas que generan en las cáscaras la presencia de estas tensiones internas. Es por ello que se hace necesario medir de alguna forma las tensiones internas de las cáscaras electroconformadas.

Un método relativamente fácil de aplicar es el de la banda elástica, desarrollado por G. G. Stoney. Consistía en electroformar una cara de una banda delgada del metal base hasta obtener el espesor deseado y medir la fuerza que provoca la flexión de dicha banda. El radio de curvatura obtenido en la banda, por el esfuerzo sometido debido a las tensiones internas del depósito, puede usarse para estimar las mismas. Siguiendo el modelo de Stoney se ha desarrollado en el LFI un método para la evaluación de las tensiones internas, que consiste en la introducción en el baño de unos testigos en forma de viga en voladizo.[25]



Fig. 4.9: Testigo para evaluación de tensiones internas

Se basa en la deformación que sufre una pletina de acero de pequeño espesor al realizar la electrodeposición por una de sus caras, debido a las tensiones introducidas por

la capa de níquel depositado. Los resultados obtenidos con este método se han comparado con el modelo teórico de Stoney, y análisis MEF tanto para testigos rectos como curvos, comprobando la validez del método propuesto. Este presenta un nivel de precisión aceptable, que nos permite realizar una medición rápida, fiable e *in situ* de las tensiones internas generadas en las cáscaras de níquel.

De los resultados obtenidos se concluye que a medida que aumenta la densidad de corriente, el valor numérico de las tensiones internas se hace, en valor absoluto, mayor. La densidad de corriente más favorable, desde el punto de vista de minimizar las tensiones internas no es constante para las diferentes temperaturas en estudio.

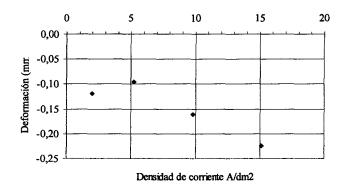


Fig. 4.10: Pruebas de evolución de la flecha máxima del testigo con la densidad de corriente, realizadas por el LFI.

Finalmente, en lo que respecta a la temperatura, se puede observar que las tensiones internas también varían con la temperatura, de tal manera que a una misma densidad de corriente (5.25 A/dm²), las tensiones internas mínimas se presentan a 45°C.

4.5.3 Resistencia a tracción.

Una de las principales dificultades a la hora de determinar los valores de resistencia a tracción que se obtuvieron de las cáscaras electroconformadas fue el hecho de que las máquinas de tracción convencionales se usan para muestras con relación ancho/espesor del orden de 20. En cambio con láminas delgadas en las que la relación ancho/espesor es del orden de 500, estos equipos no resultan adecuados. Es precisamente éste el motivo de que en lugar de medir directamente las cáscaras obtenidas, se prepararan probetas como la de la figura para poder utilizar equipamiento convencional disponible en el departamento.





Fig. 4.11: Modelo y probeta realizada por el equipo de electroconformado.

A partir de las 250 µm de espesor, la resistencia a tracción de las probetas de ensayo se mantiene prácticamente constante. Debido al largo y laborioso trabajo de generar estas probetas, se ensayaron unas pocas variando únicamente los parámetros de temperatura del baño y densidad de corriente. Los valores de resistencia a tracción obtenidos de los ensayos osciló entre 618 y 755 MPa. Los valores de elongación máxima se mantuvieron en torno al 10%, debido a que los valores altos de dureza normalmente llevan asociados una baja ductilidad. Estos resultados estaban dentro del rango de variación admisible, que el fabricante del baño establece para unas condiciones operativas adecuadas.

En la siguiente tabla se dan valores de estas propiedades para los materiales empleados habitualmente en moldes de inyección de termoplásticos.

Material Tipo de material		Resistencia a la Tracción (MPa)	% de elongación	
CK15	Acero de cementación	490-640	16	
40CrMnMoS8	Acero para bonificación	Aprox. 1000	-	
X38CrMoV51	Acero para temple integral	1450		
AISI P20	Acero para moldes de aleación media	950	20	
AISI H13	Acero para trabajar en caliente	950	20	
Cáscaras electroconformadas de Níquel		618-755	10	

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas de algunos materiales.

4.5.4 Estructura metalográfica.

En lo que respecta al crecimiento transversal experimentado por todas las cáscaras ensayadas, se observó en todos los casos analizados que éste siempre era del tipo laminar, aunque se modificaran parámetros físicos como la temperatura o la densidad de corriente. Esto parece indicar que es la composición del baño, y más concretamente la presencia de determinados aditivos lo que define de manera importante la estructura conseguida en el depósito.

Las series fueron ensayadas disminuyendo, de manera intencionada, la cantidad del tensoactivo empleado, hasta no quedar prácticamente nada en la última. Se observó que el crecimiento transversal era laminar en todos los casos, con lo que se puede concluir que el ductilizante empleado es en gran medida el responsable de este tipo de estructura. Un baño de sulfamato de níquel sin aditivo genera una estructura fibrosa.

En las siguientes figuras se observan algunos de los resultados obtenidos para diferentes cáscaras generadas, donde claramente se observa una estructura de tipo laminar. Las imágenes corresponden a secciones transversales con diferentes niveles de ataque ácido y factor de amplificación de la imagen del microscopio electrónico.

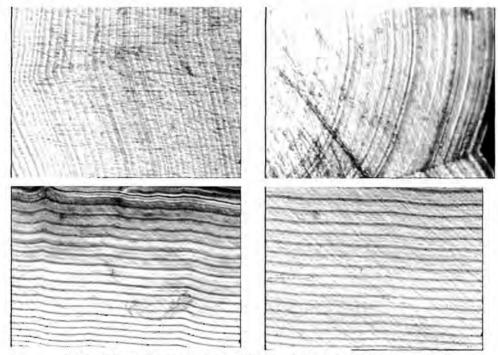


Fig 4.12: Estructura laminar de diferentes cáscaras obtenidas por el LFI.

Teniendo en cuenta que la finalidad de la cáscara obtenida es la de funcionar como inserto en un molde de inyección de termoplásticos, este tipo de estructura laminar es la más apropiada pues sus características mecánicas son elevadas en resistencia mecánica y dureza.

Como conclusión y tras la observación de todas las muestras, parece confirmarse que el espesor de capa varía en función de la densidad de corriente y de la temperatura. Sin embargo, y debido a la presencia de picado que distorsionaba la formación de las capas no es posible definir cuantitativamente cuánto es esa variación.

En la siguiente tabla se puede observar el grado de cumplimiento de las cáscaras de níquel electroconformadas teniendo en cuenta que van a formar parte de un conjunto que forma el inserto. Es importante llegados a este punto resaltar la importancia de no observar la cáscara de níquel de forma aislada ya que algunas de las limitaciones que tiene por sí sola, en relación los materiales tradicionales, son compensados en parte por las características del resto de los componentes que forman el inserto. Los niveles de adecuación se han clasificado en bajo, medio, alto y muy alto. Se consideran cáscaras con buena calidad de depósito, con ausencia de picado y con un nivel de tensiones internas controlado por las condiciones del baño.

PROPIEDADES DE LAS CÁSCARAS ELECTROCONFORMADAS OBTENIDAS				
Propiedad	Grado de cumplimiento	Observaciones		
Alta resistencia al desgaste	Muy alto	En los resultados de dureza obtenidos se puede observar unos niveles más que aceptables.		
Alta resistencia a la corrosión	Muy alto	El Níquel se suele utilizar como recubrimiento protector de cierto tipo de moldes de inyección y con probada resistencia a la corrosión		
Alta estabilidad dimensional	Alto	La única inestabilidad dimensional puede ser ocasionada por unas tensiones internas no controladas durante el baño. En el caso de tener un bajo nivel de tensiones internas esta inestabilidad y en consecuencia la deformación no existiría. En cuanto a su comportamiento en servicio una elevada temperatura de molde combinada con tensiones internas residuales		

		acumuladas durante la conformación podrían originar
		deformaciones e incluso grietas, de ahí la importancia
		de la hipótesis de considerar que la cáscara está en
		condiciones de tensiones internas aceptables. Sin
		embargo y en cualquier caso este sería un hecho
		propio del baño electrolítico y de los parámetros
		utilizados mas que de la cáscara en sí misma.
		* Las propiedades resistentes de la cáscara de Níquel
		no son comparables con las de un molde convencional
		dado que el Níquel tiene un espesor pequeño (entre
		unas pocas décimas a unos pocos milímetros). Por lo
		tanto la capacidad resistente del inserto dependerá no
		solo de la cáscara (que será en un pequeño
Buenas	Madia*	porcentaje) sino de las propiedades de la resina y
propiedades	Medio*	carga que se integren con la cáscara además del
resistentes		marco de acero que sirve como porta-inserto dentro del
		conjunto del molde de inyección. De todas formas es
		cierto que teniendo en cuenta esta integración el
		comportamiento mecánico del inserto propuesto en
		este trabajo es inferior al de un molde estándar de
		acero.
	Medio*	* Al igual que ocurre en el caso anterior, la cáscara de
		Níquel tiene una buena conductividad térmica en si
Buena conductividad térmica		misma, pero el conjunto cáscara-inserto la tiene
		bastante baja debido principalmente a la presencia de
		resina epóxica en una buena parte del volumen. Se
		intenta mejorar con la presencia de carga metálica y
		circuito de refrigeración pero no llega a tener los
		niveles de un molde metálico. Es sin duda, junto con la
		resistencia mecánica uno de los mayores
		inconvenientes de este método.

Tabla 4.3: Aptitud de las cáscaras de níquel electroconformadas en el LFI.

Capítulo 5

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MOLDES RÁPIDOS CON INSERTOS ELECTROCONFORMADOS

5 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MOLDES RÁPIDOS CON INSERTOS ELECTROCONFORMADOS.

5.1 Descripción general de un molde de inyección.

El molde de inyección es la herramienta de este proceso de conformación, siendo su principal misión darle la forma deseada a las piezas que queremos fabricar. Son herramientas de carácter específico diseñadas expresamente para la fabricación de una pieza concreta o un conjunto limitado de piezas iguales o diferentes. Los moldes pueden llegar a ser enormemente complejos, en función de la complejidad geométrica de la pieza que tiene que generar. Por esta razón estas herramientas son de elevado coste y se han de amortizar en series grandes de producción.[30][53]

Las funciones principales de un molde de inyección son las siguientes:

- Permitir la entrada y distribución de la masa fundida.
- Moldear el plástico con la forma y características deseadas.
- Facilitar el enfriamiento de la pieza.
- Realizar el desmoldeo o extracción de pieza de forma automática.

Los moldes de inyección están formados por un conjunto de placas, que se agrupan como mínimo en dos partes. Una parte fija se une a los elementos fijos de la máquina inyectora, mientras que la otra parte móvil se une a los elementos móviles de la máquina para realizar la apertura automatizada del molde y la extracción de la pieza.

El tipo de molde más utilizado es el denominado de dos placas, donde en cada una de las placas se ha labrado la cavidad y el núcleo principal respectivamente. Los moldes de 3 placas se emplean cuando se pretende obtener las piezas separadas del sistema de alimentación. Ésta se realiza de forma automática durante la apertura del molde, y evita las posteriores labores de separación y limpieza. Aunque los residuos del sistema de alimentación pueden ser reciclados con facilidad, mediante el empleo de sistemas calientes se logra inyectar únicamente el volumen de material de la pieza. Esto se consigue mediante aporte de calor y aislamiento adecuado del sistema de alimentación. Se emplean estas soluciones en piezas gruesas que requieren grandes tiempos de enfriamiento. El incremento de coste del molde se compensa con la reducción de tiempos de ciclo, con operaciones de limpieza innecesarias y además con el ahorro de material.[31]

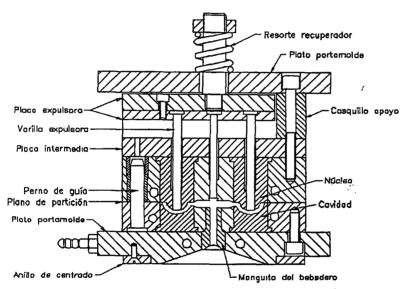


Fig. 5.1: Esquema general de un molde de inyección.

Los múltiples componentes de un molde se agrupan en los siguientes sistemas.

Sistema de placas figura o de cavidad. Son los elementos en contacto directo con la masa fundida de plástico, y que van a imprimir la forma deseada en la pieza. En ellas se generan las cavidades y núcleos que generarán las superficies tanto interiores como exteriores de la pieza. Siempre están separadas por la superficie de partición para permitir la apertura del molde y realizar la extracción de pieza. Del lado de la parte fija del molde se materializan generalmente las superficies exteriores principales de la pieza. Mientras del lado de la parte móvil se materializan las superficies interiores

- principales, a las que se quedan adheridas habitualmente las piezas durante la apertura.
- Sistema de alimentación. Se extiende desde el punto de entrada del plástico fundido en el molde, hasta la entrada del mismo en la cavidad. La alimentación se realiza normalmente desde la parte fija, arrancando desde el bebedero en contacto con la boquilla de la máquina, pasando por los canales de distribución y puertas de entrada a la cavidad en los puntos de inyección. La alimentación puede ser por canales fríos o mediante cámaras calientes, y en la inyección por puntos múltiples ésta puede hacerse de manera simultánea o secuencial.
- Sistema de refrigeración o atemperado. El enfriamiento de la pieza es de especial importancia tanto desde el punto de vista de su calidad, como de la rentabilidad económica del proceso. El molde de inyección se ha de concebir como un intercambiador de calor, y por ello se les dota de una serie de canales cercanos a las superficies de la cavidad por donde circulará el líquido refrigerante que absorbe el calor disipado. Otra función de este sistema es lograr una adecuada temperatura del molde por lo que en muchos casos se aporta calor al molde.
- Sistema de desmoldeo de contrasalidas. Aparece cuando la geometría de la pieza presenta superficies que deben liberarse con movimientos diferentes a los de apertura del molde. Son las denominadas contrasalidas. Los elementos que generan estas geometrías y se interponen a la extracción de las piezas se denominan machos o noyos. Deben moverse y liberar las piezas durante la fase de apertura del molde, para permitir la expulsión. Se emplean diferentes tipos de mecanismos, elementos hidráulicos, neumáticos y electrónicos para conseguir estos movimientos secundarios, que se han de sincronizar con el movimiento de apertura.
- Sistema de expulsión. Su misión es lograr la extracción rápida y eficaz de la pieza una vez se ha enfriado, para dejar el molde en condiciones de repetir el proceso. Existen gran variedad de alternativas de expulsión, teniendo todas en común que los elementos que lo forman empujan la pieza separándolas de las superficies de núcleos y cavidades mediante una serie de movimientos relativos entre ellos durante la apertura del molde.
- Sistema de guiado. Está formado por un conjunto de elementos que facilitan el desplazamiento y posicionamiento preciso de las diferentes partes del molde durante la fase de apertura y cierre del mismo.

 Sistema de amarre. Generalmente está formado por unas placas situadas en los extremos del molde y que permiten sujetar éste a la máquina.

5.2 Componentes normalizados para moldes.

La mayoría de los moldes de inyección se fabrican de acuerdo a unas reglas generalizadas, por lo que el diseño básico de moldes es muy similar. Existe un gran número de empresas especializadas en la fabricación de componentes básicos para moldes, que ofrecen un catálogo muy completo y detallado de una amplia variedad de elementos. La utilización de estos componentes normalizados ofrece una serie de ventajas tanto para el diseño como para la fabricación del molde:

- Se eliminan las tareas rutinarias del diseño de estos elementos.
- Se pueden probar fácilmente diferentes alternativas antes de escoger la solución definitiva.
- Permiten realizar una estimación de costes de material para el molde mucho más precisa, ya que el precio de los componentes es conocido de antemano.
- Se simplifica el mantenimiento y reparación de los moldes gracias a la intercambiabilidad de los componentes normalizados.
- El moldista se puede especializar en el mecanizado de figuras, ajustando su maquinaria y utillaje.
- Muchos componentes pueden ser reutilizados una vez termina la vida útil del molde.



Fig. 5.2: Componentes normalizados para moldes de invección.

En los moldes serie, la mayor parte de los componentes son elementos normalizados, y sólo los que dan forma a la figura son generales. Cabe hacer una distinción entre moldes que llevan mecanizada la huella directamente sobre la placa, de los que emplean insertos o postizos. En estos elementos externos se puede reproducir total o parcialmente la figura y se realizan por diferentes procesos que resultan simplificados al ser aplicados a elementos de menor tamaño. Posteriormente se insertan en cajeras previamente mecanizadas en las placas normalizadas, requiriendo una labor de ajuste un poco más compleja y casi siempre manual. En la solución adoptada para la fijación entre el inserto y la placa, no hay que olvidar los efectos del plástico fundido a elevadas presiones en el momento de la inyección. Otra razón que justifica el empleo de estos insertos, es el costo y complejidad de mecanizar aceros con tratamientos térmicos de difícil mecanización. El empleo de postizos permite en muchos casos ajustar mejor los circuitos de refrigeración a la geometría de los núcleos y cavidades.[32]

5.3 Criterios básicos de diseño de moldes rápidos electroconformados.

Los criterios básicos seguidos en el diseño de los moldes rápidos electroconformados se resumen en los siguientes puntos:[33]

- La fabricación de un molde rápido requiere de soluciones de diseño sencillas, que puedan ser llevadas a cabo de forma relativamente fácil y rápida. El objetivo es completar la herramienta en el menor tiempo posible y de forma fiable.
- Se utilizarán insertos metálicos en forma de cáscara de pequeño espesor obtenidos por electrodeposición de Níquel, para generar total o parcialmente las cavidades y/o núcleos del molde.
- Se emplearán componentes de moldes prefabricados para agilizar la fabricación de los mismos, en los que se integrarán posteriormente los insertos.
- La integración se realizará en cajeras mecanizadas en las placas figura, a las que además se les mecanizará unas ranuras para la salida del sistema de refrigeración.
- Los circuitos de refrigeración se realizarán mediante tubos de cobre de alta ductilidad, del tipo empleado en instalaciones de frío.

- Una vez montado el sistema de refrigeración se rellenará la cáscara con resina de tipo epóxico, logrando una unión adhesiva de todo el conjunto a la placa figura.
- La placa que contiene el inserto se unirá a una placa intermedia sufridera, formando un "sandwich" con el relleno y rigidizando el conjunto.

El punto de partida para el diseño de estas herramientas son las piezas a inyectar. En esta tesis vamos a trabajar con dos moldes diferentes, uno para la fabricación de unas probetas de ensayo, y otro para la fabricación de una pieza en forma de carcasa. Del primero de ellos se ha realizado un diseño completo y se ha fabricado posteriormente. En el segundo molde nos hemos quedado en un diseño avanzado pero sin completar, aunque nos ha servido para conocer mejor el comportamiento de estas herramientas. Su análisis nos ha permitido incorporar modificaciones en el diseño final del molde que hemos fabricado.[34][35]

Una especificación adicional en el diseño concreto de las herramientas de este trabajo ha sido el hecho de requerir inyectar materiales diferentes. Es por ello que la solución final de diseño no es la más óptima para ninguno de ellos, sino que se han tenido que adoptar una serie de soluciones de compromiso para consequir este objetivo.

También se han diseñado con el criterio de compartir la mayor parte de componentes normalizados, al objeto de reducir la inversión requerida en estas herramientas de investigación.

5.4 Molde para la inyección de probetas de ensayo.

Este molde permitirá la fabricación directa por inyección de probetas de uso múltiple tipo A, según se definen en la norma UNE-EN ISO 3167. La finalidad de estas probetas consiste en la determinación de las propiedades mecánicas de un conjunto de materiales representativos de la industria, inyectados en estas herramientas.[36]

Esta herramienta consiste en un sencillo molde de dos placas, con un único inserto montado en la placa de figura móvil. Se integra en un molde estandar de 175x260 mm de la empresa VAP, que se ha empleado como conjunto de componentes normalizados para el molde. La denominación completa de este molde es la siguiente:[37]

VAP - SP - n°5 / 175x260x36x22x1.2738 / 22x22x22x50x36x1.1730

La relación de componentes necesarios es la siguiente:

- Una placa de figura fija de 36 mm de espesor en acero 1.2738.
- Una placa de figura móvil de 22 mm de espesor en acero 1.2738.
- Dos placas de sujeción de 22 mm de espesor en acero 1.1730.
- Una placa intermedia de espesor 22 mm en acero 1.1730.
- Dos regletas separadoras de 50x36 mm en acero 1.1730.
- Juego de placas de expulsión de 102x30 mm en acero 1.1730.
- Cuatro guías de apertura GC / 16X34X45 en acero 1.1730.
- Dos guías de expulsión GC / 16X20X65 en acero 1.1730.
- Cuatro casquillos CV2 / 16X21 en acero 1.1730.
- Dos casquillos CV2 / 16X17 en acero 1.1730.
- Dos casquillos CV /16X21 en acero 1.1730.
- Un bebedero B1/12x46 en acero 1.2311.
- Un disco centrador DC / 100 en acero 1.1730.
- Expulsores A/4x100 en acero 1.7242.
- Tornillería TOG/ M10x25, M10x100, M8x20 en acero calidad 8.8.
- Dos cáncamos de sujeción CAN/M8 en acero calidad 8.8.

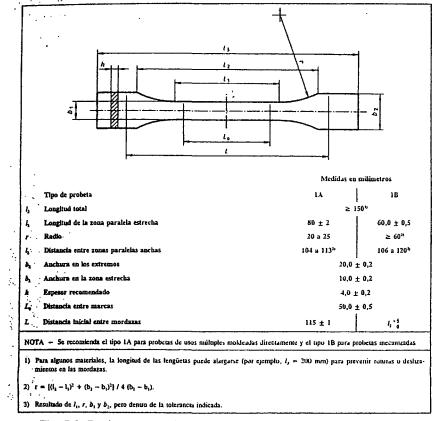


Fig. 5.3: Parámetros de diseño de las probetas de uso múltiple tipo A.

El diseño original del molde tenía un único inserto que englobaba dos cavidades y parte del sistema de alimentación. Con este diseño se realizaron los análisis del molde que se describirán en el siguiente capítulo. En la etapa final de fabricación del inserto nos encontramos con unos problemas difíciles de resolver con la geometría del mismo. Se tomó la decisión de realizar un cambio de diseño que consistió básicamente en reducir el tamaño de la cáscara, abarcando una sola cavidad y una pequeña parte del sistema de alimentación.

5.4.1 Descripción del inserto con dos cavidades.

Consiste en una delgada cáscara de Níquel que se obtiene mediante el proceso de electroconformado. Como ya hemos mencionado se trata de un inserto de dos cavidades, que se disponen paralelas entre sí y con una distancia entre ellas de 60 mm. Se encuentran decaladas 15 mm en dirección longitudinal del inserto, y equidistantes en dirección transversal respecto al centro del molde. Estas cavidades tienen en planta la forma de la probeta de uso múltiple tipo A con las dimensiones que aparecen en la siguiente figura, que cumplen con las exigencias requeridas en la citada norma. Ambas cavidades estaban comunicadas con el bebedero a través de unos canales semicirculares de diámetro 5 mm, que también están presentes en este inserto.

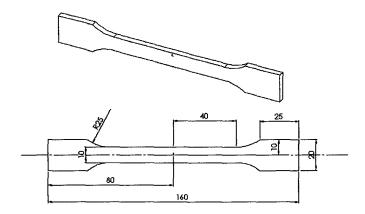


Fig. 5.4: Dimensiones de la probeta seleccionada.

La cáscara tiene unas dimensiones nominales máximas de 200 mm de largo, 100 mm de ancho, y 12 mm de altura. El espesor de la cáscara es un parámetro muy variable a lo largo de la geometría de la misma. Esto es debido a la falta de homogeneidad de la deposición originada por la propia geometría del modelo empleado y por las condiciones de proceso de la deposición. El electroconformado de este inserto se planificó para

obtener un espesor medio del orden de 1 mm, aunque los resultados obtenidos mostraron una variabilidad mayor de la esperada.

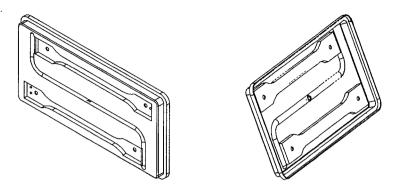


Fig. 5.5: Diseño original de la cáscara electroconformada.

La superficie plana más saliente va a formar parte del plano de partición en contacto con la placa de figura fija. En ella se ha introducido un rebaje de 3 mm en todo el contorno exterior y de profundidad de 8 mm, formando así una superficie de referencia para el ensamble del mismo. También se han introducido unos redondeos en sus esquinas para facilitar la integración en la placa normalizada que lo aloja. En ésta se han practicado unas cajeras rectangulares concéntricas en donde se situará el inserto. Entre ambas cajeras queda materializado un talón de 3x8 mm en donde apoyará el rebaje del inserto descrito previamente. También se han mecanizado sobre esta placa 4 ranuras longitudinales en las esquinas de la cajera de sección 35x12 mm y extendidas hasta el extremo de las placas. Su misión es permitir la salida al exterior del sistema de refrigeración.

La integración del inserto en la placa de figura móvil, se materializa mediante una unión de tipo adhesiva con la resina epóxica que rellena la parte trasera de la cáscara. La propia placa de figura hace de caja de encofrado para el relleno de dicha resina. Este relleno consiste en un adhesivo epoxi bicomponente, vertible y con carga de acero denominado Loctite Hysol 3472. Entre sus aplicaciones típicas está la reparación de placas de fundición en acero y la fabricación de moldes, con lo que posee propiedades de alta rigidez, resistencia a compresión y a altas temperaturas que son las propiedades que se requieren en nuestra aplicación.[38]

El ensamble del inserto se completa con la colocación de una placa intermedia en la superficie opuesta del inserto, unida mediante tornillos a la placa de figura. Se forma un "sándwich" con la resina que se mantiene confinada entre las dos placas y el inserto, con

lo que se encuentra sometida básicamente a esfuerzos de compresión durante el proceso de invección.

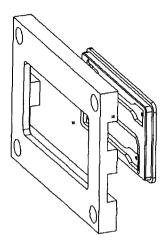


Fig. 5.6: Ensamble de la cáscara y la placa de figura.

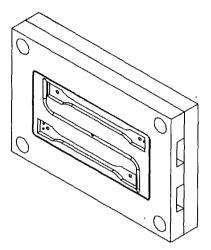


Fig. 5.7: Unión del inserto y de la placa intermedia.

Como se mencionó previamente, la cáscara de níquel realizada con este diseño quedó con una variabilidad de espesores muy alta. Oscila entre valores máximos del orden de 1.2 mm en las zonas más favorables, y valores en torno a los 0.2 mm en las zonas mas críticas. No fue posible hacer una medición extensa de este parámetro en las zonas más desfavorables por la imposibilidad de acceder a ellas con la instrumentación de medida disponible. Precisamente estas zonas de menor espesor coincidían con superficies críticas que tenían que ser rectificadas posteriormente, y que además presentaban desviaciones de forma en planitud relativamente altas. Se realizaron varios intentos por conseguir una cáscara con este diseño incorporando pequeñas modificaciones, que mejoraron los resultados pero de manera insuficiente. Se concluyó que a pesar de la simplicidad geometría aparente de la cáscara, resultaba bastante compleja de obtener con la precisión requerida por el proceso de electroconformado, y en las condiciones operativas que estábamos empleando.

5.4.2 Descripción del inserto con una cavidad.

La solución de diseño que finalmente se ha adoptado deriva de la descrita anteriormente. Ha estado condicionada por el hecho de que la decisión del cambio de diseño se tomo en una etapa de desarrollo de la herramienta muy avanzado, y teníamos que aprovechar el amplio trabajo ya realizado.

De la experiencia adquirida en los ensayos mencionados anteriormente, se incorporaron una serie de modificaciones de diseño. La más importante de todas fue la reducción de dimensiones del inserto en dirección transversal, abarcando una sola cavidad. Con ello se logra una cáscara mucho más rígida y con desviaciones de forma más estrechas. El resto de modificaciones de diseño consistieron en incorporar radios de acuerdo más amplios a todas las aristas para mejorar la homogeneidad de la deposición, e introducir ángulos de salida a la cavidad compatibles con las tolerancias dimensionales de las probetas.

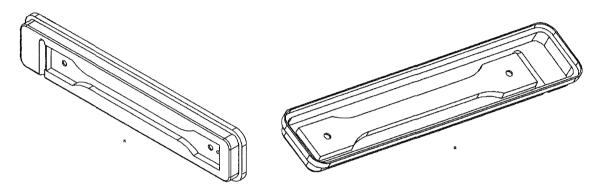


Fig. 5.8: Diseño final de la cáscara electroconformada.

El inserto final quedó con unas dimensiones de 200 mm de longitud, 40 mm de ancho y 12 mm de altura. En cuanto al espesor quedó con una distribución más homogénea y con espesores que se han podido medir en las zonas más delicadas del orden de 0.6 mm. Conserva la misma posición relativa de la probeta respecto al contorno exterior de la anterior cáscara. Mantiene con respecto al anterior diseño el rebaje de 3x8 mm en todo el contorno, así como los radios de redondeo en las esquina para facilitar la integración en las cajeras de la placa figura.

Además de las cajeras situadas a uno de los lados de la placa, en ella se ha mecanizado el resto del canal de distribución que comunica con el inserto. También se ha aprovechado para mecanizar en el otro lado una cavidad con la forma de la probeta, lo que nos permitirá realizar con la misma herramienta inyecciones sobre el inserto electroconformado y sobre la cavidad de acero. Con ello podemos obtener referentes de comparación más fiables. Se han mecanizado las ranuras para la salida del sistema de refrigeración del inserto, similares a las del diseño original de sección 40x12 mm. Para la cavidad mecanizada se han practicado una ranuras longitudinales de sección semicircular de 10 mm de diámetro y 9 mm de profundidad.

El relleno de la cáscara se ha resuelto de la misma forma pero con una resina diferente. Se trata también de una resina bicomponente con carga de aluminio en este

caso denominada Loctite Hysol 3479 de mayores prestaciones a temperaturas elevadas y resistencia a compresión.[39]

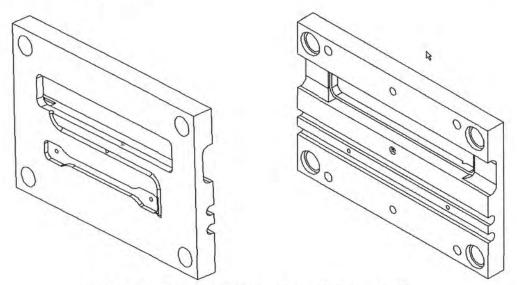


Fig. 5.9: Placa figura modificada con la cavidad mecanizada.

5.4.3 Sistemas auxiliares.

Describimos brevemente en los siguientes apartados las soluciones adoptadas para los sistemas auxiliares de este molde.

5.4.3.1 Sistema de alimentación.

Este sistema es completamente simétrico con respecto al centro del molde, con el objeto de tener las cavidades lo más equilibradas posible. El bebedero tiene una primera parte cónica de 43 mm de longitud y diámetros de 4 y 7 mm, y una segunda parte cilíndrica y concéntrica de 8 mm de diámetro y de longitud 14 mm.



Fig. 5.10: Bebedero.



Fig. 5.11: Canal de alimentación de la placa de figura fija.

Los canales de distribución tienen 112 mm de longitud cada uno y sección circular de 5 mm de diámetro, que quedan materializados entre las placas de figura. Su trayectoria y dimensiones se han fijado en un compromiso de adaptación a los diferentes tipos de plásticos que se pretenden inyectar y en disminuir las pérdidas de presión y volumen de material.[40]

La puerta de entrada a la cavidad está situada en el extremo de la probeta para evitar una influencia negativa en la zona funcional de la probeta. Es de tipo laminar extendida en casi todo el ancho de la misma, con dimensiones son de 18x1 mm en sección y de 2 mm de longitud. Con este tipo de puerta conseguimos un llenado rápido y uniforme de la cavidad, y una caída de presión relativamente baja.

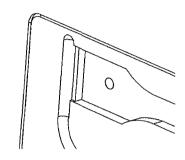


Fig. 5.12: Puerta de entrada a

En el diseño final del inserto se han mecanizado en la placa de figura móvil la parte inicial de los canales de distribución.

5.4.3.2 El sistema de refrigeración.

Está formado por unos tubos de cobre dispuestos en dirección longitudinal a las probetas y colocados únicamente en la placa de figura móvil. En la placa de figura fija no se ha previsto incluir canales de refrigeración para permitir un cómodo alojamiento de la instrumentación incorporada al molde, es decir, dos transductores de presión.

Concretamente son dos tubos de cobre de 3/8" (10 mm) de diámetro para cada probeta que discurren paralelos al eje de la misma y equidistantes. Entre ellos se coloca una pletina de cobre de 8 mm de espesor a la que se sueldan y que apoya directamente sobre la superficie posterior de la cáscara. El conjunto se coloca lógicamente antes de hacer el vertido de la resina. De esta manera establecemos un puente térmico directo entre la cáscara y los tubos de refrigeración. Ello es necesario debido a que la resina de relleno, a pesar de tener una carga metálica, posee una difusividad térmica mucho más baja que la del acero, y por tanto la transmisión de calor hasta los tubos no sería buena.

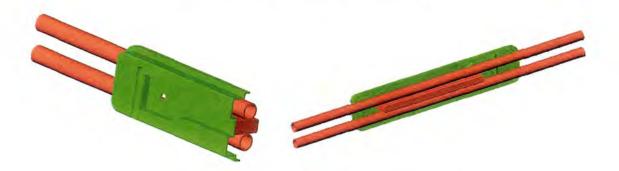


Fig. 5.13: Vistas del sistema de refrigeración empleado.

En el diseño final, la refrigeración del inserto es idéntica a la de la solución anterior. Para la cavidad mecanizada los mismos tubos se introducen en las ranuras mencionadas anteriormente, y al unir las placas intermedia y de figura móvil, éstos quedan sujetos por presión al sufrir un pequeño aplastamiento. Las ranuras mecanizadas en la placa se hicieron de sección semicircular para aumentar la superficie de contacto de ésta con el tubo de mismo diámetro.



Fig. 5.14: Sistema de refrigeración de inserto definitivo.

5.4.3.3 El sistema de expulsión.

La expulsión en este molde es muy sencilla. Está formado por 4 expulsores de 4 mm de diámetro, 2 en cada una de las probetas. Están situados en el eje longitudinal de las mismas, y centrados en la zonas extremas de mayor ancho de las probetas. Estos expulsores son impulsados por empuje del conjunto de placas base y soporte de los mismos, durante el movimiento de apertura del molde.

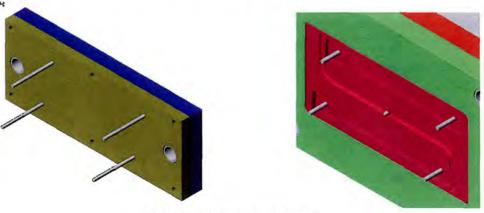


Fig. 5.15: Sistema de expulsión.

Este sistema se completa con un expulsor central al que se adhiere el bebedero de la pieza para provocar su separación. No posee movimiento relativo con la placa de figura móvil, y está situado en el centro de la misma concéntrico con el orificio del bebedero, en el que se introduce su extremo semiesférico para bifurcar el flujo de plástico.

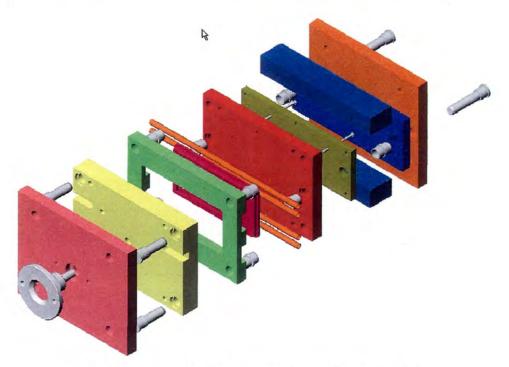


Fig. 5.16: Vista explosionada del molde con el inserto original



Fig. 5.17: Vista del molde abierto con inserto definitivo.

5.5 Molde para la inyección de carcasas.

Como se ha mencionado anteriormente, este molde es muy similar al anterior ya que comparte una gran cantidad de los componentes normalizados. Los cambios se centran en las placas figura donde se introducen insertos tanto en la placa fija como en la móvil.

La pieza a fabricar consiste en una pequeña carcasa cuyo diseño se ha extraído de la referencia [35]. Esta carcasa o cajita tiene unas dimensiones de 101.6x50.8x19.05 mm (4 x 2 x ¾ "), de espesor constante de 1.59 mm (1/16 "). Las paredes laterales tienen un ángulo de salida de 3º. Las aristas exteriores están redondeadas con un radio de dos veces el espesor de pieza, 3.18 mm. Las aristas interiores tienen un redondeo de radio igual al espesor de pieza. Posee unos detalles geométricos clásicos de componentes plásticos, incorporados con la intención de poder evaluar la facilidad de reproducción con estos insertos, y la generación de defectos típicos en piezas inyectadas. Estos detalles geométricos son:

- Agujero circular pasante en el fondo de la carcasa de diámetro 8.89 mm, para generar líneas de soldadura.
- Cilindro hueco sobre el fondo con 4 cartelas rigidizadoras exteriores, para roscar un tornillo. Diámetros exterior 10.16 mm e interior de 6.35 mm (1/4 "), y altura de 15 mm.
- Dos nervios rigidizadores transversales uno del mismo espesor que el resto de la pieza y el otro de ¾ partes del anterior.





Fig. 5.18: Geometria de la pieza en forma de carcasa.

Para generar esta geometría se decidió emplear dos insertos, uno hembra para generar las superficies exteriores de la carcasa, y otro macho para las las interiores. En las siguientes imagenes se observan los dos tipos de cáscara necesarias para generar la pieza.

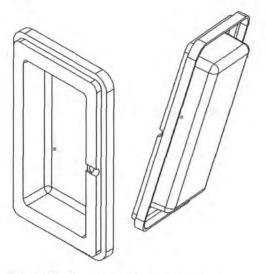


Fig. 5.19: Cáscara para el inserto hembra de la placa de figura fija.

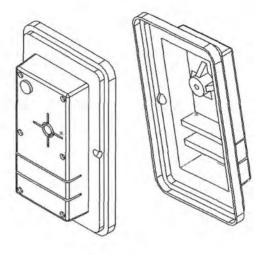


Fig. 5.20: Cáscara para el inserto macho de la placa de figura móvil.

En el molde se han dispuesto dos cavidades de esta pieza, ya que entraban bien en las dimensiones del mismo. Estas cavidades se han orientado en dirección transversal de la placa y con una doble simetría respecto al centro de la misma. Para generar esta geometría se optó por introducir dos insertos electroconformados por cavidad: dos insertos hembra colocados en la placa de figura fija, y los correspondientes insertos macho en la placa de figura móvil.

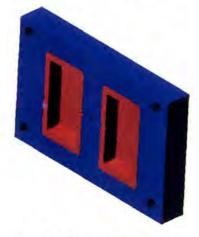


Fig. 5.21: Placa de figura fija.



Fig. 5.22: Placa de figura móvil.

La geometría de los insertos materializan además del núcleo y la cavidad, la puerta, el final de los corredores de alimentación, y parte del plano de partición. Las soluciones de diseño incorporadas a estas cáscaras son las mismas que para el inserto original del molde de las probetas.

El diseño de los sistemas auxiliares se ha resulto con soluciones muy parecidas a las del molde de las probetas. El sistema de alimentación está formado por un bebedero de idénticas dimensiones, y unos canales de alimentación también de sección circular de 5mm de diámetro aunque mucho más cortos. El punto de inyección de la pieza se sitúa en la zona central de una de las paredes laterales de la caja y en el lado opuesto al fondo de la misma. La puerta de entrada de 2 mm de longitud, tiene el mismo ancho que el canal de alimentación y espesor de 1 mm.



Fig. 5.23: Canal de alimentación y gatera.



Fig. 5.24: Expulsores salientes en el semimolde móvil.

El sistema de expulsión se ha resuelto mediante el empleo de 6 expulsores de 4 mm por cada cavidad. Estos se sitúan en el contorno del inserto macho, uno en cada una de las esquinas y dos en la zona central alineados con los anteriores. No se ha considerado colocar un expulsor central ya que por la geometría de la pieza ésta debe quedar adherida al inserto macho, provocando la rotura del bebedero.

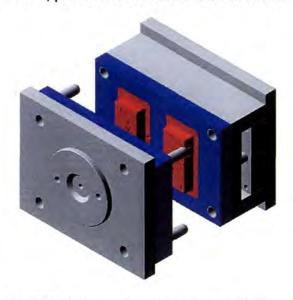


Fig. 5.25: Molde completo para carcasas abierto.

Capítulo 6 ANÁLISIS DE LOS MOLDES

6 ANÁLISIS DE LOS MOLDES.

6.1 Herramientas de simulación.

El diseño de nuevos componentes y de las herramientas necesarias para su fabricación es una de las labores encomendadas al ingeniero industrial. En el caso particular de la conformación por inyección de termoplásticos, esta labor es especialmente compleja ya que la combinación de material, molde y máquina, forma un conjunto indivisible, y cualquier modificación en esta terna lleva a soluciones que pueden ser muy diferentes entre sí.[42]

Es fundamental por tanto emplear herramientas que permitan anticipar en la medida de lo posible los resultados finales. En este aspecto las técnicas computacionales realizan una aportación inmensa, siendo imposible imaginar el desarrollo actual sin la ayuda de los programas de simulación por ordenador. La introducción de las técnicas CAD-CAE-CAM, ha supuesto una revolución dentro de los proyectos de ingeniería de todos los ámbitos, y en particular en la aplicación con nuevos materiales, como es el caso de los polímeros. Dos han sido las aportaciones principales de dichas técnicas:[43]

- Capacidad de trasladar la versatilidad propia de la inyección de termoplástico, hasta los equipos de producción de los moldes mediante técnicas CAD-CAM.
- Posibilidad de caracterizar y prever comportamientos no lineales y anisótropos,
 más ajustados a la complejidad real, mediante técnicas CAE.

6.2 Fundamento del proceso de invección de termoplásticos.

El proceso de moldeo por inyección de termoplásticos consiste esencialmente en el calentamiento del material dado en forma de polvo o gránulos, para transformarlo en una masa plástica dentro del llamado cilindro de plastificación de la inyectora, y así inyectarlo en la cavidad del molde del que tomará su forma. Dentro del proceso de inyección existen dos fases bien diferenciadas. Una fase dinámica donde se realiza el llenado con el avance del material y un importante crecimiento de la presión, y una fase estática de mantenimiento de la presión o compactación. Debido a que el molde se mantiene a una temperatura inferior al punto de fusión del polímero, éste solidifica con relativa rapidez, que está muy influenciada por el espesor de pieza. En este momento el proceso se ha completado, se puede expulsar la pieza, y preparar nuevamente el molde para repetir el ciclo de inyección.[31][55]

Este ciclo de inyección lo podemos dividir en una serie de etapas que se repiten sistemáticamente en cada una de las inyectadas. La secuencia de etapas del proceso es la siguiente:

- Cierre del molde. Consiste en la preparación del mismo para recibir el plástico.
 Se unen las placas figuras a través de las superficies de partición y se colocan en posición de forma automática el sistema de expulsión y los sistemas de desmoldeo de contrasalidas que pudiesen existir.
- 2. Fase de llenado o inyección. El flujo de plástico es impulsado a través de la boquilla y va entrando en el molde a una velocidad determinada. Con el proceso de llenado en marcha, cada vez se necesita más presión para vencer la fricción del flujo con la capa fría de plástico que se forma al entrar en contacto con las paredes del molde. La presión, temperatura y velocidad de inyección, junto con la temperatura del molde son los parámetros operativos más importantes durante esta fase.
- 3. Fase de presurización o compresión. Tan pronto se consigue el llenado volumétrico de la cavidad del molde, da comienzo esta fase que tiene como fin la compactación de la pieza. Debido a la compresibilidad del flujo se puede añadir una mayor cantidad de plástico que suele estar en torno a un 10% más de material. En esta fase la velocidad del flujo va disminuyendo a la vez que se produce un aumento brusco de la presión.
- 4. Fase de compensación o de presión posterior. Su misión es conseguir una pieza con un volumen final constante. Debido a que durante el enfriamiento el

material se contrae dentro de la cavidad, es necesario aportar más material de forma gradual. Esto ocurre cuando el plástico empieza a cambiar del estado líquido al sólido. El punto en el que se conmuta las fases de presurización y compensación, así como el valor de presión necesario y la duración de esta última fase son aspectos muy importantes para obtener una calidad de pieza adecuada.

- 5. Enfriamiento. Comienza desde que el plástico entra en el molde, y se ha de prolongar hasta que termina el desmoldeo de la pieza. Para ello es necesario que se alcance una temperatura homogénea en la pieza y ésta consiga una estabilidad de forma suficiente. Esta etapa se acelera con la incorporación de los sistemas de refrigeración del molde, ya que el enfriamiento requiere la mayor parte del tiempo del ciclo debido a la baja conductividad térmica de los polímeros. Durante esta etapa la máquina aprovecha para iniciar la dosificación para la inyección de la siguiente pieza. Parámetros importantes de esta fase son la carrera y el volumen de dosificación, que son particulares para cada molde.
- 6. Apertura del molde y expulsión de pieza. Se realiza de forma automática la separación de las placas figura, la activación de los sistemas de desmoldeo de contrasalidas que existan y el sistema de expulsión. Con ello liberamos el molde de cualquier resto de plástico solidificado que interrumpa el ciclo de trabajo.

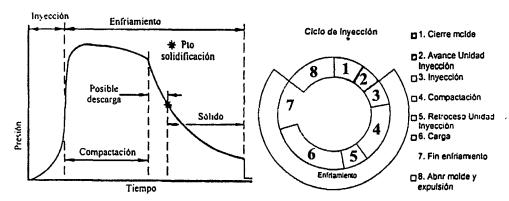


Fig. 6.1: Ciclo de inyección y evolución de la presión de inyección durante el mismo.

Los parámetros operativos más importantes del proceso son los siguientes:

- Temperatura de inyección.
- Temperatura del molde.
- Velocidad de inyección.
- Presión de compactación.
- Tiempo de compactación.
- Tiempo de enfriamiento.

6.3 Simulación con Moldflow Plastic Adviser (MPA).

La simulación con herramientas de análisis reológico proporcionan gran información para la comprensión de los fenómenos que ocurren en el interior del molde, gracias a la representación gráfica de las numerosas variables posibles y muy difíciles de medir durante el proceso. Igualmente valiosa es la información aportada al diseñador en la fase inicial de desarrollo de piezas inyectadas, que le permite ir evaluando alternativas con cierta facilidad hasta alcanzar la más idónea para dicha aplicación. Para evitar los gastos y retrasos considerables que conllevan las dificultades encontradas en el entorno de fabricación, es necesario tomar en cuenta la influencia de diferentes variables en la fabricabilidad de la pieza: geometría, selección de material, diseño de molde y condiciones de proceso. El empleo de herramientas de análisis predictivo para simular procesos de moldeo permite optimizar dichas variables durante las fases de diseño de la pieza y molde, con un coste mínimo y gran repercusión. Estas técnicas también tienen sus limitaciones y conviene conocerlas para no llevarnos desagradables sorpresas al comparar los resultados de las simulaciones con la aplicación real a nivel industrial.

El programa que hemos empleado para este análisis es el MOLDFLOW PLASTICS ADVISER 6.0. Esta herramienta surge de la unión de dos paquete el C-MOLD 3D QuickFill y del MPA 4.0 de Moldflow, tras la fusión de estas dos compañías. Es una sencilla y potente aplicación desarrollada para el apoyo en la determinación de la fabricabilidad por inyección de una pieza de plástico. Está dividido en dos módulos que son el Part Adviser para el análisis únicamente de la pieza o cavidad, y el Mold Adviser que incorpora módulos de cálculo que permiten definir y analizar el molde en su conjunto.[44][60]

Los análisis que se pueden realizar son los siguientes:

- Condiciones de inyección recomendadas para la pieza.
- Localización del punto de inyección óptimo atendiendo al mínimo recorrido del flujo.
- Flujo de plástico.
- Calidad de refrigeración.
- Marcas de contracción.
- Equilibrado de corredores.

De un análisis completo se pueden extraer los siguientes resultados:

Localización del punto de inyección.

- Eficacia de llenado.
 - o Tiempo de llenado.
 - o Temperatura del frente de flujo.
 - o Presión de inyección.
- Predicción de calidad de pieza.
- Marcas de contracción.
- Atrapamientos de aire.
- Líneas de soldadura.
- Calidad de refrigeración.
 - o Variabilidad del tiempo de enfriamiento.
 - o Variabilidad de la temperatura superficial.

Los dos primeros análisis aportan una información valiosa para iniciar los análisis de flujo de plástico con unos buenos parámetros de partida. Después de haber realizado un análisis del flujo plástico, se puede comprobar la eficacia de llenado derivada de parámetros como el tiempo de llenado, presión de inyección y temperatura del frente de flujo. En función de los resultados obtenidos la eficacia puede ser calificada de alta, media o baja, y en los últimos casos nos informa de las causas y nos sugiere soluciones para su mejora. También nos da unos resultados de la calidad de pieza esperada relacionados básicamente con la apariencia de la misma. El resto de análisis son complementarios para la optimización del diseño.

Los pasos a seguir para un análisis efectivo con esta aplicación son:

- 1. Crear la cavidad. Ésta se puede generar en cualquier aplicación CAD e importar a esta herramienta en los clásicos archivos de formato gráfico. La fiabilidad de los resultados depende de la adaptación de la pieza a geometrías de pared delgada. Espesores bastante más pequeños que las otras dimensiones de pieza.
- 2. **Selección del material.** Se puede seleccionar entre los de la base de datos del programa, o introducir los datos que caracterizan un polímero concreto.
- 3. **Determinación del punto de inyección.** Pueden ser uno o varios y se pueden fijar directamente o seleccionando el recomendado por el módulo de localización del punto de inyección más adecuado.
- 4. Selección del tipo de análisis. Podemos realizar aquí un análisis sólo de pieza o hacer un análisis del molde para lo que se requiere más información aportada en los siguientes apartados.
- 5. Definición del molde. Aquí se añade información relativa a:

- Orientación de la cavidad.
- Opción de más cavidades iguales o diferentes.
- Fijación del plano de partición.
- Establecimiento de las dimensiones del molde.
- Especificación del tamaño y forma del sistema de alimentación.
- Generación de bebedero, canales y puertas.

6. Ejecución del análisis.

- 7. Evaluación de los resultados. Revisión de los resultados de la eficacia de llenado y de calidad de pieza. Comprobación del resto de resultados para ver si puede ser fabricada o aparece alguna deficiencia que pueda ser corregida.
- 8. **Modificación del diseño y reejecución del análisis.** Si fuera necesario para corregir algún defecto o mejorar los resultados obtenidos previamente.
- 9. Generación del informe de resultados.

6.3.1 Análisis del molde de las probetas.

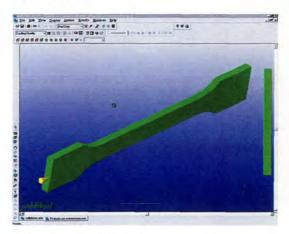
Con este análisis se pretendía comprobar que este molde no presentaba problemas de inyección para el conjunto de materiales que se pretendía analizar. Se realizó para seis materiales diferentes que representan una amplia tipología de materiales empleados en la industria de inyección de termoplásticos. En concreto fueron los siguientes:

- Polietileno de alta densidad PEHD, 12450 N de Dow Chemicals USA.
- Poliestireno de alto impacto PSHI, Novacor 3350 de Novacor Chemicals Incorporated.
- Poliamida PA66, Technyl A20 V25 de Rhodia Engineering Plastics.
- ABS, Mágnum 9010 de Dow Chemicals USA.
- Policarbonato PC, Makrolon 2608 de Bayer USA.
- Policarbonato cargado con un 30% de fibra de vidrio PC30%FG, Lexan 3413 de GE Plastics (USA).

Los datos de los polímeros concretos fueron extraídos de la base de datos del MPA, intentando que fuesen los mismos o los más parecidos a los empleados en el trabajos de Polosky [34], y en las condiciones de inyección recomendadas por el fabricante.

Para el análisis con esta herramienta se han seguido los pasos descritos en el apartado anterior. La geometría de la pieza fue generada en el programa de modelado de

sólidos SOLIDWORKS, y exportada en el archivo probeta.stl al MPA. En esta aplicación comenzamos por un análisis de la geometría de la pieza, para lo cual tuvimos que elegir uno de los materiales y un punto de inyección. Este tipo de análisis es interesante para comprobar que la geometría de la pieza no presenta problemas. En el caso concreto de la probeta, al tratarse de una geometría muy sencilla de un espesor grande se comprobó que existe una alta eficacia de llenado y buena calidad de pieza en todos los materiales analizados.



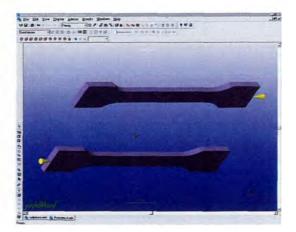


Fig. 6.2: Análisis de la geometría de pieza.

Fig. 6.3: Inicio del análisis del molde.

En una segunda etapa pasamos a analizar el molde en su conjunto, para lo cual tuvimos que crear un duplicado de la cavidad y colocarlas en la posición relativa entre ellas adecuada. Se pasó a fijar en segundo lugar el polímero concreto y las condiciones de inyección: temperatura de inyección y temperatura de molde. Seguidamente se fijó el punto de inyección para cada una de las cavidades.

A continuación se establecieron las dimensiones de placas y la posición del plano de partición.

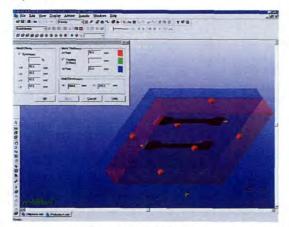




Fig. 6.4: Definición de dimensiones de placa y posición del plano de partición.

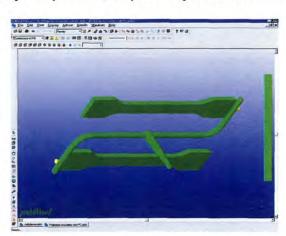
El paso siguiente consiste en establecer la trayectoria de los canales de alimentación, así como su tipología y dimensiones de su sección, de la puerta de entrada y del bebedero





Fig. 6.5: Definición del bebedero, corredores y gatera.

Una vez generados todos los elementos necesarios para realizar un análisis de flujo de plástico, se puede ejecutar el mismo.



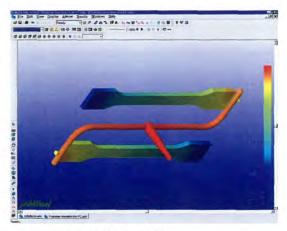


Fig. 6.6: Resultados de eficacia de llenado y tiempo de inyección.

Los resultados más representativos obtenidos para los diferentes plásticos analizados, junto con las condiciones de inyección, los resumimos en la siguiente tabla.

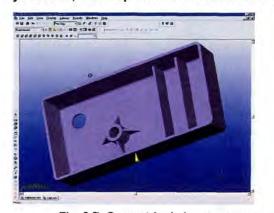
	PEHD	PSHI	PA66	ABS	PC	PC30%FG
Temp. de Inyección (°C)	220	240	285	240	300	329
Temp. de Molde (°C)	30	50	80	60	90	99
Tiempo de Inyección (sg)	2.24	3.05	2.64	4.67	2.64	1.42
Presión de Inyección (MPa)	23.53	19.46	17.71	28.78	43.19	37.74
F. de cierre en llenado (Ton)	2.11	2.00	1.80	2.85	3.56	3.09
F. de cierre en compac. (Ton)	12.66	10.47	9.53	15.48	23.24	20.31
Tiempo de ciclo (sg)	23.28	30.66	16.41	43.61	37.94	31.06

Tabla 6.1: Resumen de resultados para los plásticos analizados.

En estos resultados se observa una gran variabilidad, característica de las propiedades bien diferentes de este conjunto de materiales. En todos ellos la eficacia de llenado y la calidad de pieza resultaron aceptables para las condiciones de inyección empleadas. Se observa claramente que las condiciones más exigentes, desde el punto de vista mecánico para el molde, corresponden al caso de la inyección con PC. Los valores de presión de inyección alcanzada y de fuerza de cierre en compactación para este material, han sido los valores empleados para el análisis mecánico del molde.

6.3.2 Análisis del molde de las carcasas.

Los pasos seguidos han sido los mismos que en el análisis del anterior molde. En el análisis de la cavidad por separado observamos que en esta pieza la presión necesaria para conseguir el llenado de la misma era bastante más alto que para la probeta. Esto es debido a que su geometría es más representativa del tipo de piezas comúnmente inyectadas, con espesores bastante más pequeños que las otras dimensiones.



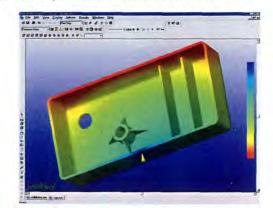


Fig. 6.7: Geometría de la carcasa y resultados de la caída de presión en la cavidad.

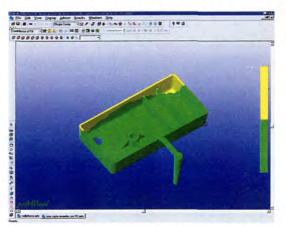
En el análisis del molde se contemplaron dos casos. Primero que tuviésemos una sola cavidad y en segundo lugar con dos cavidades, manteniendo la posición relativa de ambas. El punto de inyección se fijó en ambos casos en la misma posición, siendo la misma empleada para esta pieza en los trabajos de Paradís [35]. El sistema de alimentación es mucho más pequeño que la solución adoptada para el molde de las probetas, y por ello la caída de presión se produce casi en su totalidad dentro de la cavidad.





Fig. 6.8: Sistemas de alimentación de los dos casos analizados.

Los resultados obtenidos para los dos casos comentados y para los diferentes materiales analizados los resumimos en las siguientes tablas.



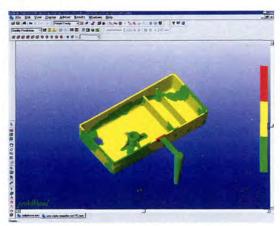
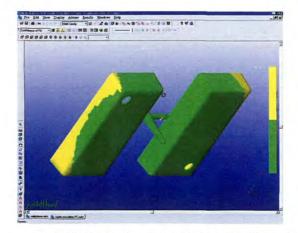


Fig. 6.9: Resultados del análisis de una sola cavidad: eficacia de llenado y calidad de pieza.

	PEHD	PSHI	PA66	ABS	PC	PC30%FG
Temp. de Inyección (°C)	220	240	285	240	300	329
Temp. de Molde (°C)	30	50	80	60	90	99
Tiempo de Inyección (sg)	0.76	0.76	0.76	1.53	1.33	0.77
Presión de Inyección (MPa)	50.64	35.23	44.93	55.30	92.57	80.64
F. de cierre en llenado (Ton)	7.54	5.74	6.81	9.27	16.34	12.87
F. de cierre en compac. (Ton)	31.59	31.80	28.03	34.50	57.75	50.30
Tiempo de ciclo (sg)	5.88	6.94	4.88	8.75	7.92	7.44

Tabla 6.2: Resumen de resultados de los materiales analizados.



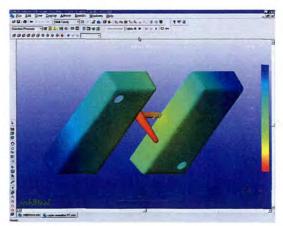


Fig 6.10: Resultados del análisis con doble cavidad: Eficacia de llenado y presión de inyección.

	PEHD	PSHI	PA66	ABS	PC	PC30%FG
Temp. de Inyección (°C)	220	240	285	240	300	329
Temp. de Molde (°C)	30	50	80	60	90	99
Tiempo de Inyección (sg)	0.75	0.75	0.75	1.49	1.30	0.56
Presión de Inyección (MPa)	51.32	35.09	44.74	56.24	92.75	86.77
F. de cierre en llenado (Ton)	16.73	11.44	13.29	20.79	33.05	25.95
F. de cierre en compac. (Ton)	64.02	43.77	55.81	70.16	115.33	108.24
Tiempo de ciclo (sg)	5.91	6.94	4.88	8.81	7.94	7.41

Tabla 6.3: Resultados para los diferentes polímeros estudiados.

Todos los materiales analizados para esta geometría de pieza presentaban una eficacia de llenado alta o muy alta. En cuanto a la calidad de pieza en la mayoría era calificada de media y únicamente el PSHI tenía una calificación de alta. Estos resultados recomiendan hacer modificaciones en las condiciones de inyección para mejorar la calidad de pieza.

En esta geometría, más habitual en piezas inyectadas, podemos observar como resultados adicionales del programa, los lugares donde se producen los atrapamientos de aire y las líneas de soldadura.

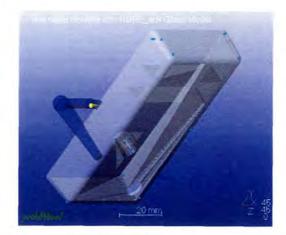


Fig. 6.11: Posición de los posibles atrapamientos de aire.



Fig. 6.12: Posición de las líneas de soldadura generadas.

6.4 Análisis con ANSYS.

El cálculo estructural de un problema como el que estamos tratando, es prácticamente imposible abordarlos por métodos tradicionales. El empleo de varios tipos de materiales trabajando de forma conjunta y con propiedades muy diferentes, así como una geometría de cierta complejidad hace necesario el empleo de aplicaciones CAE. Empleamos para este análisis el programa ANSYS basado en el método de los elementos finitos para realizar el análisis estructural del inserto.[45]

6.4.1 Análisis del molde para probetas.

Con este análisis mecánico que hemos realizado se pretendía conocer el comportamiento del inserto, e identificar los puntos críticos del mismo. El problema a modelar resulta bastante complejo y se han tenido que tomar una serie de simplificaciones para poder abordar el cálculo del mismo con los recursos disponibles. De los resultados obtenidos y de las observaciones de la fase de ensayo del molde, podemos concluir que el modelo de cálculo empleado es válido para los objetivos que pretendíamos cubrir.

Como podemos observar en la imagen siguiente este molde está compuesto por un conjunto amplio de componentes normalizados. Estos han sido diseñados por el fabricante para soportar los exigentes esfuerzos a los que pueden estar sometidos ya que son empleados para herramientas de producción. Nosotros nos vamos a centrar en este análisis en evaluar el inserto desde el punto de vista estructural.

El inserto sujeto a análisis está compuesto por: la placa de figura móvil, la cáscara electroconformada, la resina de relleno y el sistema de refrigeración. Este modelo simplificado, sometido a unas adecuadas condiciones de contorno, es una buena aproximación del comportamiento real del inserto.

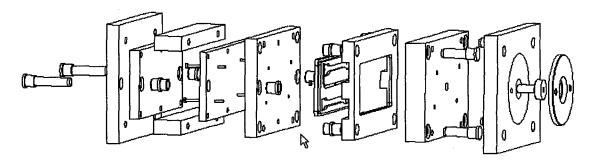


Fig. 6.13: Molde explosionado y elementos considerados en este análisis.

Los 4 taladros circulares en la placa de cavidad móvil no se han considerado, ya que en el momento en el que actúa la carga el molde está cerrado y dichos taladros se encuentran rellenos por sus correspondientes casquillos y guías.

6.4.1.1 Proceso de modelado

El modelado de este problema ha supuesto un *arduo proceso* hasta llegar a satisfacer nuestras necesidades. A continuación describimos los puntos más relevantes de esta fase de modelado del problema.

Ante un modelo de geometría compleja como el que hemos de analizar, es recomendable dibujarlo previamente utilizando un programa de diseño asistido por ordenador. Habíamos empleado el modelador de sólidos SolidWorks para generar la geometría del inserto para luego importarla desde ANSYS. Sin embargo, en nuestro caso esta importación no resultó posible y no hubo otro remedio que simplificar al máximo nuestro modelo y generarlo en el módulo de diseño de ANSYS. Este problema supuso un gran trastorno ya que en este programa, el diseño se genera con líneas que se crean a partir de puntos introducidos por sus coordenadas, las áreas a partir de las líneas antes generadas y los volúmenes a partir de dichas áreas.

Se inició el modelado del problema considerando únicamente elementos de tipo sólido para todos los componentes del inserto. Con los primeros resultados obtenidos comprobamos que el modelar un elemento de pared delgada como la cáscara, con elementos tipo sólido introducía distorsiones importantes. Esto era debido a que para mantener la relación de aspecto de los elementos usados necesitábamos introducir un mallado muy fino, que requería el empleo de equipos con una potencia de cálculo mucho más alta de los que disponíamos.

Se buscó la alternativa de modelizar la cáscara con un elemento plano, al que se le pudiera dar como una constante el espesor. Se hicieron una pruebas preliminares para validar este tipo de modelado. Se empleó un sencillo modelo formado por un cubo de resina y una delgada cáscara de níquel, sombreada en gris mas claro en las siguientes figuras. La cáscara fue modelizada con elementos sólidos y planos, obteniéndose resultados para ambos casos prácticamente iguales entre sí y a la solución analítica del problema. Se decidió a raíz de estos resultados modelizar la cáscara de níquel con un elemento plano.

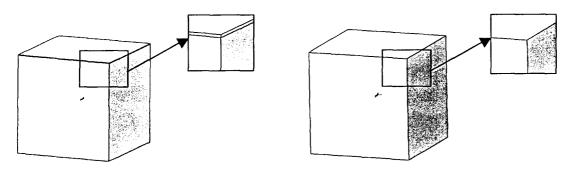


Fig. 6.14: Esquema de modelado con elementos sólidos o planos.

6.4.1.2 Tipos de elemento empleados en el modelado

Solid 95. El tipo de elemento Solid 95 se utilizará para discretizar tanto la placa de acero como el relleno de resina. Se trata de un tipo de elemento tridimensional compuesto por 20 nodos, con tres grados de libertad cada uno: las traslaciones en los ejes cartesianos. Es específico para cálculos estructurales y adecuado para modelizar elementos sólidos con bordes curvos. La geometría, localización de los nodos y el sistema de coordenadas de este elemento se muestran en la siguiente figura, donde además pueden verse las simplificaciones posibles: tetraedro, pirámide y prisma.

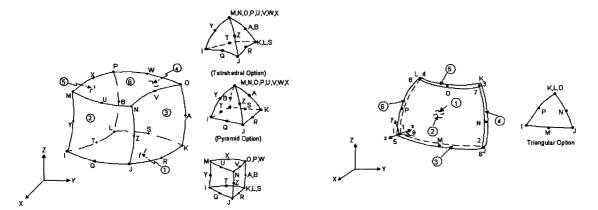


Fig. 6.15: Elemento Solid 95.

Fig. 6.16: Elemento Shell 93

Shell 93. El tipo de elemento Shell 93 se utilizará para discretizar tanto la cáscara electroconformada como los tubos de refrigeración. Se trata de un tipo de elemento compuesto por 8 nodos, con seis grados de libertad cada uno: las traslaciones y giros respecto a los ejes cartesianos. Es específico para cálculos estructurales y adecuado para modelizar cáscaras curvas. La geometría, localización de los nodos y el sistema de coordenadas de este elemento se muestran en la anterior figura, donde además puede verse una posible simplificación del elemento degenerado en una forma triangular.

En este análisis hemos considerado un espesor de cáscara constante, característica que puede darse a este elemento mediante un *parámetro*. Esto nos ha permitido simplificar las operaciones de cálculo con diferentes espesores de cáscara: 0.6, 0.9 y 1.2 mm.

Tras las simplificaciones de diseño ya mencionadas y el modelado descrito en el apartado anterior, el modelo de cálculo empleado fue el que se muestra en la siguiente figura. El mayado es de tipo no estructurado, generado automáticamente por el programa.

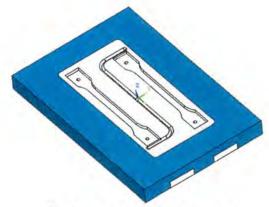


Fig. 6.17: Modelo global de análisis.



Fig. 6.18: Mallado de algunos componentes.

Los primeros resultados obtenidos con este modelo de cálculo mostraron un comportamiento aceptable. Se hicieron pruebas con diferentes espesores de cáscara para ver la influencia de este parámetro en el comportamiento del inserto. Los resultados mostraron que para los valores analizados de 0.6, 0.9 y 1.2 mm la variación tanto en tensiones como en deformaciones era despreciable. No se probaron valores mayores ya que dichos espesores iban a resultar muy difíciles de obtener para la geometría de cáscara que teníamos.

Posteriormente se decidió comprobar la influencia de la introducción de los canales de alimentación y se observó que tanto en tensiones como en deformaciones no introducían diferencias significativas. Posteriormente se decidió introducir en el modelo unos refuerzos de cobre apoyados sobre la cáscara, que aportaban mayor rigidez al inserto. La misión básica de los mismos era mejorar la transferencia de calor entre la cáscara y los canales de refrigeración.

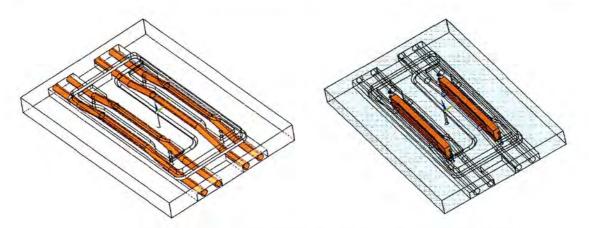


Fig. 6.19: Sistema de refrigeración del inserto en el modelo conjunto.

Como paso final se decidió definir la unión entre la placa de acero y la cáscara de níquel, como un problema de contacto para acercarnos más al comportamiento real del inserto. Esto convirtió el cálculo en un problema no lineal que requirió un mayor tiempo de cálculo hasta la convergencia en la solución final. Las uniones entre los diferentes componentes del inserto ha sido consideradas como pegadas.

6.4.1.3 Componentes del modelo de análisis.

Nuestro modelo estaba formada por cinco elementos bien diferenciados.

- La cáscara de níquel. Se ha considerado de espesor constante de valor 1.2 mm y se modeliza con el elemento SHELL93. Las propiedades mecánicas consideradas para el análisis han sido: E=209 GPa, y v=0.3.
- La placa de acero. Al ser un sólido tridimensional de espesores apreciables se ha modelado mediante el elemento tipo SOLID95. Las propiedades de este acero AISI/SAE P20 necesarias para el cálculo son: E=205 GPa, y v=0.3.
- El relleno de resina. También es un sólido tridimensional de alto espesor y es modelado con el elemento SOLID95. Se ha tomado este material como isótropo con sus propiedades a compresión: E=6800 MPa, y

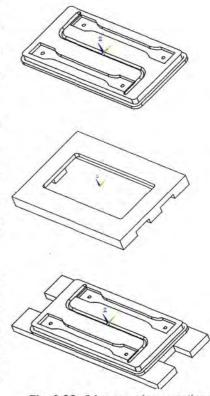


Fig. 6.20: Cáscara, placa y relleno.

v=0.25.

- Tubos de refrigeración. Estos conductos al ser de pared delgada y espesor constante se han modelado como elementos SHELL93, siendo las propiedades del cobre empleado: E=124.8 GPa, y v=0.36.
- Refuerzos. Se han modelado con elementos SOLID95 al ser un sólido de espesor elevado. Las propiedades consideradas han sido las mismas que para los tubos de refrigeración.

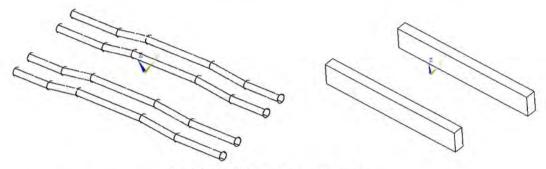


Fig. 6.21: Tubos y refuerzos de cobre.

6.4.1.4 Estado de cargas.

El estado de cargas aplicado a nuestro modelo de cálculo son las siguientes:

La presión de inyección. Se aplica en el interior de las cavidades, en las puertas de entrada a las mismas, y en el canal de alimentación. Es la que proporciona el programa Moldflow MPA6 para el material más exigente, en este caso el PC. El valor aplicado es la presión de inyección máxima alcanzada durante la fase de compactación 51.8 MPa, mayorada un 20%.

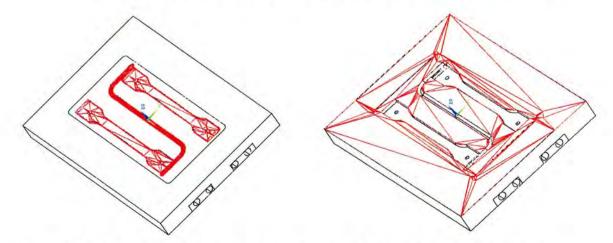


Fig. 6.22: Superficies donde se aplican las cargas: presión de inyección en cavidad y corredores, fuerza de cierre en el plano de partición.

La presión en el plano de partición. Se aplica un valor de presión homogéneo distribuido por las zonas de la placa de acero y la superficie de la cáscara que pertenecen al plano de partición del molde. Dicho valor de 9 MPa se obtiene de dividir la fuerza de cierre proporcinada por el análisis del MPA mayorada un 50%, por la superficie sobre la cual se aplica.

6.4.1.5 Condiciones de contorno.

Las restricciones de movimiento establecidas en este problema son que las caras posteriores de la placa móvil y del relleno, se consideran coplanarias y están apoyadas sobre la placa intermedia. Debido a la gran rigidez del ensamble del semimolde móvil, se han considerado estas caras como totalmente empotradas.

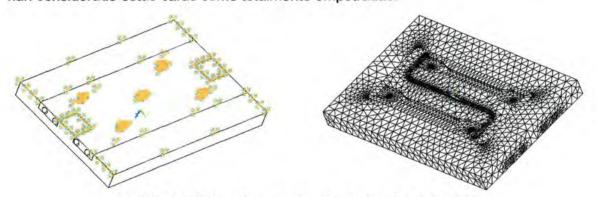
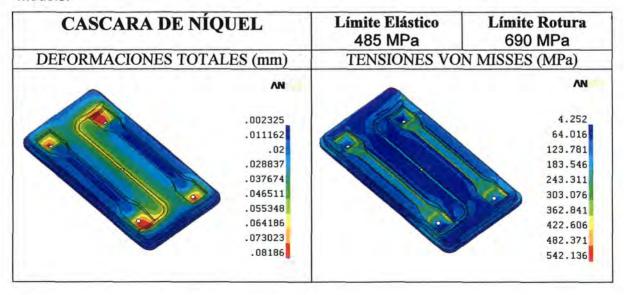


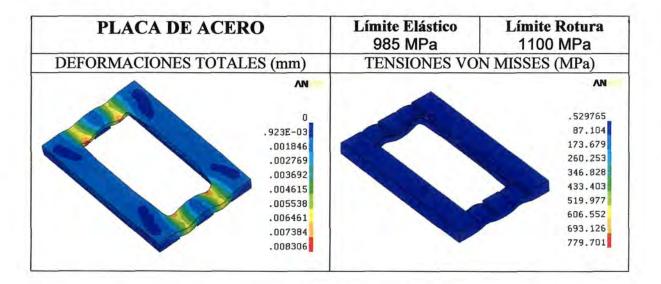
Fig. 6.23: Condiciones de contorno y mallado completo del modelo.

6.4.1.6 Resultados.

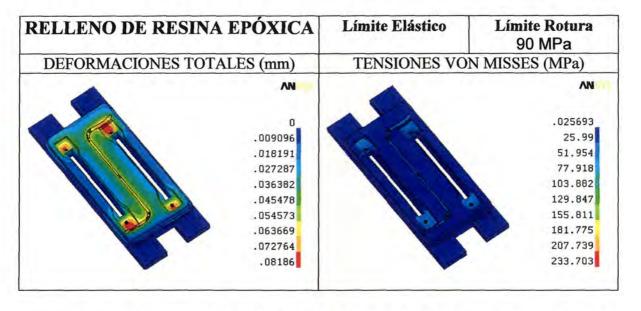
Los resultados obtenidos en tensiones de comparación de Von Misses y deformaciones totales se presentan a continuación para cada uno de los elementos del modelo.



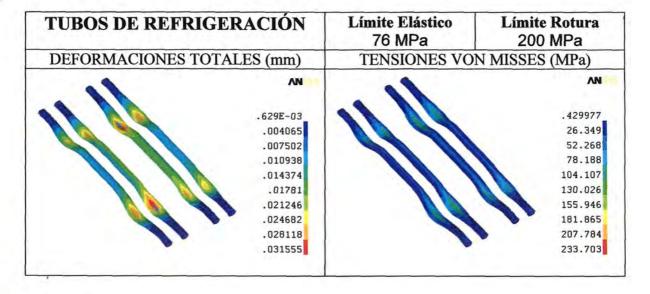
Para la cáscara se observa que las deformaciones máximas se producen en las inmediaciones de los agujeros de salida de los expulsores. Éstas son las zonas de cavidad de mayor amplitud y además no tienen refuerzo en la parte posterior, como así ocurre en la zona central donde las deformaciones son despreciables. Aun con ello el valor de deformación total es inferior a la décima de milímetro, y principalmente en dirección perpendicular a la cáscara. Teniendo en cuenta que la resina se comporta como un "colchón" de mucha menor rigidez que la cáscara o el acero, se consideran estas deformaciones admisibles. En cuanto a las tensiones se observa que los valores alcanzados están en torno al límite elástico. Hemos de tener en cuenta que los valores máximos obtenidos son picos de tensión, que se dan en puntos muy concretos debido al modelado matemático de los cambios de sección. Valores más cercanos a la realidad se podrían obtener con un mayado más refinado en estas zonas. Se observa que el conjunto de la cáscara se encuentra con un estado tensional aceptable.



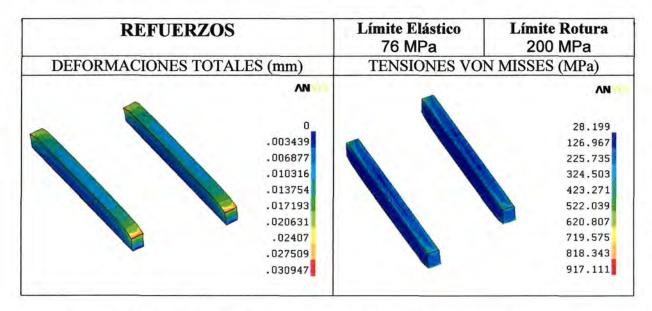
Se observa claramente que la placa de acero se encuentra en una situación bastante lejana de los límites capaces de soportar. Las tensiones son casi despreciables y están situadas en las zonas debilitadas por las operaciones de mecanizado necesarias. En cuanto a tensiones se comprueba que los valores alcanzados en la mayor parte de la placa son muy bajos. Únicamente se ven unos pocos puntos donde se produce una concentración de tensiones en valores alejados de los límites tolerados por el material.



Para el relleno de resina epóxica se ve que la deformación producida se corresponde totalmente con la que mostró la cáscara de níquel. En cuanto a las tensiones producidas se observa que los valores máximos indicados no se muestran en la representación y se ha comprobado que tampoco se encuentran en el interior de la resina. Al igual que antes deben corresponder con picos de concentración de tensiones en los cambios de sección. Las zonas representadas con mayores niveles de tensión son las que se encuentran en contacto con la cavidad y el canal de alimentación. Las tensiones en estas zonas se encuentran dentro de los valores soportados por el material. Hay que tener en cuenta que la resina se encuentra totalmente confinada entre la cáscara de níquel y las placas de acero, con lo que en el caso de alcanzarse en puntos concretos valores mayores a los soportados, esto no debe provocar un fallo catastrófico del inserto.



Las tensiones alcanzadas en algunas zonas del tubo sí muestran claramente valores superiores al límite elástico, lo que provocará sin duda deformaciones permanentes en el mismo. Los valores máximos están también ligeramente por encima del límite de rotura aunque como hemos argumentado en los casos anteriores deben corresponder a picos de concentración. En el caso de que se pudiese provocar una fractura, hemos de tener en cuenta que se encuentran totalmente rodeados de resina que impedirá la fuga del líquido refrigerante.



En los refuerzos de cobre presentan una deformación muy pequeña y situada en los extremos de las pletinas que es donde se producen las mayores deformaciones tanto de la cáscara como de la resina. En cuanto a las tensiones, destacar que el límite de rotura es superado en los extremos de la pletina y en el contorno de la superficie que apoya sobre la placa intermedia. Al igual que ocurre con los tubos de refrigeración, estas pletinas se encuentra rodeadas totalmente de la resina y confinadas entre ésta, la cáscara y la placa intermedia con lo que una posible fractura no va a provocar fallos catastróficos del inserto. Hemos de destacar que la función primordial de estos refuerzos es la de mejorar la transferencia de calor desde la cavidad a los canales de refrigeración.

El modelo definitivo también se ha resuelto, con la variante de tomar como módulo de elasticidad para la resina el valor E=13600 Mpa. Este valor es el doble del de la resina empleada en la fabricación del inserto, ya que habíamos encontrado referencias de resinas usadas en estas aplicaciones con una rigidez de ese orden. Un resumen de los resultados obtenidos en ambos casos se presentan en la tabla siguiente.

Elemento	Deformaciónes totales máximas (mm)		Tensiones de Von Misses máximas (MPa)		
E resina	6800 MPa	13600 MPa	6800 MPa	13600 MPa	
Cáscara	0.081	0.044	542.1	413.4	
Placa	0.008	0.007	779.7	432.0	
Relleno	0.081	0.044	233.7	181.5	
Tubos	0.031	0.194	233.7	181.5	
Refuerzos	0.031	0.023	917.1	687.6	

Tabla 6.4: Tabla resumen de los resultados en tensiones y deformaciones.

Se observa una notable mejoría en el comportamiento en deformaciones tanto de la resina como de la cáscara. Ambos componentes como era de esperar muestran una clara interdependencia. En cuanto a tensiones se ha producido también una mejora apreciable del comportamiento de estos elementos.

6.4.2 Análisis estructural del molde de carcasas.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, para este molde se requiere el empleo de insertos en ambas placas de figura. Los modelos de cálculo de los insertos necesarios, se han establecido fijando los mismos criterios que para el molde de las probetas. Nos centraremos en comentar las diferencias más relevantes de este análisis, así como las conclusiones del mismo. En la siguiente figura se muestran los modelos iniciales de cálculo.

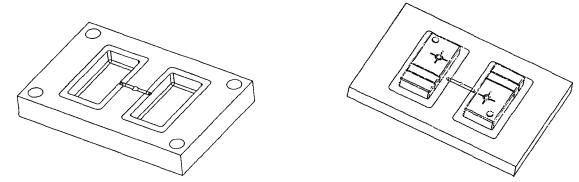


Fig. 6.24: Modelos preliminares para las placas de figura fija y móvil.

6.4.2.1 Modelo de análisis para el inserto de placa de figura fija.

Se tomó como primer modelo el mostrado en la figura anterior, donde se tienen las dos cavidades y cuatro taladros en la placa de acero. Además, se consideró que la cáscara está pegada al acero. Tras los primeros resultados obtenidos se refinó el modelo incorporando las siguientes modificaciones:

 Dada la simetría del modelo para esta placa, se ha tomado una cuarta parte del primer modelo de aproximación, aplicando condiciones de simetría. Éstas

- eran que las traslaciones fuera del plano de simetría y las rotaciones de los puntos del plano de simetría son nulas.
- Los 4 taladros circulares en la placa de cavidad fija se considerarán macizos, ya que en el momento en el que actúa la carga el molde está cerrado y dichos taladros se encuentran rellenos por sus correspondientes casquillos y guías.
- En las zonas de la placa cercanas a la cáscara aparecieron tensiones debidas a la condición de pegada en la unión placa-cáscara, que en la situación real no existe. Por ello se añadió un pequeño chaflán en el borde de la cáscara según se muestra con una circunferencia en la figura.

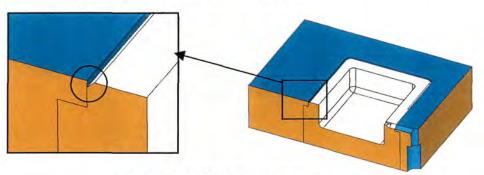


Fig. 6.25: Chaflán de borde de la cáscara.

Tras el análisis de este nuevo modelo, los resultados obtenidos obligaron a introducir unos cambios adicionales en el diseño del inserto. Estos se resumen a continuación.

- Se introdujo un aumento en la altura del escalón de la placa de acero a 8 mm, ya que con los 4mm de altura que se habían establecido en el diseño original, no soportaba la tensión a la que se veía sometido. Ésta modificación se muestra en el interior de la circunferencia de la figura.
- Se eliminó el chaflán que se había introducido antes, porque se decidió considerar
 la unión entre cáscara y placa como un problema de contacto.

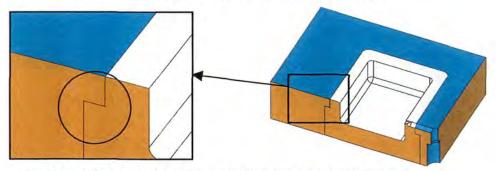


Fig. 6.26: Introducción del problema de contacto y eliminación del chaflan.

Con la incorporación de estas modificaciones el modelo de cálculo empleado consta de tres componentes: la cáscara de níquel, la placa de acero y la resina de relleno. No se han introducido en este análisis el sistema de refrigeración ni elementos de refuerzo. Las propiedades de los materiales empleados, así como los elementos de modelización son los mismos que para el molde de las probetas.

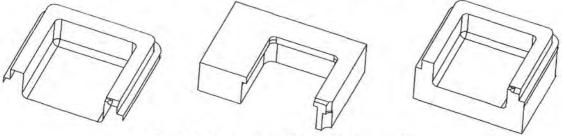


Fig. 6.27: Componentes del modelo de análisis.

6.4.2.2 Estado de cargas y condiciones de contorno.

Las cargas aplicadas son las correspondientes a la presión de inyección y fuerza de cierre, que se han obtenido de los análisis de MPA para este molde, siguiendo los mismos criteros de aplicación y mayoración del otro molde.

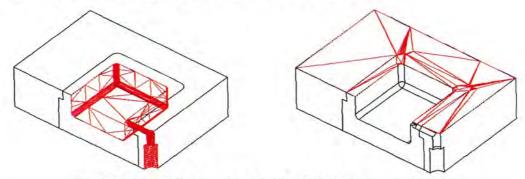


Fig. 6.28: Superficies de aplicación del estado de cargas considerado.

Se creyó interesante realizar el análisis con los valores de carga correspondientes a la inyección de dos de los materiales analizados. La siguiente tabla muestra los valores de las correspondientes presiones aplicadas a las diferentes superficies.

Polímero	Presión de inyección (Mpa)	Presión en el plano de partición (Mpa)	
PC - Makrolon 2608 - Bayer USA	118.34	51.22	
HIPS - Novacor 3350 Novacor Chem. Inc.	42.11	18.22	

Tabla 6.5: Valores de presión aplicados para los dos plásticos considerados.

Con respecto a las condiciones de contorno se han establecido las siguientes restricciones en movimientos. Las caras posteriores de la placa fija y del relleno son

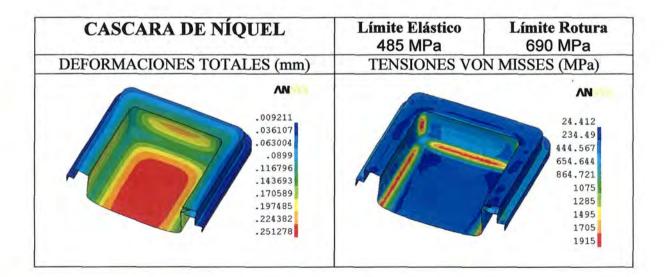
coplanarias y están completamente apoyadas sobre otra placa de acero. Es por ello que se ha considerado a estas caras como totalmente empotradas. Se muestra en gris en la siguiente figura. La consideración de la simetría del modelo también constituye una condición de contorno, ya que se restringe el movimiento de los puntos que pertenecen a los planos de simetría. En la siguiente figura se muestran en ocre los planos de simetría de nuestro modelo.



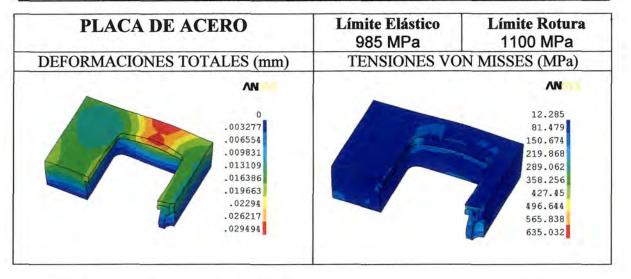
Fig. 6.29: Restricciones de movimiento y planos de simetría.

6.4.2.3 Resultados.

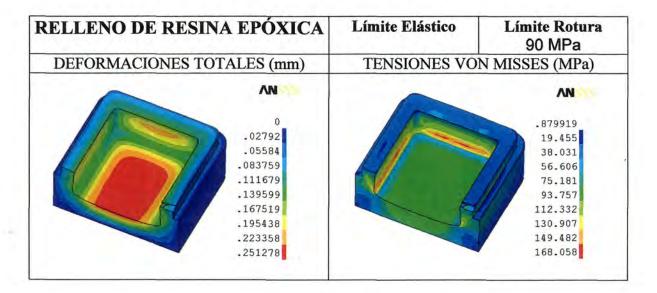
A continuación se comentan los resultados obtenidos para el análisis definitivo de este problema con los valores de carga correspondientes al policarbonato. Se ha considerado analizar únicamente la situación más desfavorable considerando las propiedades de la resina que íbamos a emplear de módulo de elasticidad E=6800 MPa.



Se observa claramente que se superan las capacidades resistentes de la cáscara en los encuentros entre las paredes verticales y con el fondo. En estas zonas se producirían con total seguridad fracturas de la cáscara. También se observa en las deformaciones que se alcanzan valores muy altos superiores a los 0.25 mm totalmente inadmisibles para estas aplicaciones.



La placa de acero muestra un comportamiento aceptable tanto en tensiones lejanas de sus capacidades resistentes, como en unas deformaciones bastante pequeñas. Estos resultados son lógicos pues estos componentes normalizados han sido diseñados para soportar niveles de carga mayores y propios de condiciones de producción exigentes.



Este componente del modelo es el que limita la capacidad resistente del inserto. Debida a su baja rigidez en comparación con los otros materiales, para este nivel de cargas presenta unas grandes deformaciones que son las que causan los problemas en la cáscara. Se observa también que los valores en tensiones superan en una gran parte del relleno la capacidad resistente a compresión de la resina.

En la siguiente tabla resumen se muestran los valores máximos en tensiones y deformaciones para los análisis con los dos materiales comentados. Se observa que con

las presiones de cálculo alcanzadas con este plástico, los valores en tensiones se sitúan dentro de los límites de las capacidades resistentes tanto de la cáscara como de la resina. En cuanto a las deformaciones aún siendo altas, también pueden ser admisibles para la aplicación considerada.

Elemento del modelo	Deformación máxima (mm)		Tensión máxima Von Misses (MPa)		
	PC	PSHI	PC	PSHI	
Cáscara	0.251	0.089	1915.0	683.7	
Placa	0.029	0.011	635.0	224.1	
Relleno	0.251	0.089	168.1	59.9	

Tabla 6.6: Resumen de resultados.

6.4.2.4 Modelo de análisis para el inserto de placa de figura móvil.

Tras un proceso de modelado casi idéntico al seguido en la placa de figura fija, se estableció el modelo final de análisis que consta de tres componentes: las cáscaras de níquel, la placa de acero y la resina de relleno. En este modelo se observa que no se ha considerado efectos de simetría, debido a la distribución de cavidades en la placa. Al igual que en el caso anterior, no se han introducido en este análisis el sistema de refrigeración ni elementos de refuerzo.

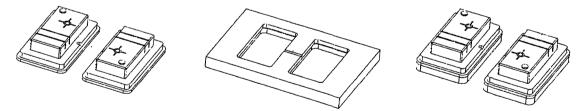


Fig. 6.30: Componentes del modelo de análisis: cáscaras, placa de acero y rellenos.

Las propiedades de los materiales empleados, así como los elementos de modelización son los mismos que para el molde de las probetas.

6.4.2.5 Estado de cargas y condiciones de contorno.

Las cargas aplicadas son las correspondientes a la presión de inyección y fuerza de cierre, que se han obtenido de los análisis de MPA para este molde, siguiendo los mismos criterios de aplicación y mayoración del otro molde.

Simulación y ensayo de moldes rápidos utilizando técnicas de prototipado rápido y electroconformado.

Aplicación a la inyección de termoplásticos.

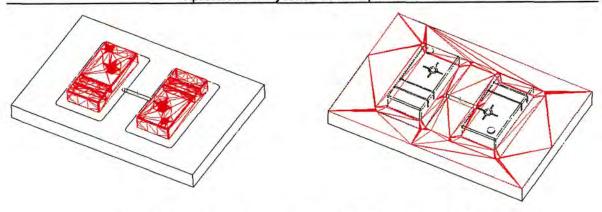


Fig. 6.31: Superficies de aplicación del estado de cargas considerado.

También se ha realizado el análisis con los valores de carga correspondientes a la inyección de dos de los materiales analizados, con los mismos valores de presión.

Con respecto a las condiciones de contorno se han establecido las restricciones en movimientos empleadas en los análisis anteriores. Las caras posteriores de la placa fija y del relleno son coplanarias y están completamente apoyadas sobre otra placa de acero. Es por ello que se ha considerado a estas caras como totalmente empotradas.

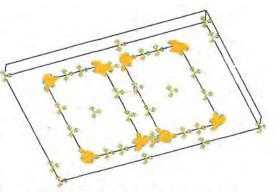
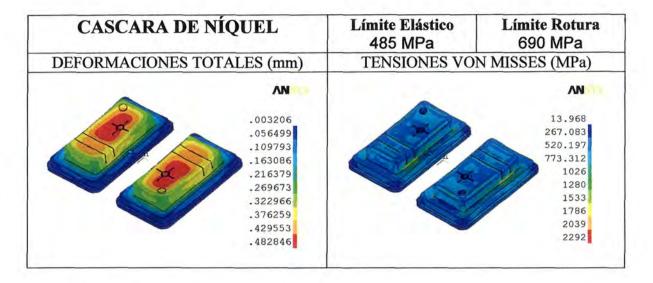


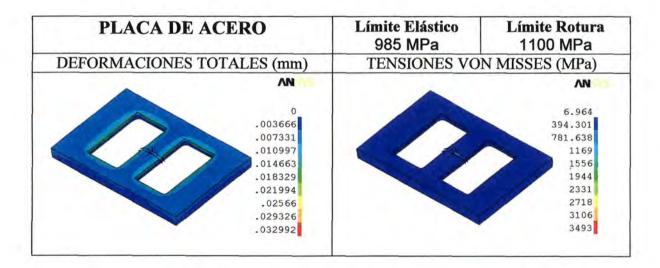
Fig. 6.32: Restricciones de movimiento.

6.4.2.6 Resultados.

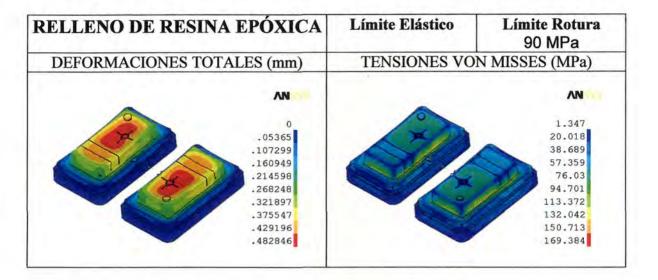
A continuación se comentan los resultados obtenidos para el análisis definitivo de este problema con los valores de carga correspondientes al policarbonato. Se ha considerado presentar en primer lugar la situación más desfavorable, tomando las propiedades de la resina que íbamos a emplear, de módulo de elasticidad E₁=6800 MPa. Posteriormente comentaremos los resultados obtenidos al considerar un módulo de elasticidad E₂=13600 MPa, que corresponde a los valores máximos de esta propiedad de resinas de tipo epóxicas empleadas en estas aplicaciones.



Se observa claramente que se superan las capacidades resistentes de la cáscara en bastantes zonas de la misma. En ellas se producirían con total seguridad fracturas de la cáscara. También se observa en las deformaciones que se alcanzan valores muy altos del orden de 0.5 mm totalmente inadmisibles para estas aplicaciones.



La placa de acero muestra una situación en tensiones próxima al límite de su capacidad resistente, mientras que las deformaciones se mantienen bastante pequeñas. Estos resultados muestran que las solicitaciones aplicadas al molde para la inyección con este material y esta geometría de pieza, son bastante exigentes.



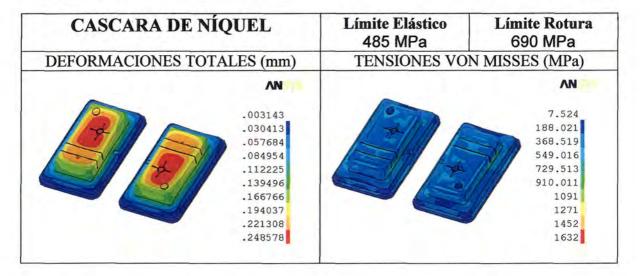
Este componente del modelo es el que limita claramente la capacidad resistente del inserto. Debida a su baja rigidez en comparación con los otros materiales, para este nivel de cargas presenta unas deformaciones muy altas que son las que causan los problemas en la cáscara. Se observa también que los valores en tensiones superan en una gran parte del relleno la capacidad resistente a compresión de la resina.

En la siguiente tabla resumen se muestran los valores máximos en tensiones y deformaciones para los análisis con los dos materiales comentados. Se observa que con las presiones de cálculo alcanzadas con el otro plástico, los valores en tensiones se sitúan dentro de los límites de las capacidades resistentes tanto de la cáscara como de la resina. En cuanto a las deformaciones aún siendo altas, también pueden ser admisibles para la aplicación considerada.

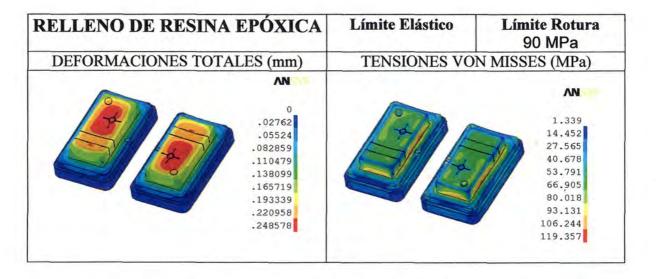
Elemento del modelo	The State of	nación a (mm)	Von N	máxima lisses Pa)
	PC	PSHI	PC	PSHI
Cáscara	0.483	0.172	2292	820.8
Placa	0.033	0.012	394.3	131.4
Relleno	0.483	0.172	169.4	59.7

Tabla 6.7: Resumen de comparación de los resultados para el análisis de los dos materiales.

A continuación mostramos los resultados obtenidos para las cáscaras y para el relleno, considerando que este posee un módulo de elasticidad de 13600 MPa.



Se observa una distribución de deformaciones casi idéntica a la obtenida del análisis anterior, aunque con unos valores máximos de la mitad de valor. En cuanto a las tensiones han disminuido de manera muy apreciable, pero siguen quedando muchas zonas con valores de tensión superiores a las capacidades de la cáscara.



En el relleno se observa claramente que muchas zonas del mismo superan la resistencia de la resina. Como es lógico las deformaciones son en la superficie las mismas que las de la cáscara.

En la siguiente tabla se muestran los valores máximos alcanzados tanto en tensiones como en deformaciones, para los casos analizados con diferente módulo de elasticidad para el relleno.

Elemento del modelo	Deformación máxima (mm)		Von N	máxima fisses Pa)
	E₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)
	6800	13600	6800	13600
Cáscara	0.483	0.249	2292	1632
Placa	0.033	0.025	394.3	270.1
Relleno	0.483	0.249	169.4	119.4

Tabla 6.8: Resumen de resultados de los casos con diferente módulo de elasticidad.

Se observa que los valores de deformación caen en torno al 50%, mientras que en tensiones la reducción es del orden del 30%.

6.4.2.7 Conclusiones.

Como conclusiones más importantes se destacan las siguientes:

- Para presiones de inyección altas, en torno a los 100 MPa, las resinas del tipo empleadas en este trabajo de investigación no son capaces de soportar por sí solas estos esfuerzos sin alcanzar deformaciones elevadas que a su vez producen problemas resistentes en la cáscara de níquel.
- Se comprueba como elemento crítico del inserto el tipo de relleno empleado. Con materiales como el aluminio, con módulo de elasticidad en torno a 70 GPa, empleados habitualmente en moldes prototípos también se presentan problemas resistentes para estas presiones. La rigidez de estas resinas se puede elevar incrementando el porcentaje de carga metálica, aunque difícilmente podremos con ello conseguir suficiente rigidez. Se encontró como alternativa la incorporación de refuerzos metálicos que respaldasen la cáscara y descargasen la resina. Estas soluciones se incorporaron la molde de las probetas como ya hemos analizado.

Dal doorwoonfor for an doors. Distriction and the second to make the many manufactures and the second of the secon

Capítulo 7

FABRICACIÓN DE MOLDE PROTOTIPO

7 FABRICACIÓN DEL MOLDE PROTOTIPO.

7.1 Procesos de fabricación convencionales.

Es interesante, para ubicar el procedimiento propuesto para la fabricación de moldes rápidos mediante electroconformado, comentar algunas de las técnicas más utilizadas en la producción de moldes de inyección. Son dos los principales sistemas existentes, el de mecanizado por arranque de material y el de electroerosión por penetración. No obstante, existen otras maneras de trabajar sobre los moldes como pueden ser los mecanizados electroquímicos y las diferentes técnicas de texturizado que permiten obtener texturas superficiales especiales. En cualquier caso el mayor volumen de trabajo es soportado por las dos técnicas mencionadas anteriormente.

El mecanizado por arranque de material puede ser realizado en máquinasherramienta de arranque de viruta mediante cuchillas (por ejemplo una fresadora) o por
arranque de partículas mediante abrasión (rectificadoras, pulidoras). La evolución de las
máquinas-herramienta ha permitido avanzar en gran medida en la posibilidad de fabricar
moldes cada vez más complejos y precisos y en menor tiempo que hace algunos años.
Así por ejemplo, la reproducción de formas tridimensionales en cavidades de moldes
(bien sean positivas o negativas) se inició, con un cierto grado de calidad, con las
fresadoras copiadoras, que a partir de un modelo previamente fabricado reproducía
mediante copiado con un palpador, los recorridos de la herramienta en el molde a
mecanizar. Los inconvenientes de este sistema son los siguientes:

- Necesidad de disponer de un modelo físico que copiar (realizado en resina, madera u otro material rígido). En muchas ocasiones dicho modelo se realiza de una forma totalmente manual y sin precisión.
- Precisión dependiente de la propia máquina y del nivel de resolución que permita el palpador utilizado (según sea mecánico, óptico, magnético).
- Cierta lentitud en los mecanizados.

En cualquier caso es una técnica conceptualmente sencilla y que resulta práctica en muchas ocasiones.[29]

La incorporación de los controles numéricos a las fresadoras convencionales permitió un gran avance en la mecanización de moldes. Utilizando equipos de CAD-CAM (diseño y fabricación asistida por ordenador) se tiene la ventaja de poder realizar mecanizados que reproducen con un cierto grado de fiabilidad la geometría definida en un sistema CAD. Con fresadoras o centros de mecanizado CNC de 3 o más ejes se pueden obtener superficies tridimensionales impensables de mecanizar de otra manera. Además con el avance de las máquinas de medir tridimensionales se tiene también la opción de digitalizar superficies que se deseen copiar. La limitación inicial de las fresadoras CNC en cuanto a la calidad del acabado superficial ha sido resuelta en buena parte con el mecanizado de alta velocidad, donde combinando unas condiciones de corte más elevadas (revoluciones por encima de 20000 o 30000 RPM y velocidades de avance muy superiores a las convencionales) y herramientas de corte de alta calidad y resistencia se consiguen dos objetivos de especial relevancia:[53]

- Disminuir enormemente los tiempos de fabricación de moldes (y en consecuencia su costo).
- Elevar la calidad del acabado superficial de la cavidad del molde, siendo en algunos casos innecesario un pulido posterior.

El mecanizado de alta velocidad ha significado una pequeña revolución en la industria del mecanizado en general y en la de moldes en particular, replanteando viejos sistemas y formas de actuar.

Se ha mencionado de pasada un aspecto fundamental en la fabricación de moldes: el acabado superficial. Hay que tener en cuenta que del acabado de la superficie de la cavidad del molde depende el acabado de la pieza inyectada, donde aspectos tan importantes como el brillo y la textura son determinantes. Es por ello que una vez mecanizado el molde y según sea la tecnología utilizada se hace necesario un pulido con

diferentes granos de abrasivo que permitan llevar la rugosidad de la superficie a niveles adecuados y ello sin alterar en exceso la precisión de las medidas. A veces no por ser una operación en buena parte artesanal significa un rango de menor importancia en el proceso de elaboración.



Fig. 7.1: Mecanizado por arranque de material.

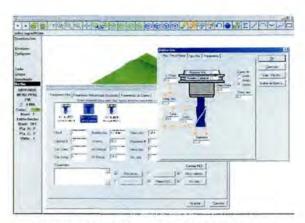


Fig. 7.2: Aplicación CAM de Fabricación asistida por ordenador.

No siempre el arranque de material en máquinas CNC resuelven todos los problemas de mecanizados complejos. Las limitaciones propias del mecanizado impiden por ejemplo conseguir geometrías angulosas, inaccesibles o cuya profundidad y posición sean inviables por fresado. En este caso, entre los sistemas tradicionales, la electroerosión por penetración (EDM) se ha mostrado como un método eficaz. La electroerosión por penetración produce cavidades por la acción erosiva de un electrodo que mediante chispas eléctricas va arrancando de forma progresiva pequeñas partículas de material. Para ello tenemos un circuito en tensión formado por el propio electrodo y la pieza, que evidentemente debe ser conductora, todo esto en un medio líquido y dieléctrico como puede ser el agua desionizada e incluso gasolina. El electrodo, que actúa por penetración y a velocidad lenta, reproduce exactamente la forma del mismo en la pieza, con lo cual la geometría dependerá de la del electrodo. Dicha geometría se puede obtener por fresado, torneado, electroerosión por hilo e incluso, tal como se estudia en otro trabajo de investigación paralelo al presente, por electroconformado de cáscaras de cobre. El electrodo suele ser de cobre o cobre grafitado por su buena conductividad eléctrica. Se comienza con un proceso de desbaste (electrodo de desbaste) y se concluye con uno de acabado. Para reducir el tiempo de mecanizado el desbaste previo se puede realizar por fresado. Además de la posibilidad de obtener geometrías inviables de otra manera, la electroerosión tiene como ventaja que consigue acabados superficiales aceptables y con características metalográficas interesantes. Los inconvenientes pueden ser los siguientes:[56]

Lentitud de penetración.

Es necesario fabricar previamente el electrodo y a veces no es sencillo según sea la geometría. En cualquier caso ocurre en estos casos que es más sencillo fabricar un positivo que un negativo y por eso se recurre a la electroerosión.

A pesar de que con la aparición del mecanizado de alta velocidad parecía que la electroerosión iba a bajar en su campo de aplicación, esto no ha sido así y tanto el mecanizado en fresadora CNC como la técnica EDM se combinan y complementan de manera eficaz.[41]

7.2 Fabricación de las cáscaras electroconformadas.

7.2.1 Generación del modelo.

Para la fabricación de estas cáscaras es requisito previo generar los modelos que actuarán como cátodos en el equipo de electrodeposición. Estos modelos en este trabajo son realizados mediante equipos de prototipado rápido con la tecnología FDM. Para ello es necesario generar el prototipo virtual en un sistema CAD, y enviar la información gráfica al equipo de prototipado en formato .STL.

En nuestro caso se empleó el paquete de modelado en sólidos SOLIDWORKS del que el L.F.I. dispone de licencias oficiales. Para generar este modelo se partió del diseño de cáscara que se deseaba obtener, y mediante las herramientas de molde y cavidad se obtuvo fácilmente la geometría básica del modelo. A ésta se añaden posteriormente elementos geométricos adicionales como rigidizadores, agujeros para facilitar el desmodelado, etc.. Una vez completado el diseño geométrico se generó el archivo modelo.stl, para pasar la información gráfica al equipo de prototipado.

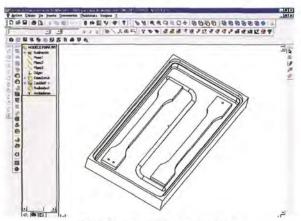


Fig. 7.3: Diseño CAD del modelo.

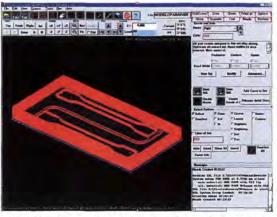


Fig. 7.4: Tratamiento del modelo en QuickSlice.

La aplicación QuickSlice es el software de control del equipo FDM y una de sus primeras tareas es la de analizar el archivo para detectar posibles errores en la definición geométrica. Una vez se ha cargado éste, se establecen los parámetros operativos de la máquina FDM y se elige la orientación más adecuada de construcción dentro del campo de trabajo. A continuación se procede a seccionar el modelo en función de la altura de capa que deseamos, en este caso 0.254 mm ya que la geometría del modelo es bastante sencilla. Posteriormente hay que generar de manera automática la base sobre la que se construirá el modelo, los elementos soporte que pueden ser necesarios para esta geometría y finalmente las trayectorias de relleno de todas las secciones generadas, así como de la base y zonas de soporte.

Una vez realizados estos pasos tenemos un archivo con toda la información necesaria para que la máquina genere la pieza, y se puede estimar el tiempo total necesario así como los consumos de material. Antes de empezar la construcción del modelo hay que preparar la máquina para que alcance las temperaturas de trabajo, así como fijar la posición de la plataforma donde se construirá la pieza. Completados todos estos pasos previos se puede comenzar la construcción del modelo, durante la que el ordenador de control va enviando por lotes la información necesaria a la máquina. Para la fabricación de estos modelos se requirió un tiempo en torno a 17 horas, y el consumo de material fue de 129 gr. de material de pieza y 30 gr. de material soporte.

Cuando se termina la construcción del modelo, éste requiere de unas operaciones de preparación que consisten en:

- Una limpieza de modelo para eliminar el material de soporte y reparación de superficies que han quedado con algún detalle indeseado.
- La aplicación de un recubrimiento impermeabilizante y de preparación de las superficies. En nuestro caso hemos empleado un recubrimiento de tipo tapaporos que cubría las dos funciones.
- Colocación del conductor que conectará el modelo a la barra catódica.
- Un lijado fino para mejorar el acabado de aquellas superficies funcionales que deseamos metalizar.
- Aplicación del recubrimiento de plata para conseguir la conductividad en las superficies que se quieren depositar con níquel.
- Comprobación de la conductividad de las superficies metalizadas.
- Colocación de la barra de sujeción.



Fig. 7.5: Modelo limpio y preparado para recibir el metalizado de la superficie funcional



Fig. 7.6: Modelo metalizado comprobando la continuidad entre cable y superficie conductora.

En nuestro caso particular, la metalización del modelo ABS se realiza mediante el empleo de plata química LS de la compañía Hans Wolbring GMBH. Sus características son las siguientes:

Contenido metálico: 45 ± 0.2% Ag

Consumo: 0.5 – 1.5 gr por 100 cm³

Diluyente: DH 14 G

Tiempo de secado: 20°C/30 min 80°C/10 min 150°C/5 min

Resistencia de la superficie plateada: 0.04 a 0.02 Ohm

- La conductividad térmica y eléctrica depende del grado de secado y de la clase de calor empleado.
- Forma de aplicación: pincel o pistola de spray.

7.2.2 Elaboración de la cáscara.

Una vez terminado el modelo se pasa a la fabricación de la cáscara de níquel, en el equipo desarrollado por el L.F.I.. Antes de comenzar la deposición es necesario hacer una preparación previa del equipo que consiste en:

- Activar las resistencia de calefacción para alcanzar la temperatura adecuada del baño.
- Arrancar la bomba de recirculación del baño para homogeneizar la temperatura.
- Reposición de los ánodos de níquel, si es necesario.
- Una vez lograda la temperatura adecuada se monta el filtro para evitar la obturación del mismo.
- Sujeción del cátodo a la barra catódica y conexión del cable conductor.
- Puesta en marcha del sistema de agitación y ajuste de la sujeción del cátodo.

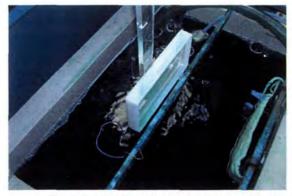
Cuando se han completado estos pasos previos se activa el rectificador y se ajusta la intensidad, para lograr la densidad de corriente adecuada en función del área de deposición del modelo introducido. En este momento comienza la electrodeposición y se realiza una medición del pH para comprobar que se encuentra en el rango adecuado.





Fig. 7.7: Comprobación y ajuste de los parámetros operativos.

En estas condiciones se mantiene la deposición durante el tiempo necesario para alcanzar el espesor deseado. Durante este tiempo los parámetros se han mantenido muy estables y lo único que se ha aportado es agua destilada para compensar la evaporación que se produce. En nuestro caso y para distintas cáscaras fabricadas, los parámetros empleados y el tiempo requerido se presentan en la siguiente tabla.



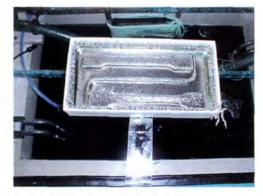


Fig. 7.8: Introducción del modelo en el baño y cáscara resultante de la electrodeposición.

Cáscaras	Densidad de corriente (A/dm²)	Temperatura del baño (°C)	Tiempo de deposición (horas)		
1	1	50	100		
2	1.5	45	125		
3	1	55	160		
Final	1	55	220		

Tabla 7.1: Parámetros operativos y tiempo de deposición para las cuatro cáscaras analizadas,

Una vez completado el electroconformado, hay que proceder a realizar las operaciones de desmodelado, o separación de la cáscara y del modelo. Gracias a la impermeabilización y acabados realizados sobre el modelo, no se produce un agarre excesivo entre ambos elementos. Aun con ello la separación ha requerido la destrucción parcial del modelo para evitar deformar o fracturar la cáscara. El mayor agarre se produce en la cavidad.



Fig. 7.9: Modelo y cáscara después de la separación.



Fig. 7.10: Superficie posterior dela cáscara donde se observa el crecimiento de borde.

7.2.3 Características formales de las cáscaras.

Antes de proceder a la fabricación del inserto se realizó un control metrológico de las cáscaras obtenidas, comparando los resultados con las mediciones realizadas previamente al modelo empleado. Esta medición se realizó en la máquina de medir por coordenadas ScanMax de ZEISS, que pertenece al LFI.



Fig. 7.11: Máquina de medir por coordenadas ScanMax.

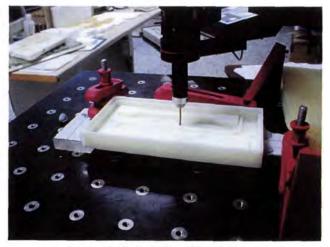


Fig. 7.12: Medición del modelo.

En este trabajo de investigación empleamos modelos realizados por la tecnología de prototipado rápido FDM, que ya se ha descrito en apartados anteriores. Las características generales de este tipo de modelos se resumen en:

- Modelo en material termoplástico ABS no conductor y que requiere de recubrimiento conductor en aquellas superficies donde se quiere depositar Níquel.
- FDM es una tecnología RP con un nivel de precisión medio, en la que el fabricante Stratasys da como especificación de precisión alcanzable del orden de ±0.127-0.254 mm (±0.005-0.01 in).
- Debido a las características constructivas de los modelos, estos quedan con una gran porosidad, lo que obliga en la fase de acabado a la impermeabilización de todas las superficies. Conseguimos con ello facilitar las labores de separación de la cáscara del modelo, al evitar puntos de anclaje en los poros.
- Los procesos de acabados, impermeabilización y la aplicación del recubrimiento conductor, introducen ya unas pequeñas variaciones dimensionales aun cuando éstas se realicen con gran habilidad.
- El proceso FDM tiene asociado un ciclo térmico, donde el material termoplástico ABS es depositado a una temperatura de unos 270°C, en un entorno que se encuentra a 70°C. En estas condiciones se generan las piezas, para una vez finalizada alcanzar la temperatura ambiente.
- Durante el proceso de electroformado, el modelo vuelve a elevar su temperatura al estar sumergido en el baño que se encuentra a una temperatura del orden de 50°C. Sería conveniente dar un tiempo inicial sin deposición hasta que el modelo alcance un equilibrio dimensional a esa temperatura. Existe sin embargo en este punto una incompatibilidad con el recubrimiento conductor, que se degrada con facilidad y en poco tiempo. Esto nos obliga a iniciar la deposición una vez introducido el modelo.



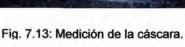




Fig. 7.14: Referencias de medición.

Todos estos aspectos descritos en los puntos anteriores provocan en los modelos realizados en ABS unas distorsiones dimensionales apreciables. En la siguiente tabla resumen se relacionan algunas magnitudes y desviaciones formales significativas entre los modelos y las cáscaras obtenidas a partir de ellos, correspondientes al diseño original.

CÁSCARA CON DOBLE CAVIDAD (DISEÑO ORIGINAL)

	MODELO VIRTUAL	MODELO FÍSICO EN BRUTO		MODELO FÍSICO ACABADO			CÁSCARA			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ANCHO INSERTO (mm)	93.6	93.747	93.734	93.738	93.646	93.707	93.708	93.659	93.661	93.749
LARGO INSERTO (mm)	193.6	193.415	193.472	193.402	193.368	193.476	193.416	193.860	194.069	194.063
ANCHO PROBETA 1 (mm)	10.2	10.066	10.066	10.096	10.096	10.070	10.095	10.098	10.016	10.086
ANCHO PROBETA 2 (mm)	10.2	10.091	10.102	10.086	10.135	10.105	10.111	10.159	10.038	10.099
ESPESOR PROB. 1 (mm)	4.2/ 4.7/ 4.5	4.186	4.806	4,558		4.807	4.584	4.270		4.584
ESPESOR PROB. 2 (mm)	4.2/ 4.7/ 4.5		4.785	4.542	4.229	4.786	4.625	4.293	4.771	4.572
PLANITUD PROB. 1 (mm)	0	0.166	0.150	0.247	0.218	0.155	0.227	0.072	0.154	0.041
PLANITUD PROB. 2 (mm)	0	0.189	0.161	0.269	0.243	0.160	0.255	0.083	0.161	0.091
PLANITUD TOTAL PLANO	0	0.383	0.344	0.548	0.460	0.282	0.472	0.772	0.343	0.219
PARTICIÓN (mm)										
PLANITUD CONTORNO	0		0.314	0.508		0.304	0.444	0.423		0.318
PLANO PARTICIÓN (mm)										
PLANITUD PLANO DE	0	0.350	0.280	0.406	0.402	0.235	0.387	0.370	0.250	0.196
APOYO (mm)										
RECTITUD EJE	0		0.262	0.370		0.213	0.387		0.308	0.123
LONGITUDINAL (mm)										
RECTITUD EJE TRANSVERSAL (mm)	0		0.054	0.084		0.053	0.076		0.507	0.294

Tabla 7.2: Resultados de la medición para las tres cáscaras analizadas con el diseño original.

A continuación vamos a comentar estas discrepancias dimensionales.

- Ancho del inserto. Esta magnitud ha mantenido una gran estabilidad en el modelo y la cáscara. Las diferencias entre el modelo virtual y el modelo físico en bruto, se encuentran dentro de la precisión de reproducción de la máquina FDM, que está cuantificada por el fabricante entre ±0.127-0.254 mm (±0.005-0.01 in). Se observa que esta dimensión en el modelo físico ha quedado ligeramente mayor que en el modelo virtual introducido en el equipo. Las diferencias entre los modelos en bruto y acabado es muy pequeña debido a las capas de recubrimiento aplicadas. La diferencia entre el modelo acabado y la cáscara es también muy pequeña, con lo que la dilatación térmica en esta dirección transversal parece poco importante.
- Largo del inserto. En esta magnitud se producen variaciones apreciables entre los modelos y las cáscaras correspondientes. Ello es debido a una deformación por flexión claramente visible en dirección longitudinal, observada en el modelo en bruto. Esta deformación creemos que esta provocada por efecto térmico, durante la generación del modelo. Observamos que dicha magnitud es inferior a la del modelo virtual, a pesar de que en la cáscara es bastante mayor. Esto es debido a que al introducir el modelo en el baño a una temperatura de 55°C, éste recupera una parte importante de la deformación observada. Otro efecto que puede estar latente es el de las tensiones internas de la cáscara, que pueden estar provocando una deformación del modelo en esa dirección.
- Ancho de probetas. Las diferencias entre el modelo virtual y el físico en bruto, se encuentran entre los límites de precisión del equipo. En la cáscara los valores son muy parecidos y en algunos casos ligeramente inferiores a los del modelo acabado. Esto explica la dificultad encontrada en el desmodelado donde la cáscara se quedaba agarrada al saliente del modelo. Las diferencias en esta magnitud son pequeñas lo que confirma la estabilidad dimensional en esta dirección transversal.
- Espesor de probetas. La medición de esta magnitud en los modelos se hace por distancia entre el plano de partición y los planos de fondo de las probetas. Debido a las desviaciones de planitud de ambas superficies, los valores obtenidos presentan diferencias significativas con los nominales.
- Planitud de probetas. Esta medición se realizó para evaluar la distorsión del modelo físico respecto al virtual, y ver la influencia de los acabados. Se observa que en el modelo en bruto estas desviaciones son inferiores a los 0.3 mm, debido fundamentalmente a una flexión longitudinal como se comprueba en la siguiente figura. Éstos valores varían poco al aplicar los recubrimientos de acabado, pero sin embargo se observan diferentes situaciones al medir la cáscara. El modelo empleado

para obtener la cáscara 2 era bastante más rígido que los otros, lo que explica una mínima variación en esta característica formal. Para las cáscaras 1 y 3 se observa una notable mejora de la planitud debida sin duda a la recuperación de la deformación longitudinal del modelo al introducirlo en el baño caliente.

Planitud total del plano de partición. Esta medida se realizó con el mismo objetivo que la anterior, y permitió comprobar con el diagrama de forma la distorsión por flexión en dirección longitudinal. Se encontraron desviaciones de planitud elevadas en esta superficie que superaron los 0.5 mm con el modelo en bruto. Se produjeron normalmente mejoras en esta característica con la aplicación de los recubrimientos de acabado, debido fundamentalmente a la disminución de la rugosidad. La medición sobre la cáscara reveló un comportamiento bien diferente en los tres casos. El primero aumentó notablemente la planitud, la segunda se mantuvo muy parecida a las del modelo, y la tercera disminuyó de manera apreciable. En los tres casos tuvieron un aspecto en común, y es que la deformación de la cáscara era mayor en dirección transversal que en la longitudinal donde el modelo presentaba deformaciones pequeñas, como se comprueba en las imágenes. Éstas grandes diferencias sugieren la presencia de tensiones internas que han provocado esas deformaciones que no aparecían en los modelos. Estas se manifiestan fundamentalmente en la zona central de la cáscara, donde ésta posee una baja rigidez.

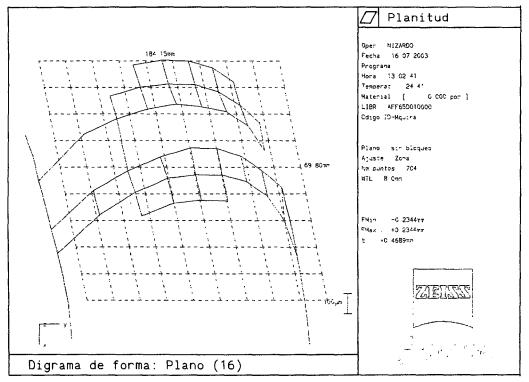


Fig. 7.15: Superficie del plano de partición del modelo acabado.

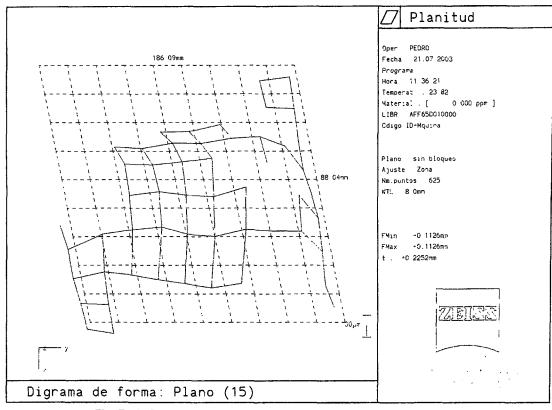


Fig. 7.16: Superficie del plano de partición de la cáscara de níquel.

- Planitud del plano de apoyo. Este plano corresponde con el rebaje perimetral del inserto que se encuentra a una distancia con respecto al plano de partición de 8 mm. Los valores obtenidos entre los modelos y la cáscara son muy parecidos en la primera y segunda cáscara. Mientras en la tercera se produce una notable disminución de la desviación, por efecto de la recuperación del modelo al introducirse en el baño. En la segunda esta recuperación se ve notablemente reducida por la mayor rigidez del modelo, y en la primera hay recuperación por flexión pero se produce un alabeo por torsión que mantiene la planitud en valores similares a la de su modelo aunque por causas diferentes.
- e Espesor inserto. Este parámetro se ha manisfestado muy irregular a lo largo de la geometría del inserto. Aquellas geometrías del modelo más salientes se ven favorecidas alcanzando una tasa de deposición más elevada. Al contrario, otras zonas menos expuestas tienen una tasa de deposición de menor cuantía. Durante el proceso de electroconformado se produce un sistema degenerativo en el que, aquellas zonas donde más se ha depositado provoca la atracción de las líneas de flujo de iones, haciendo que se vean aún más favorecidas en detrimento de las zonas menos expuestas. Este efecto provoca que se produzcan puntos críticos con un espesor mínimo, como por ejemplo en aristas interiores del modelo. Estos puntos son muy difíciles de medir con la instrumentación convencional ya que son de muy difícil acceso y en zonas muy pequeñas. Nosotros hemos detectado estas zonas críticas

cuando hemos tenido que realizar las operaciones de rectificado en el ajuste del molde. En concreto para nuestro modelo la zona crítica se encuentra en el plano de partición y siguiendo el contorno de la cavidad. Esto se intenta corregir empleando en el diseño del modelo radios de acuerdo en las aristas tanto interiores como exteriores. También se puede mejorar haciendo movimientos más complejos durante la agitación catódica que hagan variar la longitud de las líneas de flujo que tienden a homogeneizar el espesor. En la siguiente figura se representa la medición del perfil trasero de la cáscara realizada en la máquina ScanMax, a la que se ha superpuesto el contorno teórico por el lado opuesto. En ella se observa claramente la distribución irregular del espesor de cáscara.

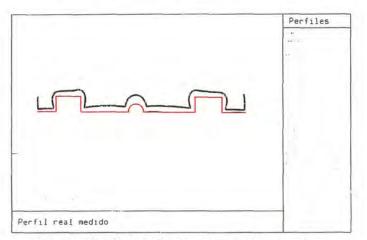


Fig. 7.17: Perfil en dirección transversal del centro de la superficie posterior de la cáscara.



Fig. 7.18: Superficie posterior de la cáscara original.

En esta otra imagen se representan los valores de espesores alcanzados en diferentes puntos de la cáscara, medidos con un micrómetro de exteriores.

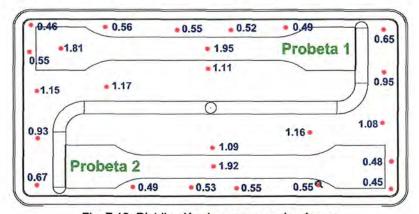


Fig. 7.19: Distribución de espesores de cáscara.

Después de analizar los resultados obtenidos en las mediciones comentadas en los puntos anteriores, y tras completar la integración de la cáscara número 3 en una placa de figura, concluimos que la geometría de estas cáscaras presentaba una dificultad especial para su realización mediante el proceso de electroconformado. Se decidió dar un

cambio de diseño importante al inserto, que nos permitiera conseguir una cáscara con las suficientes garantías y pudiésemos aprovechar el importante trabajo ya realizado en ese momento sobre los elementos normalizados del molde.

Se pasó de una cáscara con dos cavidades a una cáscara de una sola cavidad. Se mantuvo la posición relativa de esa cavidad con respecto al centro del molde. Se incorporaron radios de acuerdo más amplios a las aristas tanto interiores como exteriores. Se le dio a la cavidad un ángulo de salida compatible con las tolerancias de las probetas que pretendíamos obtener. Aprovechamos la configuración del modelo original para generar dos cáscaras independientes con idéntica geometría y de ellas elegir la mejor para realizar una nueva placa de figura móvil. Las dimensiones características de estas nuevas cáscaras se presentan en la siguiente tabla.





Fig. 7.20: Modelo para el diseño final de cáscara,

Fig. 7.21: Cáscaras con el diseño final.

CÁSCARA DE UNA CAVIDAD (DISEÑO FINAL)

	MODELO VIRTUAL	MODELO FÍSICO EN BRUTO		A STATE OF THE STA	FÍSICO BADO	CÁSCARA		
		Probeta1	Probeta2	Probeta1	Probeta2	Probeta1	Probeta2	
ANCHO CÁSCARA (mm)	34.0	34.074	34.123	34.048	34.115	34.111	34.146	
LARGO CÁSCARA (mm)	194.0	193.828	193.888	193.825	193.902	194.613	194.673	
ANCHO PROBETA (mm)	9.8 - 10.2	10.042	10.008	10.071	10.029	9.879	9.871	
ESPESOR PROB (mm)	4.3	4.265	4.284	4.322	4.315	4.293	4.324	
PLANITUD PROB.	0	0.173	0.214	0.208	0.283	0.199	0.144	
PLANITUD TOTAL PLANO PARTICIÓN (mm) A.	0	0.352	0.413	0.341	0.392	0.195	0.157	
PLANITUD PLANO DE APOYO (mm) B.	0	0.279	0.374	0.281	0.384	0.342	0.295	
PARALELISMO A Y B	0					0.409	0.337	

Tabla 7.3: Resultados de la medición realizada para el modelo y las cáscaras del diseño final adoptado.

Ancho y largo del inserto. Se mantiene la misma tendencia que en las cáscaras analizadas previamente. En el ancho se mantiene una estabilidad dimensional alta, mientras en la dirección longitudinal se observan unas diferencias importantes entre el largo de modelo y de las cáscaras. Lo atribuimos a problemas de estabilidad térmica del modelo en esta dirección.

- Ancho de las probetas. No es constante a lo largo de toda la sección, sino que se jugó con la tolerancia admisible en las mismas para dar un cierto ángulo de salida. Esto favorecía la deposición en las zonas críticas en la base de la superficie de partición en el modelo, así como facilitaba las operaciones de desmodelado. Los valores límites eran de 9.8 y 10.2 mm, y las diferencias entre los valores de los modelos y de la cáscara se deben a que están medidos en lados opuestos. También se observó un agarre alto entre la cáscara y el modelo en la zona de cavidad lo que lleva a pensar que se ha producido una contracción por tensiones internas.
- Espesor de las probetas. Se fijó con una sobremedida de 0.1 mm sobre el valor máximo admisible en la probeta para dejar cierto margen de actuación en las operaciones de rectificado el plano de partición. Se ha mantenido bastante estable entre el modelo y la cáscara.
- Planitud de las probetas. Se ha mantenido en valores similares a los de cáscaras anteriores, observando que la correspondiente a la probeta número 2 presenta una mayor recuperación y tiene unos mejores valores finales que los de la otra.
- Planitud del plano de partición. Ha mejorado notablemente en comparación con los de las otras cáscaras debido fundamentalmente a que ésta es mucho más rígida y a que la dimensión transversal donde se producían las mayores distorsiones, es en este caso bastante menor. Este era uno de los objetivos básicos que se perseguían con el cambio de diseño, observando una menor desviación en la correspondiente a la cáscara número 2.
- Planitud del plano de apoyo. Se ha mantenido en valores similares a los de cáscaras anteriores. Sin embargo en un análisis más detallado se observa que la deformación por la flexión en dirección longitudinal en el modelo, es justo opuesta a la que se observó en la cáscara. Esto hace pensar en la presencia de tensiones internas que están provocando esta deformación.
- Paralelismo entre los planos de partición y de apoyo. Fue un parámetro adicional que hemos medio en estas últimas cáscaras. Se observa unos mejores resultados en el caso de la probeta número 2.
- Espesor de cáscara. Quedó con un valor mínimo medido de 0.65 mm en la zona más delicada del plano de partición y de 2.10 mm en la base de la cavidad. Ambas cáscaras presentaron prácticamente los mismos valores. Sin lugar a dudas en los puntos críticos el valor de espesor de cáscara era inferior a este valor mínimo.

Como consecuencia de los resultados descritos anteriormente se tomó la decisión de optar por la cáscara con la probeta número 2, para generar el nuevo inserto.

De estos resultados se extraen las siguientes conclusiones.

- Adaptación de las formas de diseño a geometrías que presenten una rigidez elevada capaces de soportar las tensiones internas sin provocar deformaciones no tolerables. Las amplias superficies planas presentan un mal comportamiento.
- La necesidad de controlar las condiciones del proceso de electroconformado con el fin de conseguir un nivel bajo de tensiones internas, que no nos distorsionen las cáscaras una vez separadas de los modelos.
- Obligación de que estos modelos plásticos tengan que diseñarse también bajo criterios térmicos, con la intención de darles la mayor estabilidad posible. Este punto será objeto de estudio en futuras líneas de trabajo.

7.3 Fabricación de resto de componentes del molde.

Como ya hemos mencionado hemos empleado un conjunto de componentes normalizados para moldes de la empresa VAP, correspondientes a tipo VAP-SP-Nº5/175X260. Siempre es necesario realizar una serie mecanizados complementarios en el conjunto de placas. Estos mecanizados se realizaron en el Taller Mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la U.L.P.G.C.. Se empleó fundamentalmente el centro de mecanizado IBARMIA, así como en una fresadora universal marca EMCO para algunas operaciones auxiliares.



Fig. 7.22: Centro de mecanizado del LFI.

A continuación pasamos a relacionar brevemente los mecanizados necesarios para las diferentes placas del molde.

1. Placa de sujeción fija.

- Taladro pasante y cajera circular para el alojamiento del bebedero.
- Agujeros con rosca M8 para sujeción del anillo centrador.
- Ranuras para el paso de los cables de los transductores de presión.

2. Placa de figura fija.

- Taladros pasantes para el bebedero.
- Ranuras circulares para el canal de alimentación.
- Taladros para montaje de los transductores de presión.
- Ranuras para la colocación de los conectores de los transductores de presión.

3. Placa de figura móvil.

- Cajeras rectangulares para el alojamiento de la cáscara.
- Ranuras para la salida de los tubos de refrigeración.
- Agujeros con rosca M8 para sujeción con la placa intermedia.

4. Placa Intermedia.

- Taladros pasantes para los casquillos de guiado de la apertura y cierre.
- Taladros y avellanado para las guías del sistema de expulsión.
- Taladros de paso de los expulsores.
- Taladros y avellanado para los tornillos de unión con la placa de figura móvil.

5. Placa soporte de expulsores.

- Taladros para los casquillos guía del sistema de expulsión.
- Taladros y avellanados de los expulsores.

6. Placa soporte de expulsores.

- Taladros y avellanado para los casquillos guía del sistema de expulsión.
- Agujero roscado M12 para la varilla de expulsión.

7. Placa de sujeción móvil.

- Taladros y avellanado para los casquillos guía del sistema de expulsión.
- Taladro de paso para la varilla de expulsión.

Aunque la mayoría de los mecanizados son bastante simples, se empleó el centro de mecanizado con control numérico. Ello se debió a que permitía una mayor precisión de posicionamiento, necesaria para lograr un correcto ensamblaje de los diferentes componentes del molde. Como equipamiento auxiliar se emplearon además mordazas de precisión para la sujeción de piezas, suplementos rectificados para el apoyo de las

mismas, y comparador tridimensional para la orientación de pieza y referencias de programación de los mecanizados.



Fig. 7.23: Verificación dimensional de la sujeción de pieza.



Fig. 7.24: Mecanizado en una de las placa de sujeción.

7.4 Fabricación del inserto.

Para completar la fabricación del molde falta la generación del inserto al integrar la cáscara dentro de la placa de figura móvil. Una vez se tuvieron fabricadas la placa mecanizada y la cáscara, se procedió a realizar pequeñas labores de ajuste, ya que se había fabricado antes la placa que la cáscara y se dejó una pequeña sobremedida para asegurar un buen ensamble de ambas. Una vez completado el ajuste se comprobó el correcto posicionamiento de la cáscara dentro de la placa, empleando para ello la máquina tridimensional ScanMax.

El siguiente paso consistió en montar el sistema de refrigeración, para lo que previamente teníamos que realizar la unión entre los tubos y la pletina de cobre. Se empleó para esta unión una soldadura fuerte a la plata realizada con soplete oxiacetilénico. Una vez soldado se procedió a su montaje sobre la cáscara para comprobar el paso de los tubos por las ranuras de la placa. Estos tubos poseen una gran ductilidad y permiten un fácil deformación hasta alcanzar la posición adecuada.



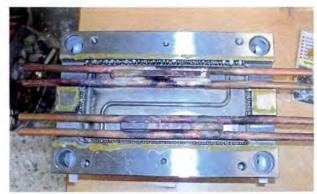


Fig. 7.25: Ensamble de la cáscara y la placa de figura, y montaje del sistema de refrigeración.

Hasta este punto las operaciones seguidas han sido exactamente las mismas para el diseño original de inserto con dos cavidades, y de la solución final con inserto de una sola cavidad. Se pasó a la siguiente fase que consistía en rellenar la cáscara con la resina epóxica para obtener el inserto propiamente dicho. La diferencia entre ambos casos fue la resina empleada que aunque similares poseían características diferentes en prestaciones y manipulación.

Para el inserto con doble cavidad se empleo la resina Hysol 3472 de Loctite. Esta es una resina epóxica bicomponente vertible a temperatura ambiente que posee un relleno con polvo de acero en un porcentaje en peso del 50%. Se empleó una temperatura de 40°C para mejorar la fluidez durante el vertido por gravedad y facilitar el relleno de cáscara. El volumen total necesario se dividió en coladas de máximo 50 gr por componente para mezclar y verter con rapidez y evitar que el curado acelerado por la temperatura dificultara el proceso. El relleno se hizo en dos etapas:

- Sin colocar el sistema de refrigeración se rellenó el fondo de la cáscara hasta la altura de la cavidad. Se aprovechó para colocar los termopares apoyados sobre la superficie posterior de la cavidad y montar de nuevo el sistema de refrigeración.
- Se completó el relleno hasta ocultar completamente los tubos de refrigeración y sobresalir por encima de la superficie de la placa.





Fig. 7.26: Fases de relleno del inserto,

Para el inserto de una cavidad se empleo la resina Hysol 3479 de Loctite. Es también una resina epóxica bicomponente pero en formato de masilla, que posee un relleno con polvo de aluminio. Esto significaba que el relleno sería más complejo aunque tras consulta con el fabricante, éste me recomendó elevar la temperatura de los componentes antes de la mezcla hasta los 100°C, sin riesgo de degradación. Tras unas pruebas iniciales se observó que a 80°C se conseguía una fluidez aceptable y se decidió

trabajar a esta temperatura. Se siguió el mimo procedimiento de relleno que en el caso anterior observando en las primeras mezclas que la fluidez disminuía bastante rápido y el vertido se dificultaba en gran medida. Nos vimos obligados a ayudarnos de alambre y espátula para conseguir un llenado lo más homogéneo posible.

El curado de ambas resinas se prolongó durante unas 15 horas para conseguir las propiedades mecánicas que garantiza el fabricante. Se pasó a continuación a planear el excedente de relleno que sobresalía de la superficie posterior de la placa de acero. Decidimos no tocar la superficie de acero para mantener la precisión del fabricante y garantizar un correcto ensamblaje con el resto de placas. Se observó que en el primer inserto con dos cavidades el relleno logrado era muy homogéneo, mientras en el segundo aparecían algunas zonas donde no se había logrado rellenar completamente.

Para completar el inserto aún faltaron realizar unas operaciones de mecanizado adicionales como eran los taladros de paso de los expulsores, que tenían que atravesar tanto el relleno como la cáscara de níquel. Estos taladros al igual que el planeado anterior, se realizaron también en el centro de mecanizado. A continuación unimos esta placa con la intermedia para formar el "sándwich" con el relleno y llevamos el conjunto a la rectificadora de superficies planas que dispone el L.F.I..



Fig. 7.27: Rectificadora de superficies planas del LFI.



Fig. 7.28: Rectificado del inserto con el diseño original.

Se realizó un rectificado de toda la superficie de la placa de figura móvil para conseguir el plano de partición del molde. Para el primer inserto se había dejado la cáscara 0.2 mm por encima de la placa y se observó que empezaban a aparecer fisuras en los puntos críticos donde el espesor de níquel había sido muy pequeño. Éstos se localizaban fundamentalmente en los contornos de las cavidades más hacia el exterior del molde, y en los límites del inserto. En la zona central del inserto, que se encontraba hundida por la desviación de planitud comentada, casi no se había comido nada. Se concluyó que aquellas zonas críticas que sabíamos de su localización pero no habíamos

podido medir, el espesor de níquel alcanzado era prácticamente del mismo orden de magnitud que las desviaciones geométricas del plano de partición.

También se observó que las zonas fisuradas no se mantenían en el mismo plano mecanizado, sino que mostraban una tendencia a levantarse en forma de escamas. Este comportamiento de la cáscara lo achacamos a la presencia de tensiones internas que se liberan tras la fisuración provocando estas deformaciones. Se decidió completar el rectificado de la superficie de partición hasta eliminar todo el níquel de la misma, quedando únicamente en el fondo y contorno de las cavidades, canales de alimentación y contorno exterior del inserto. Se observó que la resina había logrado un relleno muy bueno del fondo de la cáscara sin apenas defectos. La superficie de resina no quedó perfectamente plana, ya que en aquellas zonas de mayor espesor de níquel no se llegó a rectificar. A pesar del fracaso obtenido con este inserto, la información extraída del mismo fue vital para acometer las modificaciones de diseño que permitieron conseguir el segundo inserto.





Fig. 7.29: Grietas, fisuras y levantamiento de capa de níquel.

En el inserto de una sola cavidad se incorporaron las modificaciones de diseño ya mencionadas en apartados anteriores. Se seleccionó la cáscara que más garantías de éxito presentaba con respecto a las desviaciones geométricas ya analizadas. Se cuidó con detalle el ensamble de la cáscara y placa para lograr el mejor posicionamiento posible y se había decidido durante el mecanizado dejar la cáscara 0.2 mm por debajo de la superficie de acero. Decidimos rectificar lo mínimo necesario para conseguir cerrar el contorno de cavidad del inserto. La superficie obtenida quedó aparentemente bien con una desviación de planitud muy baja del orden de 5 micras. Tras una observación más minuciosa con lente de aumentos y reflejo de luz, se observaron unas marcas superficiales que parecían microfracturas, precisamente en las zonas más críticas. A pesar de ello dimos por aceptable el inserto, y en condiciones de ser sometido a las pruebas de ensayo del molde.

7.5 Ensamble y ajustes del molde.

Una vez completada la fabricación de los componentes del molde, pasamos a realizar el ensamblaje de la herramienta. Una de las ventajas fundamentales del empleo de componentes normalizados, es que debido a las estrechas tolerancias que garantiza el fabricante se logra un ensamble fiable y sin problemas. Los mecanizados practicados a los diferentes componentes se realizaron con un exquisito control dimensional, y con unas tolerancias holgadas que facilitara el ensamblaje de estos componentes.

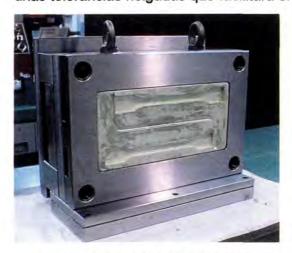




Fig. 7.30: Ensamble del semimolde móvil.

Fig. 7.31: Montaje del semimolde fijo.

Lógicamente existen dos subensambles bien diferenciados como son los semimoldes fijo y móvil. En el semimolde fijo se colocaron las guías de apertura y cierre, y los transductores de presión entre la placa de sujeción y la de figura, además del bebedero y el disco centrador. En el semimolde móvil se realiza en primer lugar la unión atornillada entre la placa de figura y la intermedia, colocando entre ambas los casquillos de guiado de la apertura que consiguen el correcto alineado de ambas. También se montan entre estas placas unas guías para el sistema de expulsión. En segundo lugar se colocan los expulsores entre sus placas base y soporte, así como unos casquillos de guiado para las mismas. Con este subconjunto ensamblado, se hacen pasar los expulsores a través de los agujeros de paso, y las placas a través de las guías correspondientes. A continuación se montan las regletas separadoras y la placa de sujeción con los casquillos de guiado del sistema de expulsión, mediante los largos tornillos que roscan sobre la placa figura y rigidizan todo el conjunto. Se completó este subensamble con el ajuste de la longitud de los expulsores, y unas simples operaciones de limpieza y acabado superficial de las cavidades.

Una vez se tuvieron los subensambles de los dos semimoldes, se procedió a la comprobación del cierre. Se empleo el procedimiento de tintado de la superficie de partición para comprobar que la figura quedaba bien marcada en la placa fija. Tras estas últimas pruebas el molde quedaba listo para ser sometido a las pruebas de inyección.

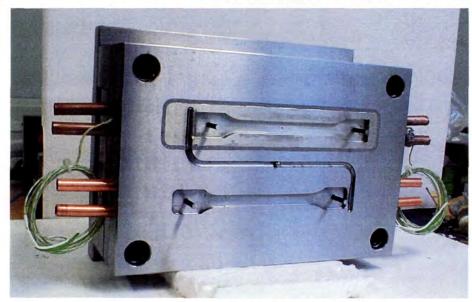


Fig. 7.32: Ensamblaje del semimode móvil con el inserto definitivo de una

Capítulo 8

ENSAYO DEL MOLDE CON INSERTO ELECTROCONFORMADO

8 ENSAYO DEL MOLDE CON INSERTO ELECTROCONFORMADO.

8.1 Introducción.

Tras la fabricación y ajuste del molde desarrollado, éste fue trasladado a las instalaciones de Taller de la Industria de Inyección de Plásticos (T.I.I.P.), del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. Se quiso aprovechar el equipamiento, recursos, y la experiencia de que dispone el T.I.I.P. en la evaluación de moldes prototipos, para ensayar el comportamiento del molde con inserto electroconformado.

El equipamiento empleado en estas pruebas de ensayo consistió en:

- Máquina de Inyección Mateu & Sole Meteor 270/55 H.
- Unidad de atemperamiento.
- Instrumental de medida (transductores de presión, sonda de temperatura, etc..)





Fig. 8.1: Instalaciones del T.I.I.P. en el C.P.S. de la Universidad de Zaragoza.

8.2 Descripción de una máquina de inyección.

Según la norma DIN 24450 la máquina inyectora es una máquina universal cuya tarea fundamental consiste en la fabricación discontinua de piezas a partir de masas de moldeo de elevado peso molecular y con la ayuda de presiones elevadas. Tiene cuatro partes bien diferenciadas, que son: unidad de inyección, unidad de cierre, unidad de control y bancada.[4][30]

- Unidad de inyección. Su misión consiste en coger el material desde la tolva de alimentación y dosificar, fundir, homogeneizar, transportar e inyectar el plástico dentro del molde. La configuración más habitual consiste en un husillo plastificador giratorio que también actúa como émbolo de inyección. Éste se encuentra dentro de un cilindro dotado de sistema de calefacción para la aportación de calor.
- Unidad de cierre. Se asemeja a una prensa y su misión es la de realizar la apertura y cierre del molde. Durante el proceso de inyección tiene que contraponer una fuerza superior a la generada por la presión de inyección, para evitar la apertura accidental del molde. Posee dos placas paralelas para la sujeción del molde, siendo la situada en el lado de inyección normalmente fija. La placa móvil se traslada en dirección perpendicular mediante sistemas mecánicos o hidráulicos, accionando el sistema de expulsión durante la carrera de apertura.
- Unidad de control. Es la encargada de gestionar y regular el proceso de inyección. Dispone de los instrumentos y elementos de accionamiento de la máquina, que permite ajustar y controlar el proceso.
- Bancada. Es el elemento que soporta las unidades mencionadas y los diferentes sistemas mecánicos, hidráulicos y eléctricos de la máquina.



Fig. 8.2: Unidades de invección y de control



Fig. 8.3: Unidad de cierre y atemperamiento.

Para estos ensayos hemos empleado la máquina inyectora Mateu & Sole Meteor 270/55 H. Las características principales de esta máquina se desglosan en la siguiente tabla.

		Inyectora	MATEU	J &SOLE
	Fuerza de o		TN	55
Ĭ	Espesor	Mínimo	mm	120
	de molde	Máximo	mm	300
国	Carrera má	xima de apertura	mm	350
CIERRE	Dimension	es de los platos HxV	mm	525x525
H	Paso entre	columnas HxV	mm	355x355
0	Distancia n	náxima entre platos	mm	650
İ	Diámetro d	e las columnas	mm	60
		cima de expulsión	KN	44
		xima de expulsión	mm	130
	Diámetro d	lel husillo	mm	35
	Relación L	/D del husillo		20.5
	Presión má	xima de inyección	Ваг	1735
į	Volumen te	eórico de inyección	cm ³	155
z		no de inyección (PS)	Gr	140
Ω	Caudal de		cm ³ /sg	91
ည		de plastificación	g/s min ⁻¹	50
INYECCIÓN		regulable del husillo	min ⁻¹	216
E	Par de giro		Nm	696
	Zonas de ca		n°	4+1
		Calefacción	Kw	9.58
		rima de apoyo	KN	90.7
	boquilla			
		xima de la boquilla	mm	320
	Ciclos en v		mim ⁻¹	60
1	Potencia de		KW(cv)	15(20)
RA		tal instalada	KW	24.58
GENERAL	Capacidad aceite	del depósito de	L	170+20
5		e la máquina	Kg	3200

Tabla 8.1: Características de la máquina empleada en los ensayos.

Para la inyección de algunos de los materiales seleccionados se ha requerido la utilización de una unidad de atemperamiento. Ésta se intercala en el circuito de refrigeración, con el objetivo de conseguir las temperaturas adecuadas en la superficie del molde.

8.3 Instrumentación empleada.

En principio se pensó en emplear durante las pruebas de ensayo, una instrumentación adicional a la de la máquina, para conseguir la mayor cantidad de información posible que nos permitiera analizar el comportamiento del molde. Esta instrumentación consistió en:

- Dos transductores de presión colocados en la placa de figura fija y coincidentes con la cavidad del inserto electroconformado. Uno de ellos en la zona de entrada de la cavidad y otra en el final de la misma. Se han empleado el tipo 6157BB de la marca Kistler.[49]
- Dos termopares tipo K de punta soldada y aislamiento de fibra de vidrio, colocados en la cara posterior de la cáscara de níquel, uno en la zona de entrada y otra en el extremo opuesto de la cavidad.

La cadena de medida se complementa con los correspondientes amplificadores de carga tanto para los transductores como para los termopares. Estos se conectan a un adaptador DAS-16 de Kistler que actúa de conversor entre las medidas captadas y la tarjeta de adquisición de datos colocada en un ordenador. En este último se ejecuta el software DataFlowTM, que permite almacenar y representar gráficamente los datos obtenidos.[50]

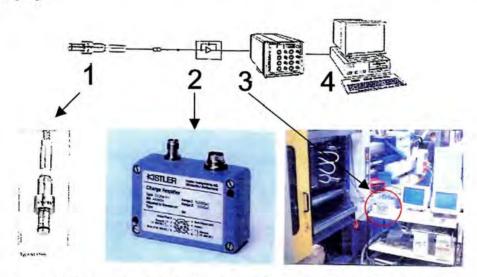


Fig. 8.4: Componentes de la cadena de medida: 1 – transductor, 2 – amplificador, 3 – adaptador conversor, 4 – tarjeta de adquisición de datos en PC.

Debido a una avería en la caja del adaptador de conexiones de los amplificadores, estas mediciones no se pudieron hacer en la fecha en la que se realizaron las series de inyección con los diferentes termoplásticos. Se realizaron con posterioridad y sólo se pudo utilizar los transductores de presión por un problema en la conexión de los termopares tipo K. Para obtener información de la temperatura de cavidad empleamos una sonda que se dirigía de forma manual a la entrada, centro y final de cada una de las cavidades.

La información obtenida de los registros de presión para cada uno de los materiales inyectados se presentan en el anexo E.

8.4 Descripción del ensayo.

Como objetivo básico de estos ensayos estaba el determinar las características de los insertos electroconformados en comparación con las características de moldes de acero. Se pretendía obtener inyecciones en diferentes materiales representativos de la industria de inyección para comparar las propiedades alcanzadas con referencias del fabricante y de otros estudios de moldes rápidos. Esto requería realizar las pruebas de forma muy conservadora para evitar que se produjera un fallo prematuro que no permitiera alcanzar tales objetivos. Una vez cumplidos los objetivos básicos pasaríamos a ensayar los insertos de manera más exigente para poder estimar sus capacidades.

Se seleccionaron como materiales finales de ensayo los siguientes:

- Polietileno de alta densidad (PE), ERACLENE MP94 de Polimeri Europa.
- Poliestireno (PS), STYRON 485 de Dow Chemical.
- Poliamida 6 (PA6), ACINYL6 2700, de Ashland.
- Policarbonato (PC), TARFLON IV1900R, de Idemitsu.

En primer lugar se montó el molde en máquina con el inserto de doble cavidad, y se realizaron las operaciones de ajustes de recorridos y velocidades de la apertura, cierre, seguro de molde y expulsión. Se fijó una fuerza de cierre inicial de 20 ton para comprobar el cierre del molde. Por último se realizó la conexión de los instrumentos de la cadena de medida.

Se empezó empleando el material más sencillo de inyectar el PEHD, sobre la placa con el inserto de doble cavidad. Esto nos permitió estimar las características básicas del comportamiento de este tipo de inserto, y hacer una preselección de los parámetros operativos con los que inyectaríamos con seguridad sobre la placa con el inserto definitivo. Se empezaría inyectando por el polietileno, y se continuaría con el poliestireno, poliamida y el policarbonato, en este orden. El motivo era ir paulatinamente subiendo la temperatura de inyección empleada, así como la del molde.

8.5 Ensayo sobre la placa con inserto de dos cavidades.

Inicialmente se estableció como temperatura de inyección para el PE los 200°C. Se empleó como temperatura del agua de refrigeración 10°C, que se traducían en torno a los 15°C en la cavidad del molde. La fuerza de cierre se estableció en 20 ton.

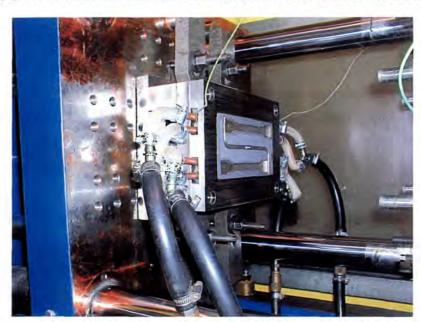


Fig. 8.5: Molde con inserto de dos cavidades montado en máquina.

Se empezó limitando a valores muy bajos la presión de inyección y variando la dosificación y la velocidad de inyección hasta alcanzar un llenado de cavidad adecuado. Se observó un llenado desequilibrado de ambas cavidades en favor de la Nº2. Se fijo el llenado con un perfil del 10% de velocidad hasta que el plástico alcanzó la cavidad, correspondiente a una dosificación de 10 mm de avance del husillo. Para el resto del llenado hasta una dosificación de 26 mm se empleó una velocidad de llenado del 40%. Se alcanzó un tiempo de inyección de 2.5 sg y el límite de presión de inyección de 52 bar hidráulicos. Este doble perfil se estableció para disminuir las rebabas al conseguir un enfriamiento más rápido en las paredes exteriores del canal de alimentación.

Debido a que en este inserto la zona de alimentación se encontraba muy debilitada, al recibir la presión de inyección en sus valores más altos la resina cedía. La compactación se estableció con 30 bares durante 6 sg. Cuando se intentó subir el límite de la presión de inyección a 55 bares, se observó una rebaba importante en la curva del canal de alimentación, por lo que se probó incrementar la fuerza de cierre hasta 25 ton. Siguió manteniéndose dicha rebaba por lo que se concluyeron estas pruebas iniciales

repitiendo las condiciones anteriores y comprobando que se repetían los resultados obtenidos.

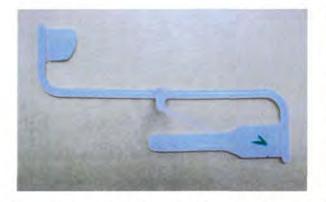


Fig. 8.6: Primera inyección realizada en el molde



Fig. 8.7: Perfil de presión hidráulica de la unidad de inyección.

Se repitieron los pasos anteriores con una temperatura de inyección de 220°C, manteniendo el resto de parámetros operativos. Para una velocidad de inyección constante del 10% se alcanzó una presión de inyección máxima de 37 bar durante el llenado. Y se compactó con 30 bar de presión durante 6 segundos. En estas condiciones no se observó un rechupe excesivo en las piezas, y se decidió aumentar la compactación introduciendo un perfil ascendente de 20, 30, 35 y 40 bar durante 2 sg.

El rechupe se redujo y procedimos a introducir en la velocidad de llenado un segundo tramo con valores de 20%, 30% y 40% para el llenado de cavidad. Empezaron a aparecer pequeñas rebabas en el inicio de los canales de alimentación. En esta situación la presión máxima alcanzada era de 47 bar, y el tiempo total de ciclo 53 sg.



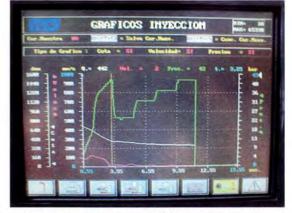


Fig. 8.8: Pruebas de llenado con PE y perfil de presión resultante de las condiciones de inyección.

Se decidió incrementar la velocidad de la segunda etapa de llenado hasta el 50% e incrementar el límite de la presión de inyección hasta los 55 bar, observando que se

reproducía el problema de la gran rebaba justo antes de la curva del canal de alimentación.

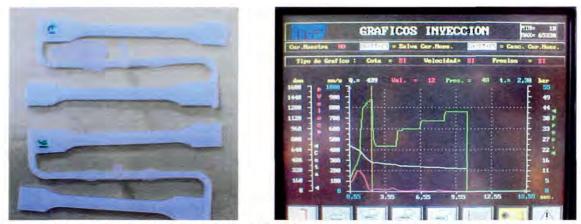


Fig. 8.9: Piezas con rebabas en el canal de alimentación, y perfil de presiones aplicado.

Como conclusión más relevante a estas pruebas preliminares realizadas sobre la placa del inserto de doble cavidad, se extrajo que existe una limitación de uso con presiones de inyección superiores a los 50 bar hidráulicos. Esto se producía debido a que la presión máxima en la masa de plástico alcanzada en el bebedero, incidía directamente en una zona de la cáscara muy debilitada y sobre un área muy reducida, como es el inicio de los canales de alimentación.

8.6 Ensayos sobre la placa con inserto y cavidad mecanizada.

Tras las pruebas realizadas con la otra placa, partíamos con una mayor información y buenas expectativas sobre los ensayos en este inserto. Las diferencias esenciales con respecto al anterior y que afectaban al funcionamiento de las mismas eran las siguientes:

- La zona del bebedero no incidía directamente sobre el inserto sino sobre acero, así como la mayor parte del canal de alimentación. Esto implica que la zona de mayores presiones no se encontraba directamente sobre el inserto, con lo que tendríamos un mayor margen de maniobra.
- La resina empleada en el relleno tiene una prestaciones más altas en cuanto a la resistencia a compresión así como una temperatura límite de uso más alta.
 Esto en principio nos permitiría inyectar a presiones más elevadas.
- Rodeando al inserto existía un canal relleno de resina, que se ve atravesado por el canal de alimentación, con lo que existe un contacto directo entre la

masa fundida y la resina. En principio este parecía un punto crítico y a vigilar durante los ensayos.

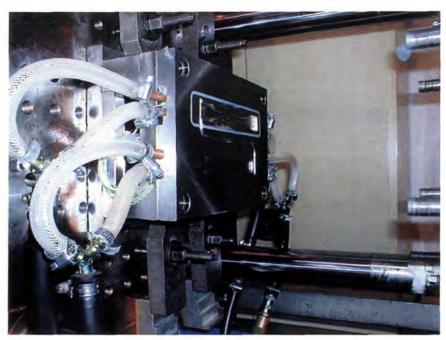


Fig. 8.10: Molde con inserto y cavidad mecanizada, montado en máquina.

8.6.1 Pruebas con Polietileno.

Se comenzó con las pruebas de llenado y compactación con el PEHD siguiendo los mismos pasos descritos para la placa anterior. Se observó un mejor equilibrado de las cavidades de este inserto. Los parámetros operativos establecidos fueron los siguientes:

Temperatura de inyección (°C) 220			220	Temperatura de refrigeración (°C)				
Límite Presión de inyección (bar) 50			50	Fuerza de cierr	e (To	on)		25
Dosificación de llenado (mm)		28	Velocidad inyección (%ma	de _ ax)	0-10 mm 10%	-	o Dos. 0%	
Compactación				Presión (bar) Tiempo (sg)	20	30	35 2	40 6
Tiempo de enfriamiento más carga (sg)	25			apertura y cierre roceso de carro		molde, exp	ulsión	y 12

Tabla 8.2: Parámetros operativos de la serie con PE.

En la siguiente figura se muestran las pruebas de inyección realizadas y el perfil de presión hidráulica resultante en color verde, mostrado por la pantalla de la unidad de control de la máquina.





Fig. 8.11: Pruebas de inyección y perfil de presiones de la serie con PE.

Se pretendió realizar una prueba de 50 inyecciones en condiciones comparables dividida en tres etapas de 10, 15 y 25, para medir temperaturas de cavidad en las paradas y ver cómo evolucionaba. La temperatura de cavidad antes de comenzar la serie se había estabilizado en torno a los 15°C tanto para el inserto como para la cavidad mecanizada. Se realizó la primera tirada de 10 inyecciones y rápidamente se midió la temperatura en cavidad, alcanzando los valores de la fila mitad de serie de la tabla siguiente. Estos valores eran lógicos debido a una peor difusividad térmica en el inserto con respecto a la otra cavidad. En la entrada de la cavidad del inserto la temperatura alcanzada era bástante más alta que al final de la misma, y en el centro están las temperaturas mas bajas. Esto es debido al contacto directo entre la cáscara y la pletina de cobre, que establece un puente térmico por donde se conduce el calor desde los extremos hasta los canales de refrigeración. Se realizó una segunda tirada 15 inyecciones más, comprobando al finalizar la misma que las temperaturas se mantenían en valores muy similares, como se aprecian en la tabla adjunta. El primer punto medido correspondía a la entrada a la cavidad del inserto, y se observaba unos cambios rápidos en la temperatura tendiendo a alcanzar los valores de los otros dos puntos.

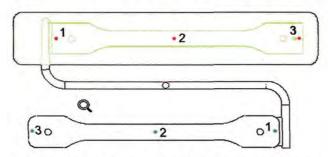


Fig. 8.12: Puntos de medición de la temperatura de cavidad.

Temperatura	Cav	vidad de Ni	iquel	Cavidad Acero			
de cavidad (°C)	Entrada 1	Centro 2	Final 3	Entrada 1	Centro 2	Final 3	
Inicio serie	16	14	16	15	15	15	
Mitad serie	32	22	24	17	17	16	
Final serie	32	24	26	18	17	17	

Tabla 8.3: Temperaturas en las cavidades del inserto y la mecanizada.

En la siguiente figura se presenta el registro de presiones en cavidad para esta serie en PE. En ella se observa la fase de llenado en el primer tramo de la curva donde queda reflejado el retardo en la señal del segundo transductor situado al final de la cavidad. En esta fase se observa una caída de presión en la señal del primer transductor debido a que una vez llenada esta cavidad el flujo se concentro en completar el llenado de la otra, que presentaba un pequeño desequilibrio. Este aspecto es indicativo de que la entrada en compactación estaba retrasada, y a una baja velocidad de llenado.

En la fase de compactación se manifiestan claramente los cuatro escalones programados en la máquina. También queda patente que la presión al final de la cavidad es menor que en la entrada con una diferencia significativa, debido a la naturaleza viscoelástica del material. La presión máxima alcanzada en la posición del transductor de entrada fue de unos 300 bar (29.4MPa), y en el de final de cavidad de 285 bar (28.0 MPa). En la última etapa de compactación que se mantenía a 40 bar durante 6 sg, se observa que la presión en cavidad disminuye gradualmente como consecuencia del enfriamiento y contracción del material. El final de la compactación coincide aproximadamente en el punto donde vuelven a converger las dos curvas. Desde este punto hasta que se alcanza la presión atmosférica se tarda aproximadamente 5 sg. La adquisición de datos de se mantuvo durante 25 sg y a una frecuencia de 250 Hz (datos por segundo).

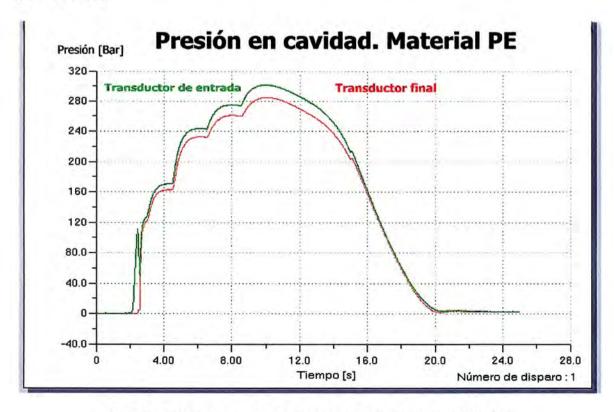


Fig. 8.13: Registro de presión de cavidad en el inserto para la serie de PE.

Se observaron unas fisuras en el inserto en la zona que más se rectificó y bordeando el contorno de la cavidad. Esta zona era la de menor espesor en la cáscara de níquel y por tanto de mayor debilidad, con lo que tras las inyecciones realizadas empezaba a resentirse. Ante esta situación y para ser conservadores se decidió limitar la serie a estas 25 inyecciones realizadas y cambiar a otro material. El tiempo de inyección fue de 2.3 sg, y el tiempo de ciclo total de 52 sg. Con este material se realizaron un total de 70 inyecciones entre pruebas de llenado, compactación y serie.



Fig. 8.14: Piezas de serie con PE.



Fig. 8.15: Fisuras aparecidas en el inserto.

8.6.2 Prueba con Poliestireno.

Se continuó con las pruebas con el PS, para lo que fue necesario colocar la unidad de atemperamiento en el circuito de refrigeración. Se conectó la refrigeración de ambas cavidades en serie y se estableció como temperatura para el agua de refrigeración los 50°C. Se estableció inicialmente una temperatura de inyección de 240 °C, que se comprobó excesiva por el desprendimiento de vapores de degradación. Se redujo la temperatura hasta los 220°C y se realizaron las pruebas de llenado y compactación. Se produjeron problemas de agarre excesivo en la cavidad mecanizada ya que no tenía ángulo de salida. Esto provocaba una flexión excesiva de la probeta por el empuje de los expulsores sin que pudiesen extraerla. Se redujeron las temperaturas de inyección y de refrigeración hasta los 200°C y 40°C, pero el problema no mejoró. Finalmente se provocó una mayor contracción en la probeta al subir la temperatura de inyección hasta los 215°C y la de refrigeración hasta 70°C, con lo que se redujo la fuerza de agarre en la cavidad, y las probetas se podían extraer sin deformación excesiva.

Las condiciones definitivas para la realización de la serie con PS fueron las que se muestran en la siguiente tabla.

		í
		J
		ľ
		١
		ļ

Temperatura de inyección (°C) 2		215	Temperatura de refrigeración (°C)			°C)	70	
Límite Presión de inyecció	ímite Presión de inyección (bar) 5		50	Fuerza de cierr		30		
Dosificación de llenado (mm)			24	Velocidad de Toda Dos. inyección (%max) 15%				
Compactación				Presión (bar) Tiempo (sg)	15 5	5		
Tiempo de enfriamiento más carga (sg)	37	Tiemp avance	o de a e y reti	apertura y cierre roceso de carro	de r (sg)	molde, expu	ulsión y	12

Tabla 8.4: Parámetros operativos de la serie con PS.

En la siguiente figura se presentan las pruebas de llenado con este material, así como el perfil de presiones alcanzados en la unidad de inyección.



Fig. 8.16: Pruebas de inyección con PS.



Fig. 8.17: Perfil de presiones en la serie de PS.

Las temperaturas medidas en el inicio, mitad y final de serie, se muestran en la siguiente tabla. A diferencia del caso anterior, la temperatura de la unidad de atemperamiento es superior a la alcanzada en cavidad. Por este motivo la temperatura en el centro de la cavidad del inserto es mayor a la de los extremos, y la diferencia entre estos y el centro es pequeña. Tras las series de 10 y 15 inyecciones se observó un pequeño incremento de temperatura entre 3 y 4 °C para ambas cavidades.

Temperatura	Cav	vidad de Ni	iquel	Cavidad Acero				
de cavidad (°C)	Entrada 1	Centro 2	Final 3	Entrada 1	Centro 2	Final 3		
Inicio serie	47	51	48	52	53	52		
Mitad serie	52	54	53	54	55	54		
Final serie	50	53	52	55	56	55		

Tabla 8.5: Temperaturas en las cavidades del inserto y la mecanizada.

En los registros de presión en cavidad se observa una diferencia importante con respecto al caso anterior, y es que la caída de presión en el transductor de entrada durante la fase de llenado es bastante más pequeña. Además la presión máxima se alcanza durante esta fase de llenado y es de 145 bar aproximadamente. Ambos aspectos parecen indicar que el cambio a compactación se ha realizado en el momento adecuado. La presión máxima alcanzada durante la compactación es de 140 bar que caen de manera casi lineal hasta los 70 bar durante los 5 sg que dura esta fase. Se requieren otros 4 sg hasta alcanzar la presión atmosférica.

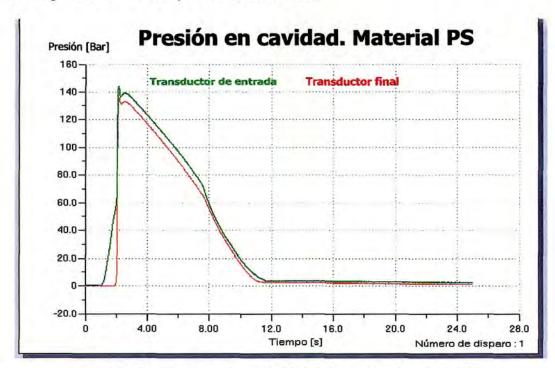


Fig. 8.18: Registro de presión en cavidad del inserto para la serie de PS.

El tiempo de inyección con este material fue de 2.4 sg, y el tiempo global del ciclo fue de 58 sg. Con este material se hicieron unas 80 inyecciones en total considerando todas las pruebas iniciales realizadas.

8.6.3 Pruebas con Policarbonato.

Posteriormente continuamos con las pruebas con el PC, que estuvo en la estufa de desecado alrededor de 14 horas a 100°C. Se estableció como temperatura de refrigeración en la unidad de atemperamiento los 80°C, detectándose problemas en el circuito de refrigeración. Esto fue debido a que las mangueras se reblandecían en exceso y las abrazaderas no ejercían suficiente apriete. El problema se solucionó introduciendo

las mangueras una mayor distancia sobre los tubos de cobre y colocando una segunda abrazadera en cada unión.

Se inició el ajuste de los parámetros operativos con pruebas de llenado y compactación, observando que las piezas salían con un tono amarillento, característico de la degradación del material. El problema no estaba tanto en una temperatura elevada sino en un tiempo de permanencia elevado en el cilindro, con lo que se decidió realizar las pruebas de forma más rápida y disminuir el volumen de carga del husillo. Los parámetros definitivos para la realización de la serie se muestran en la siguiente tabla.

Temperatura de inyección	Temperatura de inyección (°C) 300					igeración (°C)	80
Límite Presión de inyecció	Fuerza de cierr	e (To	on)		40			
Dosificación de llenado (mm) 24				Velocidad inyección (%ma	de ax)	0-10 mm 15%	_	to Dos.
Compactación				Presión (bar) Tiempo (sg)	30 2	40	45 2	
Tiempo de enfriamiento más carga (sg)	35			apertura y cierre roceso de carro		nolde, exp	ulsión	y 12

Tabla 8.6: Parámetros operativos de la serie con PC.

En las siguientes figuras se presentan las pruebas de llenado y el perfil de presiones mostrado por la unidad de control.



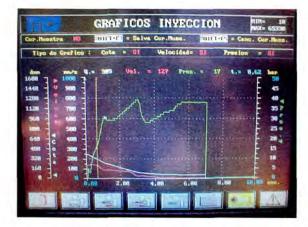


Fig. 8.19: Pruebas de inyección con policarbonato, y perfil de presiones correspondiente.

El perfil de velocidades se estableció de esta forma para evitar un agarre excesivo de la probeta en la cavidad mecanizada debido a que ésta no tenía ángulos de salida. El tiempo de enfriamiento se subió hasta los 30 sg para aumentar la rigidez de las probetas antes de la expulsión y conseguir la extracción sin deformación significativa. Se comenzó la serie con una temperatura en cavidad en torno a los 75°C. Las primeras unidades

presentaron problemas de llenado y excesivas burbujas, con lo que la serie se incrementó hasta las 30 unidades, descartando las 4 primeras. Las temperaturas alcanzadas en las cavidades tanto en la mitad de la serie como al final de la misma, se situaron sobre los 70°C. No encontramos lógica esta disminución de temperatura y la achacamos a un funcionamiento anómalo del termopar empleado en estas mediciones.

En el registro de presión en cavidad se observa que durante la fase de llenado la presión alcanzada es muy baja, debido seguramente a la baja velocidad de llenado, que también se manifiesta en el retardo de la señal del segundo transductor. En la fase de compactación solo se reflejan las dos primeras etapas, quedando la tercera que pasa de 40 a 45 bar compensada en la representación por la caída de presión por enfriamiento. La presión máxima alcanzada es de 290 bar (28.5 MPa) frente a los 40 bar alcanzados por la unidad de inyección en esa etapa de compactación. Tras completar esta fase se requiere otros 5 sg para alcanzar la presión atmosférica.



Fig. 8.20: Registro de presión en cavidad del inserto en la serie con PC.

En esta serie el tiempo de inyección fue de 3.4 sg, completando el ciclo en 56 sg. En el anexo B se presenta el informe generado por la aplicación MPA 6.0 para este polímero concreto, donde se observa que se recomienda un tiempo de llenado en torno a los 2 sg. Con las reservas del grado de aproximación del modelo de análisis, esto significa que en esta serie se ha realizado un llenado muy lento, con lo que al pasar a compactación, el plástico se habría enfriado en exceso. Aún con esto, la precisión del análisis ha sido bastante alta.

Se intentó mejorar la transparencia de las piezas, bajando la temperatura de inyección hasta los 280°C, pero no se completaba el llenado por limitación de la presión de inyección. Finalizamos aquí las pruebas con este material completando un total de 75 inyecciones con el mismo. Tras una observación detallada del estado del molde se observó un incremento en la fisuración detectada previamente.

8.6.4 Pruebas con Poliamida.

Las pruebas con este material se intentó realizar antes de las de policarbonato, pero se presentaron problemas que obligaron a posponerla. Se empezó las pruebas con la PA6 con una temperatura de inyección de 260°C. Se observó un salida continua del plástico por la boquilla debido a una insuficiente desecación a pesar de haber estado en torno a 5 horas a 90°C en la estufa. Esto fue consecuencia de que se empleó el material de un saco que estaba abierto desde hacía tiempo y éste había absorvido demasiada humedad. Se hicieron unas pruebas de inyección en estas condiciones y era imposible realizar continuarlas ya que se formaba un tapón a la entrada del bebedero debido a la salida incontrolada de material por la boquilla.

Se decidió aplazar la realización de la serie con este material hasta haber realizado un desecado más intenso. Una vez completado el mismo, se retomó la PA6 para completar las series de los cuatro materiales seleccionados. Ésta se había mantenido durante 7 horas a 100°C, observando que el problema de goteo por boquilla se redujo apreciablemente, hasta casi desaparecer cuando se incrementó la succión del husillo. Tras las primeras pruebas de llenado y compactación se observó claramente una mayor facilidad de inyección en comparación con los otros materiales, condicionada seguramente por la experiencia adquirida en las pruebas anteriores. Las condiciones operativas para esta serie fueron las que se muestran en la siguiente tabla.

Temperatura de inyección (°C)	260	Temperatura de re	efrigeración	(°C)	70
Límite Presión de inyección (bar)	Límite Presión de inyección (bar) 50				40
Dosificación de llenado (mm)	22	Velocidad de inyección (%max)	Toda Dos. 40%		
Compactación		Presión (bar) 10 Tiempo (sg) 6			
Tiempo de enfriamiento 25 más carga (sg)	Tiem expu	po de apertura Isión y avance y ret		de molde, carro (sg)	12

Tabla 8.7: Parámetros operativos de la serie con PA.

En la siguiente figura se muestran las pruebas de llenado y el perfil de presiones en la unidad de inyección, don se observa que la presión máxima alcanzada fue de 31 bar durante el llenado.





Fig. 8.21: Pruebas de llenado de PA6, y perfil de presiones correspondiente.

En el registro de presiones en cavidad se observa una presión durante llenado baja, acompañada de una caída de presión importante. La presión máxima alcanzada fue de 135 bar (13.2 MPa), frente a los 12 bar que muestra el perfil de presiones hidráulicas de la unidad de control. También se observa a diferencia de los casos anteriores es que la diferencia de presiones entre el transductor de entrada y el del final es mucho menor. Esto parece indicar una fluidez muy alta de la masa fundida, que coincide con lo observado durante las pruebas por la facilidad de inyección y la generación de más rebabas al introducirse el material en las pequeñas fisuras de la línea de partición y en los huecos de holgura de los expulsores.



Fig. 8.22: Registros de presión en cavidad del inserto para la serie de PA6.

Se realizaron un total de 26 inyecciones para esta serie, observando una temperatura poco variable tanto al inicio, intermedio como al final de la misma y en torno a los 58°C. Las inyecciones totales realizadas con este material fueron de 50 unidades, siendo el tiempo de inyección de 1.6 sg y el global de ciclo de 45 sg.

8.6.5 Pruebas de exigencia.

Una vez completada las series con los 4 materiales seleccionados, se buscó evaluar las capacidades del molde. Hasta el momento éste se había comportado bastante bien, presentado pequeños problemas de fisuración en zonas que habíamos previsto como más críticas. Se decidió realizar una serie de 10 unidades en PE en unas condiciones más exigentes que se acercasen a las que se emplearían si estuviéramos tratando con un molde en acero con la mismas características que este. Se llegó a las siguientes condiciones operativas, ajustando varios de los parámetros de entrada.

Temperatura de inyección	(°C)		220	Temperatura de	e refri	geración	(°C)	10
Límite Presión de inyecció	n (ba	r)	60	Fuerza de cierr	е (То	n)		40
Dosificación de llenado (m	ım)	_	24	Velocidad inyección (%ma		Toda Dos 50%	S.	
Compactación				Presión (bar) Tiempo (sg)	30 5	40 5		
Tiempo de enfriamiento más carga (sg)				apertura y cierre roceso de carro		olde, ex	pulsión y	6

Tabla 8.8: Parámetros operativos de la serie de exigencia con PE.

Se consiguió reducir el tiempo de inyección hasta los 0.9 sg, y el tiempo de ciclo total a 38 sg. La presión máxima alcanzada fue de 55 bar, de los cuales 22 se requerían para completar el llenado de los canales de alimentación. Se observó un incremento del resalte del expulsor de entrada en la cavidad electroconformada, debido seguramente a un pequeño hundimiento de la cáscara, en esta zona donde se alcanza la presión más elevada de la cavidad. También se produjo una pequeña esquirla en el tramo de resina situada en el canal de alimentación entre el inserto y la placa de acero. Creemos que se ha producido la fractura por adherencia originada en la unión con las partículas de bronce con que se recargó dicha zona. En las siguientes inyecciones no se observó que fuese variando su geometría.

Se decidió continuar estas pruebas de exigencia con PC, al requerirse las condiciones más desfavorables para el molde. Se partió de las condiciones empleadas en la serie y se fue variando en principio la velocidad de inyección hasta mantenerla constante al 50%, con lo que se logró un tiempo de inyección de 0.8 sg y una presión máxima alcanzada de 55 bar. La compactación se estableció en dos etapas de 20 y 25 ton de 2 sg de duración, respectivamente. Se observó que esta presión no subía más aunque se incrementase la velocidad de llenado, y pensamos en bajar la temperatura de inyección.

En el anexo B se presenta también un informe de la aplicación MPA 6.0, en la que se han establecido las condiciones de inyección de estas pruebas.

Se continuaron estas pruebas fijando una nueva temperatura de inyección en 290°C, y se hicieron unas pocas inyecciones llegando a realizar el llenado al 40% de velocidad y alcanzando una presión máxima de llenado 62 bar. La compactación se mantuvo con los mismos parámetros de la prueba anterior.



Fig. 8.23: Piezas con burbujas y trazas de humedad.



Fig. 8.24: Perfil de presiones en máquina durante las pruebas de

Se detectaron problemas con el PC, ya que éste durante el tiempo transcurrido durante estas pruebas había absorbido mucha humedad. Se procedió a introducir nuevo material que se encontraba en la estufa, aunque ésta había permanecido parada durante todo este tiempo. Se consiguió mejorar el problema y se prosiguió con las pruebas.

Se consideró interesante conseguir un referente de comparación para las series inyectando únicamente sobre la cavidad mecanizada en las condiciones más exigentes posibles. Se taponó la cavidad del inserto con ayuda de un trozo de colada de pruebas anteriores y se realizaron unas inyecciones con el 100% de velocidad. Se alcanzaron los 85 bar de presión máxima con un tiempo de inyección de 0.3 sg. La compactación se fijó

en principio en valores de 80 bar durante 2 sg., observando que la máquina no disponía de suficiente fuerza de cierre y se generaba el clásico "huevo frito" al abrirse el molde.

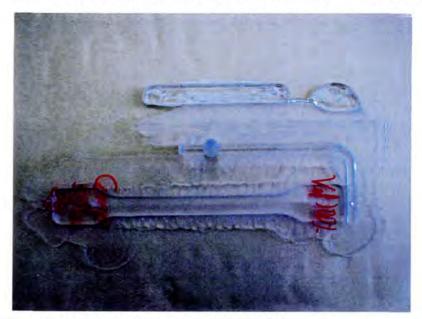


Fig. 8.25: Inyección defectuosa por falta de fuerza de cierre.

Se comprobó que ante esta situación el molde no había sufrido daños. Únicamente se observó que el relleno de resina en el contorno del inserto se había fracturado en el lado paralelo y más cercano al canal de alimentación y justo en el extremo opuesto a la entrada en cavidad. Se realizó una inyección en condiciones menos exigentes y se comprobó un funcionamiento adecuado del molde con lo que se prosiguió con las pruebas. La compactación se fijó finalmente en 20 bar durante 2 sg, para intentar conseguir las mejores propiedades mecánicas

Se obtuvieron unas pocas piezas en estas condiciones ya que la alta velocidad de llenado generaba burbujas en el interior de las piezas, acentuadas por el problema de humedad descrito anteriormente. Durante estas últimas pruebas y de manera accidental se inyectó en ambas cavidades en estas condiciones, consiguiendo piezas en apariencia buenas, y comprobando que el inserto no había sufrido desperfectos apreciables. Debido al estado del material que no permitía seguir con las pruebas, y a que no se disponía de más tiempo para continuarlas en otro momento, se decidió finalizar las mismas.

8.7 Conclusiones de las pruebas.

En total se inyectaron sobre el inserto de dos cavidades un total de 75 inyecciones. Sobre el inserto de una sola cavidad se inyectaron en las series iniciales: 70 de PE, 80 de PS, 75 de PC y 60 de PA6. En las pruebas de exigencia se inyectaron 40

de PE y 80 de PC. En las pruebas para extraer los registros de presión de los cuatro materiales se hicieron un total de 60 inyecciones más. En total fueron más de 500 inyecciones las realizadas sobre este inserto, quedando en condiciones de aguantar bastantes más.

Las conclusiones más relevantes extraídas de estas pruebas con el molde electroconformado son las siguientes:

- En general el molde mostró un comportamiento mejor de lo inicialmente esperado.
- Nos quedamos con la certeza de haber sido conservadores incluso en la fase de pruebas de exigencia, ya que queríamos dejar el molde operativo por si se diese la oportunidad de repetir algunas pruebas con las instrumentación de medida instalada.
- No se detectaron problemas en el inserto por motivo de las temperaturas alcanzadas en el proceso, que se mostraron bastante lejanas a los límites admisibles de la resina.
- El sistema de refrigeración empleado mostró eficacia en la transferencia de calor, con un pequeño gradiente de temperatura que se observó entre la temperatura del agua de refrigeración y las temperaturas de la cavidad. Creemos que este sistema presenta la ventaja de la sencillez de generación así como una gran adaptabilidad a un amplio abanico de geometrías, aunque habría que intentar conseguir mayor homogeneidad del enfriamiento.
- Los valores de presión de inyección a los que se empezaron a detectar problemas de deformación de la resina estaban en torno a los 50 bar de presión hidráulica.
- La geometría del inserto no se adecuaba especialmente para su obtención por electroconformado quedando determinadas zonas especialmente críticas por su poco espesor de deposición. A esto se añadía que éstas estaban situadas en zonas que requerían un rectificado para lograr el plano de partición.
- Los problemas de fisuración observados se produjeron en aquellas zonas que ya habíamos previsto como críticas, no apareciendo en ningún otro punto del inserto donde existía mayor espesor de níquel, algunos de ellos en zonas donde se alcanzaban elevadas presiones de inyección.

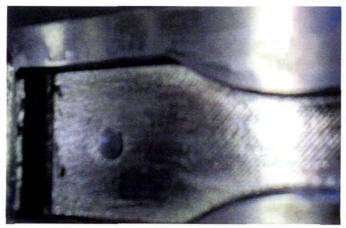


Fig. 8.26: Fisuración y escamado producido alrededor del contorno de la cavidad en la zona de

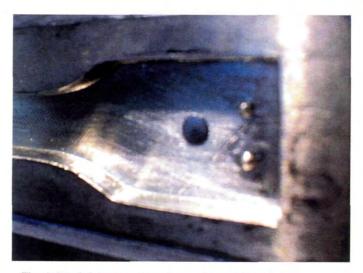


Fig. 8.27: Grietas en el contorno de cavidad en zona opuesta a la entrada.

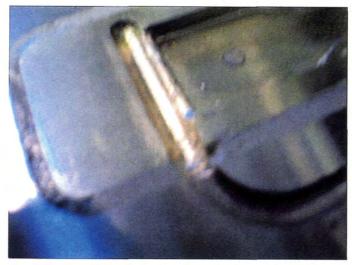


Fig. 8.29: Esquirla en la resina que rodea al inserto donde es atravesada por el canal de alimentación.

Capítulo 9 ENSAYO DE LAS PROBETAS

9 ENSAYO DE LAS PROBETAS.

9.1 Introducción.

Una gran variedad de moldes rápidos presentan como gran inconveniente que no pueden ser empleados con los materiales típicos empleados en la industria, o que estos han de ser inyectados en condiciones muy diferentes a las de producción. Como consecuencia las piezas así obtenidas no pueden ser empleadas por ejemplo, para pruebas de homologación.[46]

Uno de los objetivos principales de este trabajo de investigación es comprobar si las propiedades obtenidas en las piezas invectadas en los insertos electroconformados, son similares a las obtenidas en los moldes de acero. Con esta intención en el inserto final ensayado también se mecanizó, sobre uno de los lados de la placa, una cavidad con la forma de la probeta Tipo A. Con estas probetas se pretendía conseguir una referencia sobre la que comparar los resultados obtenidos para las del inserto electroconformado.[36]

Para cada uno de los cuatro materiales inyectados se obtuvieron unas series de piezas en las mismas condiciones de proceso. En ellas tenemos la misma cantidad de probetas obtenidas sobre inserto electroconformado y sobre cavidad mecanizada en acero. Para dos de esos materiales, en concreto para el PE y para el PC, se han obtenido además unas pequeñas series en condiciones de proceso más exigentes. Se pretendía averiguar el comportamiento el molde en éstas, así como si con unas condiciones de procesos más cercanas a las que se emplearían con moldes de producción en acero, se encontraban variaciones significativas en las propiedades del material.

En primer lugar se efectuó una medición dimensional de las probetas para observar la variabilidad de las series de cada uno de los materiales, al igual que una determinación de la masa de dichas probetas. Posteriormente se realizaron unos ensayos a tracción, para determinar la resistencia y la elongación a rotura. Los resultados obtenidos para los dos tipos de probetas se compararon entre sí, así como con los valores aportados por los fabricantes del material para evaluar el nivel de proximidad a las mismas.[47]

También se han llevado a cabo unas sencillas pruebas de fotoelasticidad que nos aportaron información adicional sobre el estado tensional resultante del proceso. Estas últimas pruebas sólo se pueden realizar sobre materiales transparentes, y únicamente el policarbonato tiene esta característica entre los materiales inyectados. Se compararon en esta prueba ambos tipos de probetas para ver si existían diferencias entre ellas.[48][50]

9.2 Medición dimensional y de masas.

La medición dimensional consistió en determinar el espesor de probeta, el ancho de la misma en zona funcional y la longitud total. La medición se realizó con dos Pie de Rey analógicos de la marca Starret. Uno modelo 125MEB con división de escala de 0.05 mm y alcance de 200 mm para medir la longitud de las probetas. El otro modelo 1201 E-150 con división de escala 0.02 mm y alcance 150 mm para medir el espesor y ancho en sección de ensayo. La determinación de la masa se realizó con balanza monoplato de precisión, marca METTLER TOLEDO modelo PR5002 Delta Range, con división de escala de 0.01 gr y alcance 5100 gr.





Fig. 9.1: Equipos de medida utilizados en estas pruebas.

De los resultados obtenidos se observó que en todos los casos las probetas obtenidas a partir del inserto electroconformado tenían un espesor superior al de las probetas obtenidas de la cavidad mecanizada. Esto fue debido a que la cavidad mecanizada se realizó con un espesor de 4.2 mm y luego se rectificó dicha superficie 0.35 mm. Mientras que la cavidad del inserto se dejó con una profundidad de 4.3 mm para tener un margen para rectificar y por los problemas descritos en apartados anteriores se rectificó lo mínimo necesario. Además debido a la desviación de paralelismo ya mencionada, quedó una pequeña variación en la profundidad de la misma, siendo de 4.15 mm en la entrada a cavidad, 4.25 mm en el centro y 4.05 mm en el final de la cavidad. Las probetas medidas en el centro y en sus extremos presentaron esa misma variación.

Un resumen de los resultados obtenidos para las series iniciales se presentan en las siguientes tablas para cada uno de los materiales. En ellas se presentan los valores máximos, mínimos y usuales o más repetidos. Las magnitudes medidas son:

- Largo total de la probeta. Valor nominal de ambas cavidades 160.0 mm.
- Ancho en la zona central. En la cavidad del inserto existe un ángulo de salida que implica un valor variable del ancho entre 9.8 y 10.2 mm. Para la otra cavidad el valor nominal es de 10.0 mm.
- Espesor en la zona central. La profundidad de cavidad en esta zona del inserto es de 4.25 mm, y en la cavidad mecanizada de 3.85 mm.

Material	Probeta	de inserto	electrocor	formado	Probeta de cavidad mecanizada			
PE	Largo	Ancho	Espesor	Masa	Largo	Ancho	Espesor	Masa
	(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(mm)	(mm)	(mm)	(gr)
máximo	157.1	10.1	4.4	8.49	157.0	10.0	4.0	7.85
usual	157.0	9.9	4.4	8.39	156.9	9.9	4.0	7.69
mínimo	156.8	9.8	4.3	8.06	156.8	9.9	3.9	7.31

Tabla 9.1: Resultados para la serie de polietileno de alta densidad.

Para este material la variabilidad dimensional ha sido relativamente baja con alguna pieza que daba los valores límites, y la gran mayoría con los valores usuales. La contracción longitudinal se ha calculado en 0.021 mm/mm, que está en los valores mínimos del rango habitual para este tipo de material entre 0.02 y 0.05 mm/mm.

Con respecto a la masa en este caso sí se encontró una variabilidad relativamente alta en comparación con los otros materiales. Dentro de la serie concreta habían dos o tres valores en torno al máximo y al mínimo. El resto se agrupaba en varios niveles entre los límites. La variabilidad para las diferentes probetas de la serie obtenidas a partir del

inserto se manifiestan de igual forma con las correspondientes a las inyectadas simultáneamente en la cavidad mecanizada.

Material	Probeta	de inserto	electrocor	formado	Probeta de cavidad mecanizada				
PS	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	
máximo	159.1	10.1	4.3	8.96	159.1	10.1	3.9	8.20	
usual	159.0	10.0	4.2	8.94	159.0	10.0	3.8	8.19	
mínimo	158.9	9.8	4.2	8.92	158.9	9.9	3.8	8.18	

Tabla 9.2: Resultados para la serie de poliestireno de alto impacto.

En este caso la variabilidad dimensional fue bastante baja, donde prácticamente en toda la serie se repetían los valores usuales. La contracción longitudinal calculada es de 0.006 mm/mm, que se encuentra en el rango habitual para este tipo de material entre 0.005 y 0.009 mm/mm. En cuanto a la masa se observa que la variabilidad también ha sido casi despreciable con una pequeña diferencia entre los valores máximos y mínimos.

Material	Probeta	de inserto	electrocor	nformado	Probeta de cavidad mecanizada			
PA6	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)
máximo	157.1	10.0	4.3	9.73	157.1	10.0	3.8	8.79
usual	156.8	9.8	4.3	9.69	156.8	9.9	3.8	8.77
Mínimo	156.6	9.7	4.2	9.67	156.7	9.9	3.8	8.75

Tabla 9.3: Resultados para la serie de poliamida 6, Nylon.

Se mantiene al igual que en los casos anteriores una variabilidad dimensional baja. La contracción longitudinal obtenida es de 0.019 mm/mm, que se encuentra por encima del rango típico de las poliamidas entre 0.01 y 0.015 mm/mm. Con respecto a la masa también existe en este caso una variabilidad baja con los valores máximos y mínimos muy próximos entre sí, y distribuyéndose la mayoría de la serie en los valores intermedios.

Material	Probeta d	de inserto	electrocor	nformado	Probeta de cavidad mecanizada			
PC	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)
máximo	159.1	10.1	4.4	11.01	159.0	10.0	4.0	10.01
usual	159.0	10.0	4.3	10.72	158.9	10.0	3.9	9.66
mínimo	158.9	9.8	4.3	10.53	158.8	9.9	3.9	9.38

Tabla 9.4: Resultados para la serie de policarbonato.

La variabilidad dimensional se mantiene también en los mismos términos que en los casos anteriores. La contracción experimentada por estas probetas es de 0.006 mm/mm, dentro del rango de 0.005 a 0.007 mm/mm característico de este polímero. La variabilidad de masa ha sido relativamente alta con unos pocos valores cercanos a los límites y el resto distribuidos de forma homogénea entre ellos. Como ya se comentó en esta serie se inyectaron un total de 32 parejas de probetas. Las 5 primeras se desecharon por detectarse en el inicio de la serie un problema de dosificación insuficiente. Las dos últimas se emplearon para las pruebas de fotoelasticidad.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, se realizaron unas pruebas al molde en condiciones más exigentes y se obtuvieron unas pequeñas series adicionales de probetas. Los materiales empleados en estas pruebas fueron PE y PC. En las siguientes tablas se presentan los resultados de la mediciones realizadas para las mismas.

Material	Probeta	de inserto	electrocor	nformado	Probeta de cavidad mecanizada				
PE	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	
máximo	157.0	10.1	4.4	8.16	157.0	10.0	4.0	7.32	
usual	156.9	9.9	4.4	8.15	156.9	9.9	4.0	7.29	
mínimo	156.8	9.8	4.3	8.13	156.8	9.9	3.9	7.27	

Tabla 9.5: Resultados para las pruebas de exigencia de polietileno.

En comparación con la serie anterior en este mismo material se observa una variabilidad dimensional similar, y una variabilidad en masa mucho menor. La diferencia para esta serie está en una velocidad de llenado más alta y una compactación similar, aunque más corta.

Con el policarbonato se hicieron diferentes pruebas pasando a unas condiciones cada vez más exigentes. En algunas se llegaron a completar series de más de 10 inyecciones, pero en otras por problemas de absorción de humedad fueron muy cortas. De entre las situaciones ensayadas se han extraído en la siguiente tabla las más relevantes, que describimos brevemente a continuación:

- Prueba A. Repetición de las mismas condiciones de serie.
- Prueba B. Introducción de una segunda etapa de llenado con velocidad al 25%.
- Prueba C. Velocidad constante al 50%.
- Prueba D. Inyección a 290°C y al 40% de velocidad de llenado.

 Prueba E. Inyección a 300°C y velocidad al 100% sólo en cavidad mecanizada.

De cada una de estas pruebas sólo se han tomado dos probetas.

Mat	erial	Probeta	de inserto	electrocor	nformado	Probe	ta de cavi	dad mecar	nizada
P	C	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Masa (gr)
A	1 2	158.8 158.9	10.0 10.0	4.3 4.3	10.57 10.58	158.8 158.8	10.0 10.0	3.9 3.9	9.51 9.51
В	1 2	158.8 158.9	10.0	4.3	10.60 10.61	158.9 158.9	10.1	3.9	9.51 9.52
C	1	158.9	10.0	4.3	10.51	158.8	10.0	3.9	9.45
D	1	158.8 158.8	10.0 10.0	4.3 4.3	10.49 10.52	158.8 158.8	10.0 10.0	3.8	9.44 9.46
	2	158.8	10.0	4.3	10.52	158.8 158.8	10.0 10.0	3.9	9.47 9.45
E	2					158.8	10.0	3.8	9.43

Tabla 9.6: Resultados para las pruebas de exigencia con policarbonato.

En comparación con los resultados de la serie de anterior, se observa que los valores están más cercanos a los valores mínimos determinados en ella. Esto parece indicar que se ha producido una mayor contracción. Los resultados de las masas determinadas también están en correspondencia con las observaciones anteriores.

9.3 Ensayos de tracción.

Estos ensayos destructivos se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 527-1 Plásticos: Determinación de las propiedades en tracción [47]. Se llevaron a cabo en dos fases. La primera en la máquina universal de ensayos marca NESTOR de capacidad máxima 10 toneladas y recorrido de 500 mm, disponible en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales del Departamento de Ingeniería Mecánica de la U.L.P.G.C.. La segunda fase se realizó en un equipo de reciente adquisición por el departamento, y ubicado en el mismo laboratorio. En concreto se trata de una prensa hidráulica de ensayos dinámicos marca Microtest, modelo EFH/5/FR, con sistema de control automatizado SCM3000, transductor extensométrico de fuerza y capacidad 5kN.

Para la primera fase, se ajustó el equipo para trabajar en la escala de 2 toneladas para estos ensayos de tracción. A estas pruebas se sometió una muestra de 2 probetas para cada una de las series y materiales comentados en el apartado anterior. Se decidió tomar como criterio común de selección las probetas números 3 y 23 para todas las series, excepto en las de Policarbonato que fueron la 8 y 28, ya que descartamos las 4 primeras por las razones ya mencionadas.

Los ensayos realizados sobre el PC, PS y PA6, se han realizado a la velocidad de 10 mm/min, recomendada por la citada norma. Las probetas de PE ensayadas a esta velocidad no se pudieron romper debido a que la gran ductilidad de este polímero superaba el recorrido máximo de la máquina de ensayo. Este material se ha tenido que ensayar a una velocidad de 100 mm/min para poder lograr la fractura de las probetas. Esta velocidad también se encuentra entre las recomendadas para este tipo de ensayos en la norma ya mencionada.

En la segunda fase se ensayaron una muestra de 6 probetas de cada uno de los tipos y materiales. De las pruebas de exigencia se escogieron 5 probetas de la serie en polietileno, y 2 probetas para las distintas condiciones ensayadas con el policarbonato. Se decidió emplear una velocidad de ensayo de 100 mm/min, debido a que el equipo empleado tenía un recorrido máximo de 200 mm. Otra razón fue la gran cantidad de probetas a ensayar, y que el objetivo era hacer una comparativa entre los resultados obtenidos para las generadas en el inserto, con los generadas en la cavidad mecanizada. Además se ensayarían todos los materiales a la misma velocidad y se podrían comparar los resultados obtenidos a diferentes velocidades de ensayo para el PS, PA6 y PC.



Fig. 9.2: Máquina universal de ensayos traccionando una probeta de polietileno, en el límite de su recorrido.



Fig. 9.3: Prensa hidráulica de ensayos dinámicos.

En la siguiente figura se presentan las gráficas del ensayo de tracción de 4 muestras representativas del comportamiento de los diferentes materiales analizados. Se observa claramente la diferencia de comportamiento entre estos cuatro tipos de plásticos.

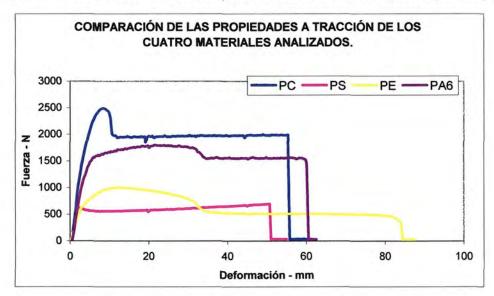


Fig. 9.4 Comparación de los ensayos de tracción para los cuatro materiales analizados.

En los siguientes apartados se presentan las propiedades de los diferentes materiales, las propias del polímero concreto o las típicas de la familia a la que pertenecen, así como los resultados obtenidos en los ensayos realizados de las dos fases ya mencionadas. En el anexo F se presentan los resultados completos de los ensayos.

9.3.1 Ensayos con el Policarbonato.

Material: PC Tarflon IV1900R de IDEMITSU.

Propiedades mecánicas de fabricante:

- Tensión máxima de rotura entre 66 y 87 MPa.
- Elongación máxima a rotura entre el 90 y 140%.

Pro	betas	Sec	ción	Fuerza	Elongac.	Tensión
	C	Ancho (mm)	Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)
Nº	Tipo					
8	C. Níquel	10.0	4.4	2550	44	57.9
0	C. Acero	10.0	4.0	2355	76	58.9
28	C. Níquel	10.0	4.4	2455	70	55.7
20	C. Acero	10.0	3.9	2305	70	59.1
5	C. Níquel	10.0	4.3	2050	42.4	47.7
3	C. Acero	10.0	3.9	2401	35.5	61.6
10	C. Níquel	10.0	4.3	2689	65.7	62.5
10	C. Acero	10.0	3.9	2343	40.7	60.1
15	C. Níquel	10.0	4.3	2679	91.8	62.3
13	C. Acero	10.0	3.9	2475	100.9	63.5
20	C. Níquel	10.0	4.3	2666	12.6	62.0
20	C. Acero	10.0	3.9	2432	14.1	62.4
25	C. Níquel	10.0	4.3	2717	86.2	63.2
25	C. Acero	10.0	3.9	2491	69.2	63.9
30	C. Níquel	10.0	4.3	2704	31.2	62.9
30	C. Acero	10.0	3.9	2466	126.6	63.2

Tabla 9.7: Resultados para la serie de PC.

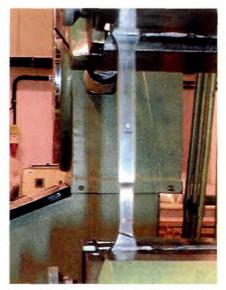


Fig. 9.6 Imágenes de la fluencia en las probetas de PC.

MATERIAL: PC

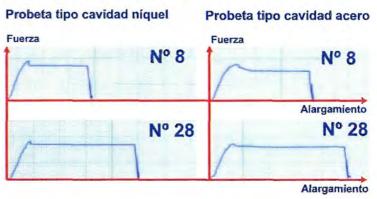
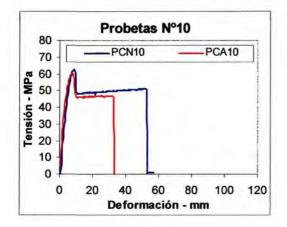


Fig. 9.5 Diagramas Fuerza-Alargamiento para las probetas ensayadas en la primera fase



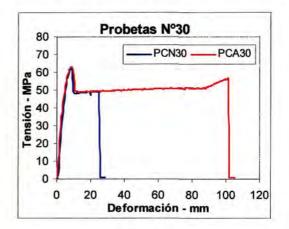


Fig. 9.7 Comparación de probetas representativas inyectadas simultáneamente.

Los valores en rojo en la tabla de resultados se deben a que el ensayo concreto de esa probeta, presentó algún problema y los resultados obtenidos han quedado distorsionados. Se observa que los valores de tensión máxima de rotura se mantienen muy parecidos para todas las probetas, sin apreciar diferencias significativas entre las obtenidas en el inserto y las de cavidad mecanizada. En cuanto a la elongación hay una variación bastante alta en el conjunto de la serie, aunque al comprobar la comparativa de las probetas inyectadas simultáneamente entre ellas existe una alta correlación.

Hay dos casos curiosos:

- Las probetas números 20 rompieron ambas de manera frágil al terminar el tramo elástico inicial.
- Las probetas números 30 son las que han presentado un comportamiento muy diferentes entre ellas.

Esto parece indicar que sean las condiciones del material inyectado las que varían de una inyección a otra. Estos resultados están un poco por debajo de los aportados por el fabricante, aunque éstos seguramente se han obtenido en unas condiciones de ensayo más rigurosas y específicas para estos materiales.

9.3.2 Ensayos con el Poliestireno.

Material: PS Styron 485 de Dow Plastic.

Propiedades mecánicas aportadas por el fabricante:

- Tensión máxima de rotura 16 MPa.
- Elongación máxima a rotura 50%.

Pro	betas	Sec	ción	Fuerza	Elongac.	Tensión
1	PS	Ancho (mm)	Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)
No	Tipo					
3	C. Níquel	10.0	4.2	588	59	14.0
3	C. Acero	10.0	3.8	490	68	12.9
23	C. Níquel	10.0	4.2	490	41	11.7
23	C. Acero	10.0	3.8	588	68	15.5
1	C. Níquel	10.0	4.2	777	75.5	18.5
	C. Acero	10.0	3.8	661	50.2	17.4
5	C. Níquel	10.0	4.2	789	81.5	18.8
3	C. Acero	10.0	3.8	693	63.4	18.2
10	C. Níquel	10.0	4.2	730	66.3	17.4
10	C. Acero	10.0	3.8	708	65.4	18.6
15	C. Níquel	10.0	4.2	755	72.8	18.0
13	C. Acero	10.0	3.8	687	59.7	18.1
20	C. Níquel	10.0	4.2	746	69.3	17.8
20	C. Acero	10.0	3.8	706	66.3	18.6
25	C. Níquel	10.0	4.2	802	78.8	19.1
25	C. Acero	10.0	3.8	722	65.9	19.0

Tabla 9.8 Resultados para la serie de PS.

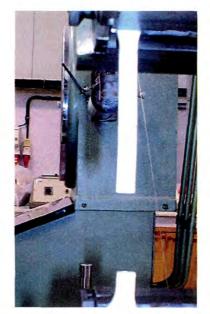
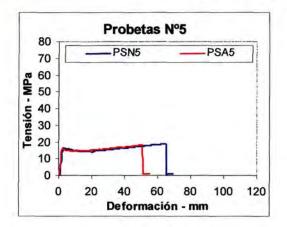


Fig. 9.9 Imágenes de la fractura de las probetas de PS.

MATERIAL: PS



Fig. 9.8 Diagramas Fuerza-Alargamiento para las probetas ensayadas de PS.



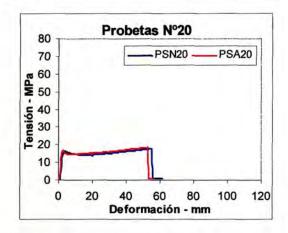


Fig. 9.10: Comparativa entre probetas representativos invectadas en el mismo.

En comparación con los valores aportados por el fabricante, obtenidos en ensayos a velocidad de 5 mm/min, se observa que están muy próximos a los medidos. Tanto la tensión de rotura como la elongación están ligeramente por encima. En este material se ha mantenido una gran homogeneidad de los resultados obtenidos para todas las probetas ensayadas.

Entre los dos tipos de probetas las tensiones de rotura se mantienen en valores muy parecidos en todos los casos, mientras que en deformación se observa una tendencia a presentar un poco más de ductilidad las probetas generadas en el inserto de níquel.

9.3.3 Ensayos con la Poliamida.

Material: PA6 Acinyl6 2700 de Ashland.

Propiedades típicas de este tipo de polímeros:

- Tensión máxima de rotura 44-83 MPa, dependiendo del contenido de humedad.
- Elongación máxima a rotura 35-70%.

Pro	betas	Sec	ción	Fuerza	Elongac.	Tensión
	A6	Ancho (mm)	Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)
Nº	Tipo					
3	C. Níquel	9.8	4.3	2060	35	48.9
•	C. Acero	9.9	3.8	1865	83	49.5
23	C. Níquel	9.8	4.3	2110	60	50.1
23	C. Acero	9.9	3.8	1865	36	49.5
1	C. Níquel	10.0	4.2	1983	22.0	47.1
	C. Acero	10.0	3.8	1752	95.2	46.6
5	C. Níquel	10.0	4.2	2040	38.2	48.4
3	C. Acero	10.0	3.8	1792	35.6	47.6
10	C. Níquel	10.0	4.2	2007	37.7	47.6
10	C. Acero	10.0	3.8	1798	80.5	47.8
15	C. Níquel	10.0	4.2	2013	49.7	47.8
13	C. Acero	10.0	3.8	1817	89.9	48.3
20	C. Níquel	10.0	4.2	1807	8.2	42.9
20	C. Acero	10.0	3.8	1799	75.1	47.8
25	C. Níquel	10.0	4.2	2042	29.4	48.5
20	C. Acero	10.0	3.8	1751	48.1	46.5

Tabla 9.9: Resultados para la serie de PA6.



Fig. 9.11: Imágenes de la fractura de las probetas de PA6.

MATERIAL: PA6

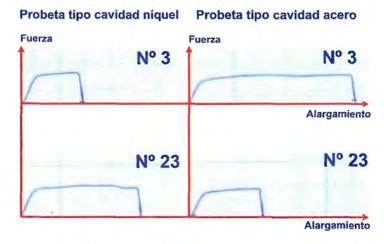
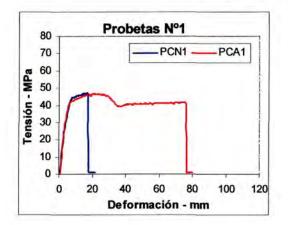


Fig. 9.12: Diagramas Fuerza-Alargamiento para las probetas ensayadas de PA6.



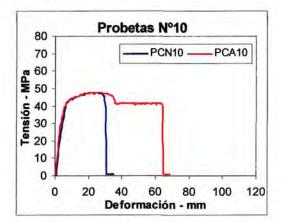


Fig. 9.13: Comparativa de probetas representativas inyectadas simultáneamente.

Los resultados en su conjunto han presentado una gran estabilidad, salvo la probeta número 20 obtenida en el inserto que produjo una rotura prematura justo al final del primer tramo elástico. En comparación con los valores habituales para este tipo de materiales se observa que están dentro de los límites aunque en los valores mínimos, debido a que ha absorbido mucha humedad.

Entre los dos tipos de probetas tampoco se observan diferencias apreciables, en lo que a tensiones máximas se refiere. En cuanto a la elongación se observa de forma muy llamativa que existe mayor ductilidad en las probetas obtenidas en la cavidad mecanizada, justo al contrario de la tendencia que presentaba el PS.

9.3.4 Ensayos con el Polietileno.

Material: PE Eraclene MP94 de Polimeri Europa.

Propiedades mecánicas para este tipo de material:

- Tensión máxima de rotura 25 MPa, dependiendo del contenido de humedad.
- Elongación máxima a rotura 625%, para velocidades de ensayo bajas.

Probetas		Sección		Fuerza	Elongac.	Tensión
PE		Ancho (mm)	Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)
Nº	Tipo	()	()	()		
3	C. Níquel	9.9	4.3	1175	81	27.6
J	C. Acero	9.9	3.9	1080	105	27.9
23	C. Níquel	9.9	4.3	1130	95	26.5
23	C. Acero	9.9	3.9	1080	119	27.9
1	C. Níquel	10.0	4.2	1176	64.6	27.0
	C. Acero	10.0	3.8	1075	116.4	27.2
5	C. Níquel	10.0	4.2	1175	65.7	27.0
J	C. Acero	10.0	3.8	1074	104.8	27.1
10	C. Níquel	10.0	4.2	1184	72.1	27.2
10	C. Acero	10.0	3.8	1075	98.6	27.2
15	C. Níquel	10.0	4.2	1118	85.6	25.7
13	C. Acero	10.0	3.8	1006	136.0	25.4
20	C. Níquel	10.0	4.2	1138	78.7	26.1
	C. Acero	10.0	3.8	1011	95.5	25.5
25	C. Níquel	10.0	4.2	1109	91.2	25.5
25	C. Acero	10.0	3.8	1002	104.9	25.3

Fig. 9.10: Resultados para la serie de PE.



Fig. 9.15: Fluencia en una probeta de PE.

MATERIAL: PE

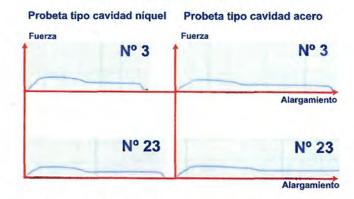
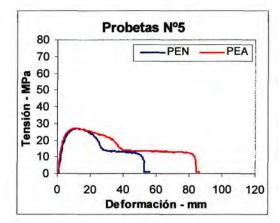


Fig. 9.14: Diagramas Fuerza-Alargamiento para las probetas ensayadas de PE.



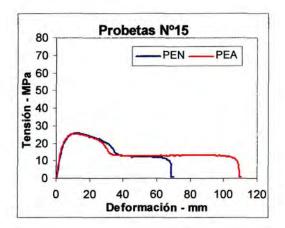


Fig. 9.16: Comparativa de probetas representativas inyectadas a la vez.

Para este material se observa una variabilidad mínima en la tensión máxima a rotura, y ligeramente por encima de la referencia encontrada de valores habituales para este tipo de polímeros. La elongación obtenida es relativamente baja para este material ya que hemos ensayado a velocidad alta de 100 mm/min, cuando lo habitual sería hacerlo a 5 mm/min.

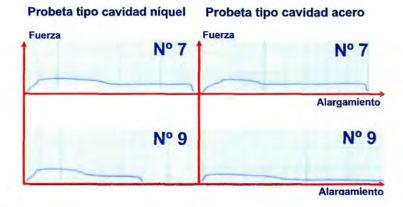
Entre los dos tipos de probetas no se observan diferencias claras en cuanto a tensiones máximas, y en cuanto a deformación se muestra una tendencia a presentar mayor ductilidad las probetas obtenidas en la cavidad mecanizada.

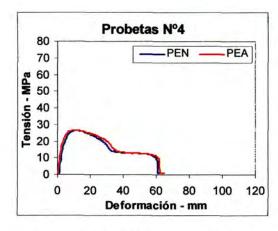
9.3.5 Ensayos pruebas de exigencia.

Los resultados obtenidos para las pruebas con PE se presenta a continuación.

Probetas		Sección		Fuerza	Elongac.	Tensión
N° F	PE № Tipo		Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)
7	C. Níquel	9.9	4.3	1130	101	26.5
	C. Acero	9.9	3.9	1080	101	27.9
9	C. Níquel	9.9	4.3	1175	74	27.6
9	C. Acero	9.9	3.9	980	200	25.4
2	C. Níquel	10.0	4.3	1185	65.8	27.2
	C. Acero	10.0	3.9	1032	66.4	26.1
4	C. Níquel	10.0	4.2	1153	75.9	26.5
	C. Acero	10.0	3.8	1057	77.7	26.7
6	C. Níquel	9.9	4.3	1200	69.7	27.6
O	C. Acero	10.0	4.0	938	169.2	23.7
8	C. Níquel	10.0	4.2	1148	75.8	26.4
0	C. Acero	10.0	3.8	1062	83.3	26.8
10	C. Níquel	10.0	4.4	1155	61.6	26.5
10	C. Acero	9.9	3.9	1055	93.9	26.6

MATERIAL: PEHD





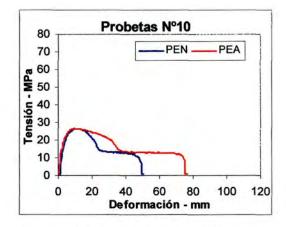


Fig. 9.17: Resultados, Diagramas Fuerza-Alargamiento y Tensión deformación para probetas de PE en condiciones de exigencia.

Para esta serie de probetas de PE obtenidas en condiciones de exigencia no se observan diferencias apreciables con los valores obtenidos en las condiciones de serie.

Los resultados obtenidos para las pruebas con el PC en las diferentes condiciones mencionadas en apartados anteriores se presentan a continuación.

Probetas		Sección		Fuerza	Elongac.	Tensión	
PC		Ancho (mm)	Espesor (mm)	máxima (N)	Máxima (%)	máxima (MPa)	
1	Nº Tipo		(,	()			
A	1	C. Níquel	10.0	4.3	2651	82.2	61.7
		C. Acero	10.0	3.9	2456	69.5	63.0
	2	C. Níquel	10.0	4.3	2682	138.1	62.4
	_	C. Acero	10.0	3.9	2445	67.4	62.7
	1	C. Níquel	10.0	4.3	2701	60.3	62.8
		C. Acero	10.1	3.9	2433	123.3	61.8
B	2	C. Níquel	10.0	4.3	2664	70.9	62.0
	_	C. Acero	10.0	3.8	2440	124.7	64.2
	1	C. Níquel	10.0	4.3	2695	32.6	62.7
		C. Acero	10.0	3.9	2421	95.4	62.1
C	2	C. Níquel	10.0	4.3	2718	125.1	63.2
		C. Acero	10.0	3.8	2402	51.1	63.2
	1	C. Níquel	10.0	4.3	2709	103.3	63.0
		C. Acero	10.0	3.9	2378	62.2	61.0
D	2	C. Níquel	10.0	4.3	2699	136.4	62.8
		C. Acero	10.0	3.9	2435	54.6	62.4
	1	C. Níquel					
-3		C. Acero	10.0	3.9	1850	6.5	47.4
E	2	C. Níquel					
	_	C. Acero	10.0	3.8	1103	3.7	28.3

Tabla 9.11: Resultados para la probetas de PC en condiciones de exigencia.

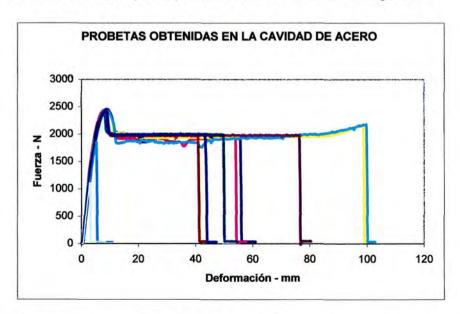


Fig. 9.18: Representación conjunta de todas las probetas obtenidas en la cavidad mecanizada.

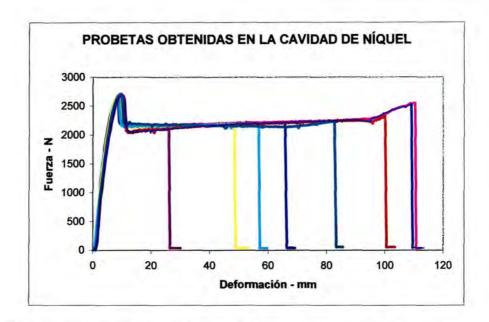


Fig. 9.19: Representación conjunta de todas las probetas generadas en el inserto.

Los resultados obtenidos en estas probetas presentan también una variabilidad en deformaciones muy alta, igual que ocurría en la serie del mismo material ya analizada. En cuanto a tensiones máximas se mantienen en los mismos valores para los casos A,B,C y D, mientras que en el caso E se produjo, en las dos probetas ensayadas, una rotura frágil en la zona intermedia el primer tramo elástico. Ello es debido a que presentaba visibles defectos por ráfagas de humedad y muchas burbujas de aire en su interior debido a la alta velocidad de llenado. Por estos motivos creemos que también se producen muchas irregularidades en el tramo de deformación a carga constante.

9.3.6 Conclusión general.

Como conclusión general a estas pruebas destructivas se observa que no se aprecian diferencias significativas entre el comportamiento de las probetas obtenidas en el inserto, de las probetas obtenidas en la cavidad mecanizada. Los valores medidos se encuentran razonablemente en el entorno de los valores característicos de estos materiales, teniendo en cuenta que estas referencias se han obtenido en unas condiciones de ensayo más estrictas que las empleadas en este trabajo de investigación.

Para algunos de los materiales ensayados, sí que se observan algunas diferencias en ductilidad entre las probetas obtenidas en el inserto de las generas en la cavidad mecanizada. Estas diferencias se deben probablemente a la la fase de enfriamiento de las probetas, debido a que las propiedades de transferencia de calor entre ambas cavidades son bastante diferentes.

9.4 Pruebas de Fotoelasticidad.

La fotoelasticidad permite visualizar directamente el estado de tensiones o deformaciones en que se encuentra la pieza analizada. Se basa en el estudio de los fenómenos experimentados por las ondas electromagnéticas a su paso por materiales transparentes. Estos fenómenos son de gran complejidad, por lo que muchas de las aplicaciones se limitan al análisis experimental de tensiones desde el punto de vista cualitativo. El dominio de actuación de la fotoelasticidad abarca todo tipo de problemas mecánicos: tridimensionales, en régimen estático o dinámico y en materiales plásticos, viscoelásticos, heterogéneos, anisótropos, etc.



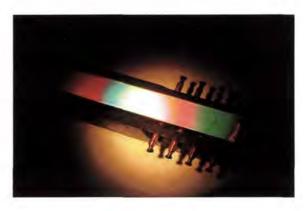


Fig. 9.20: Equipo y resultado de una prueba de fotoelasticidad.

Estas pruebas que se practicaron sobre las probetas de policarbonato fueron realizadas en estático sin someter a las mismas a ningún tipo de esfuerzo. El estado de tensiones observados en estos análisis corresponde a la sumatoria de tensiones introducidas por los muchos factores que se presentan en el proceso de inyección de termoplásticos.

El equipo de foloelasticidad empleado es muy sencillo y consiste en una fuente de luz blanca y un juego de dos láminas polarizadoras de cuarto de onda.

Para los dos tipos de probetas que se comparan entre sí, las diferencias de los niveles de tensiones en ellas pueden deberse a:

 Condiciones de proceso diferentes tanto en la fase de llenado de la cavidad, como principalmente en la compactación.

- Tiempos de enfriamiento diferentes, que provocaran tiempos de ciclo diferentes.
- Diferencia en el trazado de los canales de refrigeración.
- Diferentes propiedades de transferencia de calor.

Todos estos factores contribuyen a introducir contracciones por enfriamiento diferencial al igual que cambios en la orientación molecular, que son los causantes de tensiones internas a lo largo de las piezas. Éstas provocan posteriormente deformaciones post-moldeo en las piezas inyectadas e incluso la aparición de grietas.

Para nuestro caso concreto, de los factores antes mencionados, los tres primeros se pueden considerar idénticos para los dos tipos de probetas analizadas. Éstas se inyectan simultáneamente y en las mismas condiciones; tanto de llenado, de compactación y de enfriamiento.

En la siguiente imagen se presenta el estado de tensiones internos que se alcanza en una probeta obtenida en el inserto de níquel. Los diferentes cambios cromáticos y su acumulación, indican un nivel cada vez mayor de tensiones. En ella se observa una distribución casi simétrica entre la entrada de plástico y el final de la cavidad. La presión de compactación ejerce un efecto predominante sobre las tensiones residuales, aunque también influyen la temperatura y velocidad de inyección, y el enfriamiento.



Fig. 9.21: Estado tensional de una probeta obtenida en el inserto electroconformado.

En la siguiente imagen se observan los niveles de tensiones alcanzados por dos probetas de diferente tipo inyectadas a la vez. En el caso de la probeta obtenida de la cavidad mecanizada, situada en la parte inferior de la imagen, existe una importante asimetría en los niveles de tensiones internas alcanzado. Se ve claramente una gama cromática más intensa en la zona de entrada a cavidad, que en el final de la misma donde predominan colores oscuros en una amplia zona. Esta diferencia es característica

y producida por un diferente nivel de compactación, que es más alto y genera mayores tensiones internas en el lado de entrada a cavidad que en el final de ella.

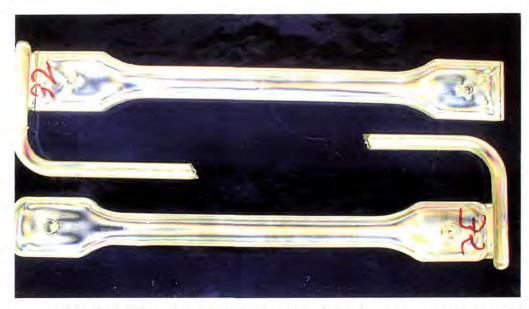


Fig. 9.22: Comparación entre los dos tipos de probetas orientadas en la misma posición relativa a como fueron inyectadas de manera simultánea.

Mientras, en la probeta obtenida en el inserto se observa que existe una distribución de tensiones casi simétrica entre las zonas de entrada y final de cavidad. El nivel de tensiones es más parecido al del final de la cavidad mecanizada. Esto muestra claramente una diferencia de comportamiento entre las dos cavidades. Éste podría deberse a que el nivel de compactación que se alcanza en la cavidad de acero tendría que ser más alto que el alcanzado en la cavidad de níquel. El inserto tiene una rigidez mucho menor y se deforma al ceder la resina durante la compactación.

En la siguiente fotografía se muestran las mismas dos piezas anteriores con una diferente orientación. En este caso se observa de forma adicional una diferencia importante en la zona central de ambas probetas. En la probeta superior obtenida a partir del inserto se manifiesta una mayor gama cromática, mientras que en la inferior es mucho más homogénea. Esta diferencia significativa entre ambas la atribuimos a las características de transferencia de calor de ambas cavidades. En la probeta mecanizada éste se difunde a través de una gran masa de acero hasta llegar a los tubos de cobre. Mientras en la cavidad del inserto de níquel una mínima parte del calor se transmite hacia el acero en contacto con la cáscara, y hacia la resina que rellena la misma. El calor principalmente se disipa a través de la delgada capa de níquel desde los extremos de la

probeta hacia el centro de la misma, donde a través de la pletina de cobre es conducido hasta los tubos de refrigeración.

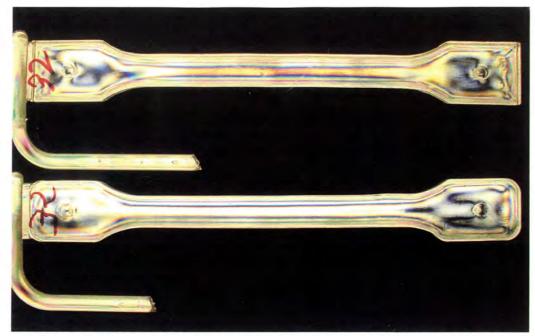


Fig. 9.23: Estado tensional de las mismas probetas anteriores orientadas de distinta forma.

Como conclusión de este análisis de fotoelasticidad se demuestra un comportamiento diferente entre ambas probetas debido a diferencias en la transferencia de calor y rigidez de las respectivas cavidades del molde.

Capítulo 10

APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA TECNOLOGÍA DESARROLLADA

10 APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA TECNOLOGÍA DESARROLLADA.

10.1 Introducción.

En este capítulo se realiza en sencillo análisis comparativo entre la tecnología analizada en el presente trabajo de investigación, con otros procedimientos tradicionales de fabricación de moldes prototipos. Uno de los aspectos mas importantes, y tal vez mas complejos, a la hora de decidir si un procedimiento con las características del estudiado es aplicable o no en un caso concreto, es saber por un lado si es viable técnicamente y por otro lado si es viable económicamente en relación a otros procedimientos.

En la figura se observa una gráfica comparativa entre diferentes técnicas de elaboración de moldes prototipos, en términos de coste y tiempo de fabricación. En ella se observa que el proceso de electroconformado presenta una diferencia en costos muy considerable con los procesos de mecanizado, tomados como referencia. En términos de plazos de tiempo se observa que se encuentra en una situación intermedia. En los siguientes apartados haremos un análisis específico de la técnica desarrollada.[51]

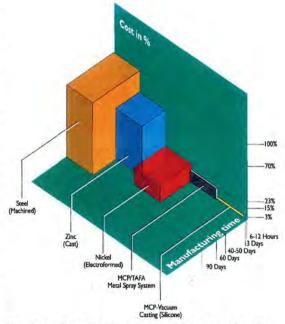


Fig. 10.1: Gráfica comparativa entre procesos de elaboración de moldes rápidos.

10.2 Propuesta de criterios de decisión.

La dificultad de proponer una metodología que permita tomar decisiones de una manera mas o menos sencilla estriba principalmente, en la gran cantidad de variables que se manejan en un molde de inyección, y la gran cantidad de variantes que existen en la fabricación de un molde prototipo en particular y de un molde de producción en general. Todo ello lleva a tener que particularizar en casos concretos para obtener resultados mas o menos fiables.

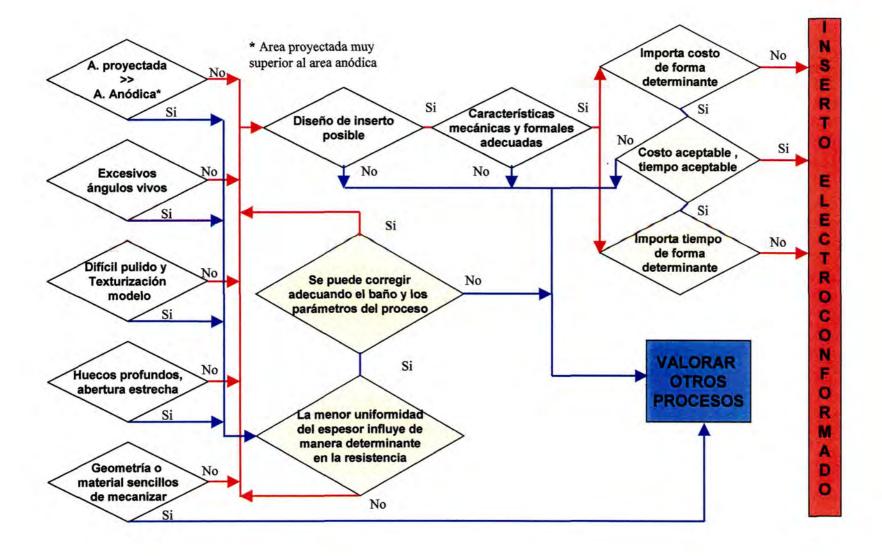
Dado el contexto del presente estudio, parece razonable tomar la tecnología del electroconformado como referencia o punto de partida del flujograma de toma de decisiones que se presentará a continuación. También parece razonable comparar dicho procedimiento con uno de los mas utilizados no solo en moldes prototipo, principalmente de aluminio, sino también en moldes de producción. No hay que olvidar que el método propuesto está en la frontera entre moldes prototipo y moldes de producción. Dicho procedimiento con el que se efectuará la comparación será el de mecanizado en todas sus variantes.

Por otro lado, aunque la metodología de decisión técnica y económica se puede plantear en términos algo mas generales, se ha preferido simplificar la aplicación a un molde de inyección tipo, por ejemplo con las siguientes características:

- Molde de cinco placas con sistema de expulsión
- Molde formado por placas estándar
- Alimentación mediante canales fríos
- Geometrías que no requieren correderas, noyos, etc.
- La empresa en cuestión tiene acceso a todas las tecnologías implicadas en la fabricación por mecanizado y en la fabricación por electroconformado a partir de prototipado rápido.
- Se supone que no existen otras alternativas disponibles, como por ejemplo los moldes sinterizados a partir de la tecnología SLS, 3D Keltool, EOS, etc.
- Se cuenta con personal especializado en ambas conformaciones.

Una vez que las decisiones técnicas indican la viabilidad o no de un método se pasaría a la valoración económica, a tiempo de entrega o a costo de producción, que aparecen indicadas en el siguiente apartado.





En cualquier caso la metodología planteada es tan solo una guía básica de decisión pero que sin duda alguna el sentido común y las circunstancias específicas del momento son las que indicarán que camino seguir.

En el flujograma de toma de decisiones aparecen una serie de preguntas básicas, a las que se podrían añadir algunas otras, pero se ha preferido plantear solo las más relevantes, que se refieren a aspectos técnicos del electroconformado y a aspectos económicos. Las cuestiones técnicas del electroconformado requiere un conocimiento previo de la problemática propia del proceso, que va desde la generación del modelo hasta la fabricación del inserto, pasando por la producción de la cáscara de Níquel. Conviene por ello tener claros todos los aspectos que intervienen para no tomar decisiones erróneas; para ello se pueden recordar algunos de los planteados en los capítulos anteriores.

10.3 Estudio económico.

Éste es un análisis comparativo entre moldes tipo fabricados por métodos convencionales y moldes fabricados mediante electroconformado a partir de prototipado rápido. Al igual que con el diseño de los criterios para toma de decisiones, para hacer el estudio económico se parte de un molde tipo de 5 placas y compuesto por elementos normalizados en los dos casos objeto de estudio. Se comenzará estableciendo los parámetros a tener en cuenta para calcular el coste de cada uno de los métodos de producción, haciendo la salvedad que evidentemente cualquier variante significativa en el proceso puede provocar desviaciones importantes en uno u otro caso; se trata pues de un orientación que ayude a la toma de decisiones. Ésta es una valoración aproximada de los costes internos de producción de la empresa, y no de los precios de mercado por estos servicios.

10.3.1 Estudio del coste de fabricación por métodos convencionales.

Los procesos considerados en el estudio son los siguientes:

 Mecanizados por arranque de viruta en máquinas herramientas convencionales y principalmente CNC. Entre las CNC destacan los centros de mecanizado de baja y alta velocidad.

- Mecanizados por arranque de partículas:
 - o Electroerosión por penetración.
 - Electroerosión por hilo.
 - o Rectificado de precisión con muela abrasiva.
 - Pulido de acabado de cavidades.
- Operaciones manuales de ajuste.

Hay que indicar que un molde puede participar total o parcialmente de los anteriores procedimientos de fabricación según sea el caso, se tendrán en cuenta todos los procesos que se anularán según se utilicen o no. Por otro lado, también se tendrán en cuenta la fabricación de los electrodos necesarios para la electroerosión por penetración si fuesen necesarios: mecanizado, electroerosión por hilo, etc..

Las variables utilizadas para evaluar el coste de fabricación del molde son las relacionadas directamente con éste, es decir no se contemplan los gastos indirectos como pueden ser los gastos de gestión, administración, transporte, consumibles generales de producción, etc., que en cualquier caso se podrían añadir en forma de porcentaje genérico. En los costos horarios se contemplan los costos de máquina, principalmente amortización, y de operario. Las variables son las siguientes:

- TD: Tiempo de diseño del molde
- CD: Costo horario del diseño del molde
- CMN: Coste de los elementos normalizados, placas, casquillos, guías, bebederos, tornillos, etc.
- CMB: Costo de material en bruto adicional: placas y elementos no normalizados (se incluye el material en bruto de los electrodos si fuesen necesarios).
- TCMCNC: Tiempo de centro de mecanizado CNC (productivos y no productivos). Dado que los mecanizados en estas máquinas, de baja o alta velocidad son bastante frecuentes, se define aparte ésta variable. También se incluyen los mecanizados en tornos CNC de piezas sueltas o postizos de revolución.
- CCMCNC: Costo horario de centro de mecanizado CNC.
- **TMA:** Tiempo de mecanizado de postizos y auxiliares. En este apartado se incluyen mecanizados en máquinas herramienta convencionales, rectificados de los planos de partición, etc.
- CMA: Costo horario de mecanizados auxiliares.

- TEDM: Tiempo de mecanizado de electroerosión por penetración de cavidades en el molde.
- CEDM: Costo horario de electroerosión por penetración.
- TFEDM: Tiempo de fabricación del electrodo de penetración. Salvo que sea una geometría mas o menos normalizada se hace necesario fabricar dicho electrodo por diferentes procedimientos, como pudiera ser por mecanizado o mediante electroerosión por hilo.
- **CFEDM:** Costo horario de fabricación de electrodo de electroerosión.
- TMR: Tiempo de mecanizado de refrigeración. Dado que representa un mecanizado específico y a veces complejo dependiendo de su diseño se le dedica un apartado aparte. Además una de las diferencias con los moldes electroconformados propuestos es precisamente la refrigeración.
- CMR: Costo horario de mecanizado de refrigeración, bien en máquina convencional o en máquina CNC, según la dificultad.
- TA: Tiempo de acabado superficial, texturizados, ajuste final. Labores que pueden ser en máquinas o manualmente en las superficies que la requieran. También se incluyen las labores de ajuste final para que el montaje de los diferentes elementos tengan la precisión deseada (montajes en prensa, tintes de ajuste, etc).
- CA: Costo horario de acabado.
- CUTI: Parte proporcional de costo de útiles y herramientas especiales. Dada la importancia que en determinados casos pudiera tener la utilización de herramientas especiales y de útiles de amarre también especiales parece interesante dedicarle un apartado especial. No obstante, no es fácil segregar de su costo el grado de utilización para un mecanizado específico.

Con estas variables definidas se puede calcular el tiempo de producción de un molde tipo. Éste sería un tiempo máximo en términos de tiempo de empresa, dado que se considera una completa secuencialidad en las operaciones. Esto no es del todo cierto ya que diferentes elementos del molde se pueden estar mecanizando al mismo tiempo, en diferentes máquinas y por diferentes operarios. No obstante se plantea como una referencia máxima a efectos de calcular plazos de entrega límites, y se calcularía de la siguiente forma:

Tiempo de fabricación de molde sin simultaneidad (TFM) = TD + TCMCNC + TMA + TEDM + TFEDM + TMR + TA

El costo de fabricación del molde, (costos directos) será el siguiente:

Costo de fabricación del molde (CFM) = (TD x CD) + CMN + CMB + (TCMCNC x CCMCNC) + (TMA x CMA) + (TEDM x CEDM) + (TFEDM x CFEDM) + (TMR x CMR) + (TA x CA) + CUTIL

El valor del costo horario CCMCNC puede variar ya que el trabajo se puede realizar en máquina de bajo costo de amortización, como una convencional CNC, o en una de mayor costo de amortización como puede ser una de alta velocidad.

10.3.2 Costo de fabricación mediante electroconformado a partir de prototipado rápido.

Los procedimientos de fabricación principalmente considerados son los siguientes:

- Fabricación de modelo mediante prototipado rápido
- Operaciones de acabado de modelos (sellado, lijado)
- Mecanizado por arranque de viruta en máquinas herramienta CNC o en máquinas herramienta convencionales de los componentes porta-insertos. Dado que la geometría compleja se resuelve en buena parte mediante el electrocoformado, la importancia de la maquinaria CNC pasa a tener menor importancia.
- Fabricación de cáscara de Niquel mediante electroconformado.
- Mecanizado por arranque de partículas por abrasión (rectificadora) para rectificado de planos de partición.
- Operaciones manuales de preparación y relleno de la cáscara.
- Operaciones de ajuste final.

Las variables contempladas son las siguientes:

- TD : Tiempo de diseño del molde
- CD: Costo horario de diseño de molde
- CMRP: Costo de material de prototipado rápido. Dado el elevado costo que suelen tener este tipo de materiales en las máquinas de prototipado rápido es conveniente separar su costo del resto.
- TRP: Tiempo de fabricación de modelo mediante RP.

- CRP: Costo horario de máquina de RP. Este costo es prácticamente de máquina ya que son máquinas que suelen tener una gran autonomía y la presencia del operario es mínima; esto compensa el alto tiempo de fabricación de algunas tecnologías como la FDM objeto del presente trabajo.
- TARP: Los modelos una vez fabricados requieren de un acabado posterior en función de la calidad de superficie deseada en la cavidad del molde.
 También se incluye su preparación para el electroconformado, como la aplicación de la pintura conductora.
- CARP: Costo horario de acabado y adecuación de modelos.
- TEF: Tiempo de fabricación de cáscara de Níquel por electroconformado
- CEF: Costo horario de electroconformado. El elevado tiempo, según el espesor de cáscara deseado, se compensa con una nula de presencia de operario durante la mayor parte del proceso.
- CMN: Costo de elementos normalizados.
- CMB: Material en bruto, principalmente resinas, tubos de cobre, aletas, etc
- TMA: Tiempo de mecanizado auxiliar en máquinas CNC y convencionales, principalmente ranuras, taladros, cajeras y rectificados para adecuar las placas normalizadas a las cáscaras de Níquel. La menor complejidad de los mecanizados no hace imprescindible las máquinas CNC, podría bastar por ejemplo una fresadora con visualizador de cotas.
- CMA: Costo de mecanizado en máquinas CNC y convencionales.
- TFI: Tiempo de fabricación del inserto. Incluye la adecuación de la cáscara en la placa seleccionada y previamente mecanizada para su correcta recepción. También incluye la preparación de los conductos de refrigeración (tubos o aletas de cobre), la mezcla y vertido de la resina. Todas las operaciones son manuales, excepto el planeado de la resina de la cara posterior que es en máquina.
- CFI: Costo horario de fabricación de inserto.
- TA: Tiempo de ajuste final. La diferencia principal puede estar en la menor necesidad de texturizados superficiales de la cavidad ya que se podría conseguir directamente sobre el prototipo.
- CA: Costo horario de ajuste final.
- CUTIL: Parte proporcional de herramientas y útiles especiales. De menor importancia que en el caso de moldes mecanizados convencionalmente, pero si puede hacerse necesario algún útil sencillo para facilitar la fabricación de la cáscara (barreras, útiles de amarre de modelo).

El tiempo de fabricación del molde, suponiendo una total secuencialidad en las operaciones es el siguiente:

Tiempo de fabricación del molde (TFM) : TRP + TARP + TEF + TMA + TFI + TA

El costo de fabricación del molde:

Costo de fabricación del molde (CFM) : CMRP + (TRP x CRP) + (TARP x CARP) + (TEF x CEF) + CMN + CMB + (TMA x CMA) + (TFI x CFI) + (TA x CA) + CUTIL

10.4 Aplicación práctica de la metodología propuesta.

Como ejemplo de aplicación se muestra a continuación el caso de la fabricación de un molde de dos cavidades para obtener la tortuga que aparece en la figura. Ésta muestra una cáscara electroconformada por el lado de la cavidad de la parte fija del molde. El estudio se centrará tan solo en lo que diferenciaría a un molde estándar de uno electroconformado, es decir, en las placas de cavidad.



Fig. 10.2: Cáscara electroconformada correspondiente al semimolde fijo.

Además se supone que la dureza requerida por el molde está por encima de los 50 RC lo que obliga a mecanizar aceros de alta dureza o a realizar tratamientos térmicos posteriores lo cual podría ocasionar deformaciones en el mismo.

Observando la geometría nos encontramos con un caso donde la mecanización de cada una de las partes de las placas de cavidad no es precisamente sencillo al haber

superficies no normales a la herramienta y con curvaturas y encuentros que obligan a utilizar herramientas de pequeño diámetro y con imposibilidad, sobre todo en la cavidad saliente, de mecanizar determinados encuentros. Esta circunstancia obligaría a acabados posteriores para poder concluir la geometría y el acabado superficial.

Se centrará el estudio en la placa de cavidad del lado fijo del molde, la que llevaría el inserto con la cáscara de la figura anterior. El estudio para la otra placa es similar aunque su mecanizado es mas complejo. Para el diseño de la geometría a fabricar se toma como punto de partida por ejemplo un fichero gráfico generado en aplicaciones CAD. Se recuerda que el análisis corresponde con costos internos de fabricación de una empresa que disponga de las dos tecnologías, y no de los precios de mercado por estos servicios.

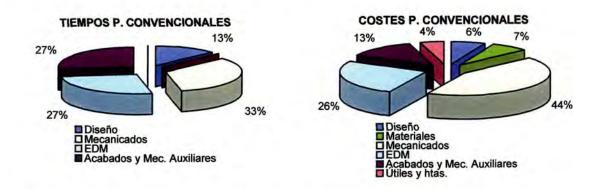
10.4.1 Opción de placa mecanizada.

Materiales (Euros)	Tiempos (horas)	Costos horarios (Euros/hora/	Costo parcial (Euros)
	TD= 6	CD= 15	TDxCD= 90
CMN= 70			70
CMB= 30			30
	TCMCNC= 12	CCMCNC= 45	TCMCNCxCCMCNC= 540
	TMA= 3	CMA= 18	TMAxCMA= 54
	TFEDM= 9	CFEDM= 36	TFEDMxCFEDM= 324
	TFEDM= 3	CFEDM= 10	TFEDMxCFEDM= 30
	TMR= 8	CMR= 18	TMRxCMR= 144
	TA= 4	CA= 15	TAxCA= 60
CUTI= 60			60
	45 hr		1402 Euros

Se considera un mecanizado de desbaste en centro de mecanizado CNC y posteriormente electroerosión para acabado. En la electroerosión se ha supuesto que la presencia de un operario durante el mecanizado es pequeña dado el bajo nivel de riesgo que representa esta operación. Sin embargo en los mecanizados en máquinas herramienta CNC y convencional, dado que se trataría de piezas únicas y no de una serie, los riesgos son mayores; rotura de herramienta, colisiones imprevistas, amarre defectuoso, etc., por lo que se estima necesaria su presencia, con lo que se incrementa el costo horario al de la máquina. La amortización de todas las máquinas se realiza a razón de 5 años y 8 horas diarias de trabajo. Se ha supuesto que la hora de mecanizado

en máquina CNC del electrodo es inferior a la del molde al utilizarse un equipo de menor tamaño y potencia de corte.

En las siguientes gráficas se representan en términos relativos los diferentes conceptos, tanto para el tiempo como los costes de fabricación.



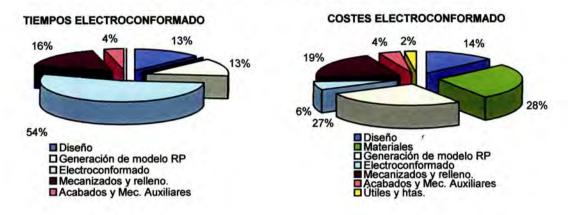
10.4.2 Opción de inserto con placa electroconformada.

Materiales (Euros)	Tiempos (horas)	Costos horarios (Euros/hora)	Costo parcial (Euros)
	TD= 10	CD= 15	TDxCD= 150
CMRP= 120			120
	TRP= 18 TRP _{efectiva} = 6	CRP= 10	TRPxCRP= 180
	TARP= 6	CARP= 15	TARPxCARP= 90
	TEF= 120 TEF _{efectiva} = 40	CEF= 0.6	TEFxCEF= 72
CMN= 130			130
CMB=50			50
	TMA= 8	CMA= 18	TMAxCMA= 144
	TFI= 4	CFI= 15	TFIxCFI= 60
	TA= 1	CA= 15	TAxCA= 15
CUTIL= 25			25
	168 hr 75 hr		1036 EUROS

Se considera equipo FDM para prototipado rápido con una inversión inicial de 150.000 Euros, amortizada en cinco años y trabajando 24 horas día. El equipo de electroconformado supone una inversión de alrededor de 6000 euros, con reposición de productos químicos cada dos años con un coste de 1500 euros. Dada la sencillez de los mecanizados se considera fresadora convencional con visualizador de cotas. Existe una placa adicional para realizar el "sándwich" con el inserto y la resina. Los tiempos requeridos para la generación de los modelos y para la obtención de la cáscara, son considerando 24 horas de funcionamiento al día. Para hacer una comparación más real con el supuesto anterior, se ha estimado un tiempo efectivo considerando un tercio del

mismo correspondiente a jornadas de trabajo de 8 horas día, que suele ser lo más habitual en este tipo de empresas.

En las siguientes gráficas se realiza una representación porcentual de los diferentes conceptos, tanto en tiempos como en costes de fabricación.



10.4.3 Conclusiones.

Como conclusión de este ejemplo decir que las razones principales que llevan a un menor coste en el método de electroconformado son las siguientes:

- Geometría con una cierta complejidad y con zonas que implican dificultad con el mecanizado directo incluso con el mecanizado de un electrodo para electroerosión.
- Los acabados sobre acero o cobre son más laboriosos, debido a esa complejidad geométrica.
- La exigencia de una dureza elevada, por encima de 500 HV, obliga a realizar mecanizados más lentos incluso para la refrigeración, y a utilizar herramientas de coste mayor. En el caso de que se realice tratamiento térmico o de recubrimiento habría que añadir su coste y el riesgo de deformaciones.
- La geometría mostrada es ideal para electroconformado, obteniendo incluso una uniformidad de espesor en la cáscara más que aceptable.
- Los equipos de RP y de electroconformado son totalmente autónomos y no requiere operario durante los largos períodos de trabajo.
- El elevado costo de adquisición del equipo de RP se compensa, con una amortización suponiendo 24 horas de trabajo diarias, en la determinación de su coste horario. Lógicamente si el centro de mecanizado se utilizara

- también 24 horas su costo horario disminuiría, pero no es lo más habitual en este tipo de empresas.
- El equipo de electroconformado tiene un costo horario bajo, no solo por su baja inversión inicial sino porque también es un equipo de 24 horas de funcionamiento al día y sin presencia de operario.
- En el supuesto de eliminar la electroerosión como segunda fase de acabado de la cavidad mecanizada, por ejemplo utilizando un centro de mecanizado de alta velocidad combinado con un mejor acabado, se equilibrarían los costes de estas dos técnicas, a pesar de que los costes de CMCNC aumentan. En definitiva la electroerosión es la que encarecería la solución completamente mecanizada.

Otras consideraciones importantes a tener en cuenta son las siguientes:

- Los costes de obtención del modelo, materiales y generación, están en torno al 50%. No hay que olvidar que para la fabricación de un modelo no es necesario disponer de una máquina de RP, podría hacerse incluso conformado de manera artesanal. Esto puede suponer una reducción de costes muy considerable.
- Si el rectificador del equipo de electroconformado tiene capacidad suficiente, se podrían realizar varias cáscaras de forma simultánea. Esto también supondría una gran ventaja sobre todo en moldes multicavidad.

Como se ha comprobado en este análisis, la técnica desarrollada tiene un campo de aplicación en el que puede ser muy competitiva, en comparación con otras técnicas de fabricación de moldes rápidos, o procesos convencionales de fabricación de moldes de producción.

Capítulo 11

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

"Alumbra el día de mañana con el de hoy."

Elizabeth Barret Browning (1806-1861)

11 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

11.1 Conclusiones.

En torno a las técnicas de herramientas rápidas existen una serie de secretos celosamente guardados por las empresas que los desarrollan, debido a que representan una ventaja técnica muy valiosa frente a sus competidoras. La información existente sobre el electroconformado aplicado al campo de los moldes rápidos es bastante limitada y diseminada, aunque se sabe de su aplicación en determinadas aplicaciones. El presente estudio ha tratado sobre una tecnología antigua empleada en una aplicación novedosa con un gran potencial, de la que se ha creído interesante profundizar en el conocimiento de sus capacidades y limitaciones. Las principales conclusiones extraídas de este trabajo de investigación son las siguientes:

 Se ha adquirido una experiencia importante y unos conocimientos avanzados sobre la aplicación de la técnica de electroconformado a las herramientas rápidas.

- Se ha conocido la problemática asociada al empleo de esta tecnología de la que se tenía una escasa información y que permite centrar el campo de aplicación de la misma.
- El diseño geométrico de la cáscara electroconformada es de vital importancia para conseguir un inserto con las características deseadas. Se ha comprobado la extraordinaria importancia de seguir las recomendaciones de diseño surgidas de la experiencia acumulada en el uso de esta tecnología.
- Los modelos empleados en este trabajo han mostrado unas características que limitan su uso a aplicaciones que no requieran de una elevada precisión. La estabilidad dimensional, de los modelos plásticos en general y de los realizados a partir de técnicas FDM en particular, no es lo suficientemente buena para su uso en procesos como el electroconformado, que lleva inherente un ciclo térmico. Con otro tipo de modelos se puede aprovechar mucho más la gran capacidad de reproducción de esta tecnología.
- Estos modelos realizados en FDM tienen la ventaja de que son muy fáciles de tratar con técnicas convencionales de preparación de superficies. Se requiere de un proceso sencillo pero laborioso hasta conseguir el modelo en condiciones aptas para la electrodeposición. El método empleado para la metalización de las superficies donde se requiere hacer la deposición de níquel, es muy fácil de aplicar aunque se requiere mucha habilidad para conseguir un acabado superficial de requisitos elevados.
- Las condiciones operativas del proceso electrolítico son de gran importancia para obtener las cáscaras con las propiedades deseadas. A pesar de ello éstos pueden variar en unos márgenes aceptables con lo que puede realizarse su implantación industrial sin mayor problema.
- Se ha comprobado que la agitación catódica juega un papel fundamental en la uniformidad del espesor de depósito. Éste ha sido uno de los problemas más importante que nos hemos encontrado y que requiere de un estudio de mayor profundización.
- Las tensiones internas propias de todo proceso de electrodeposición, también tienen una importancia considerable en la generación de las cáscaras electroconformadas. Provocan deformaciones importantes en la cáscara si ésta, debido a su geometría, no tiene suficiente rigidez. También afectan de

forma decisiva a la facilidad de separación del modelo y cáscara. En caso de dificultar el proceso de desmodelado las operaciones requeridas para éste pueden dañar a la cáscara ya elaborada.

- El tiempo requerido para la elaboración de las cáscaras depende fundamentalmente de la geometría de la cáscara y de la intensidad de corriente que podamos usar para conseguir las propiedades requeridas. Son tiempos normalmente altos, aunque la electrodeposición se realiza mediante un proceso que no requiere prácticamente ningún tipo de intervención del personal y que se lleva a cabo durante las 24 horas del día.
- Las soluciones de diseño adoptadas en las cáscaras para su integración en la placa de figura, pueden ser mejoradas para conseguir una mayor precisión en el ensamble de estos componentes.
- El relleno de la cáscara es un punto en el que sí existe un mayor margen de actuación. Las resinas empleadas se han comportado muy bien pero se necesita una mayor rigidez del respaldo de la cáscara. Se podría lograr incorporando una carga metálica adicional que elevaría el módulo de elasticidad. Creemos posible realizar un relleno con una aleación metálica de bajo punto de fusión, aunque habrá que comprobar el comportamiento de la cáscara. También creemos que podrían emplearse rellenos cerámicos aunque habría que estudiar la compatibilidad de los diferentes materiales involucrados, así como la viabilidad de los mecanizados requeridos en la zona de relleno.
- El análisis estructural realizado sobre los insertos nos ha permitido conocer de forma cualitativa el comportamiento de los mismos. Los resultados cuantitativos del modelo analizado, han mostrado una razonable aproximación a lo comprobado durante la fase de ensayo de los moldes. Esto nos permite corroborar la validez del modelo estudiado, con lo que basándose en las hipótesis consideradas, puede realizarse un modelo más refinado con garantías de fiabilidad de los resultados.
- La gran mayoría de los procesos de fabricación necesarios sobre el resto de componentes del molde, pueden ser realizados de forma simultánea a la elaboración de la cáscara, consiguiendo acortar los tiempos de fabricación de la herramienta.

- El molde ha presentado un comportamiento muy aceptable, incluso por encima de las expectativas creadas, a pesar de los condicionantes y problemática que nos hemos encontrado durante la elaboración del mismo. Se han realizado en torno a 500 inyecciones entre pruebas de llenado y compactación, y las distintas series realizadas en condiciones de inyección diferentes para los cuatro materiales seleccionados para las pruebas.
- Los problemas detectados en el inserto fueron los que se esperaban, condicionados por la baja uniformidad de los espesores en la cáscara y las desviaciones formales de la misma, y el empleo de un material de relleno de baja rigidez. La combinación de estos factores introdujo puntos críticos en el inserto que fueron los que se manifestaron durante las pruebas, en forma de fisuración en algunas zonas alrededor de la cavidad. Estas zonas fueron las que se tuvieron que rectificar en mayor medida para poder lograr una superficie de partición adecuada.
- Otras zonas del inserto donde el espesor de cáscara era mayor o la rigidez de la misma era más elevada, no presentaron problemas de ningún tipo y no se han observado diferencias entre el estado inicial y final del inserto. Esto permite albergar esperanzas fundadas de que el potencial de uso de estos insertos puede ser alto para determinadas aplicaciones.
- Los resultados de las pruebas realizadas a las probetas, para los diferentes materiales inyectados, se encuentran en torno a sus propiedades típicas. Todo esto a pesar de que las condiciones de ensayo que se han podido utilizar no son propias para los materiales plásticos. Los dos tipos de probetas generadas con el molde, la obtenida a partir del inserto de níquel y la de la cavidad mecanizada, han mostrado propiedades mecánicas casi iguales en tensión, y con diferencias en cuanto a la ductilidad.
- Se observaron diferencias significativas en el estado tensional resultante de las probetas de policarbonato analizadas mediante técnicas de fotoelasticidad. Estas son debidas a dos causas: diferencias en las características de la transferencia de calor entre las dos cavidades, y a la diferencia de rigidez de las mismas. Sería interesante realizar un análisis más profundo de estos factores para comprobar si resultan ventajosos o perjudiciales.

- El tiempo total requerido para la fabricación de una herramienta mediante insertos electroconformados, depende en gran medida de la complejidad de la pieza. Para piezas de relativa sencillez geométrica los plazos de tiempo desde que se crea la necesidad, hasta que la herramienta se encuentra operativa puede estar en torno a 2 o 3 semanas.
- Con un diseño de cáscara de mayor rigidez y en el que se alcance también una mayor uniformidad del espesor de níquel, confiamos en un excelente comportamiento de estás cáscaras y tenemos la certeza de que este tipo de insertos electroconformados tienen un hueco para determinadas aplicaciones en el campo de los moldes rápidos metálicos.

11.2Líneas futuras de investigación.

Tan importante como las conclusiones sacadas del trabajo realizado, son las líneas de investigación que se abren con el fin de aprovechar la experiencia adquirida. Son bastantes las líneas de investigación que se pueden seguir a partir de aquí, siendo las que se creen más interesante las que se presentan a continuación.

- Profundización en el estudio del control del proceso de electroconformado para mejorar la uniformidad de la deposición del material y llevar las tensiones internas generadas a los niveles más bajos posibles.
- Analizar el uso de otros materiales para la fabricación de modelos que permitan aprovechar al máximo las potencialidades del proceso de electroconformado, fundamentalmente su extraordinaria capacidad de reproducción de detalles.
- Estudio del aumento de la rigidez de los insertos mediante el empleo de otras resinas epóxicas con mayor carga metálica. También se han de analizar el uso de rellenos con aleaciones metálicas de bajo punto de fusión y de rellenos de tipo cerámico.
- Diseño modular de insertos electroconformados para su aplicación a una determinada tipología de piezas, y a la producción de series pequeñas o medias.

© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Biblioteca Universitaria, 2006

- Empleo de otros metales en la electrodeposición como el cobre o cromo. Las piezas electroconformadas pueden ser empleadas para su aplicación en electrodos EDM u otros fines.
- Análisis de la electrodeposición de dos metales diferentes de manera simultánea o sucesiva. Aleaciones Cromo-Níquel, o refuerzo de cáscaras de níquel mediante deposición de cobre, etc..
- Aplicación del electroconformado a la generación de otro tipo de herramientas para la conformación de materiales plásticos como: rotomoldeo, extrusiónsoplado, termoconformado, y otros.
- Empleo del electroforming para la generación de herramental y utiliaje para la conformación de otro tipo de materiales como: aleaciones ligeras, cartón y papel, o madera y corcho.
- Utilización del electroconformado como proceso de conformación de piezas de pared delgada, elementos de rejilla, etc..
- Aplicación del electroconformado a las nanotecnologías y a las microherramientas.

"Un tren que parte es la cosa del mundo más parecida a un libro que se acaba."

Benito Pérez Galdós (1843-1920)

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA.

Referencias bibliográficas.

- [1] Morton-Jones, Procesamiento de plásticos. Ed. Limusa 1993.
- [2] ANAIP, Los plásticos en España, hechos y cifras. 1998.
- [3] Bodini, Moldes y máquinas de inyección para la transformación de plásticos. Ed. Mc Graw Hill 1992.
- [4] ZAMANILLO, J. y otros. Integración del diseño y la fabricación. SPUPV. 1998
- [5] Boothroyd y otros, Product Design for Manufacture and Assembly. Ed. Marcel Dekker, 1994.
- [6] Malloy, R., Plastic Part Design for Injection Molding-An Introduction. Hanser Publishers, 1994.
- [7] Jacobs, Rapid Prototyping & Manufacturing. Ed. SME, 1992.
- [8] M. Monzón, P. M. Hernández, A. N. Benítez y M. D. Alemán. Fabricación de Prototipos mediante técnicas FDM. Plast`21. Vol. 96. Octubre 2001.

- [9] Monzón M. y otros. Aplicación del electroconformado en la fabricación rápida de moldes de inyección. Revista Plásticos Modernos. Noviembre 2002.
- [10] Jacobs, Herramienta rápida a partir de estereolitografía. The Edge 1997
- [11] Soluciones de Futuro al alcance de la mano. PLAST'21. Noviembre 2001.
- [12] Simmonds , R., Pulverización de metales con arco para la construcción de moldes. MCP Iberia. 1990
- [13] Model Patterns reduce los plazos de entrega y los costes con 3DKELTOOL. 3D NEWS VOL. I Nº 1, 2000
- [14] La fabricación rápida de herramienta llena el vacío, The Edge. 1997.
- [15] T. Hart, A. Watson, Electroforming. Nickel Development Institute, Toronto, 2000
- [16] R. Parkinson, Electroforming a unique metal fabrication process. 1999
- [17] R. Parkinson. Nickel Plating and Electroforming. Nickel Development Institute.

 1998
- [18] Stein, B., AESF Electroforming Symposium. Las Vegas, NV. 1996
- [19] Richardson, G. 1997 Electroforming Course and Symposium. NIDI and AESF, San-Diego, CA. 1997
- [20 Julve. E., Electrodeposición de metales. Fundamentos, operaciones e instalaciones. Editorial E. J. S., 2000.
- [21] Dini, J., Electrodeposition. The Materials Science of Coating and Substrates.

 Noyes Publications, 1993.
- [22] DiBari, G., Nickel plating. International Nickel Inc., Saddle Brook, N.J. 1991
- [23] Watson, A., Nickel sulphamate solutions. Nickel Development Institute. 1989.

- [24] Watson, A., Additions to sulphamate nickel solutions. Nickel Development Institute. 1989.
- [25] Stein, B., A Practical Guide to Understanding, Measuring and Controlling Stress in Electroformed Metals. AESF Electroforming Symposium, Las Vegas, NV. 1996
- [26] Clyne, T., Residual Stresses in Thick and Thin Surface Coatings. http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/twc010.pdf.
- [27] Marrero, Mª Dolores. Estudio del proceso de electroconformado para la fabricación de moldes rápidos (RT). Caracterización mecánica de los insertos de níquel para su aplicación a la inyección de termoplásticos, ULPGC, 2003.
- [28] INCO, Nickel Electroforming. INCO, 1991.
- [29] Gastrow, H., Moldes de inyección para plásticos. Ed. Hansen. 1992.
- [30] M. Monzón, P. M. Hernández. Introducción a la conformación de plásticos. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1998.
- [31] Zamanillo y otros, Diseño y fabricación de piezas de termoplásticos inyectadas.
 Ed. SPUPV, 2000.
- [32] Clavería, I., Software para diseño semiautomático de moldes de Inyección.

 Universidad de Zaragoza, 2003.
- [33] Gouldson, C., Rapid Tooling Processes and Selection Criteria, rapid Prototyping. SPE RETEC, 1996.
- [34] Poliski, Q., A mechanical property performace comparison for plastics parts produced in a reapid epoxy tool and conventional steel tooling. University of Massachusetts Lowell, 1997.
- [35] Paradis, R., A cost/benefit análisis of aluminum and Direct Aim stereolithography tooling. University of Massachusetts Lowell, 1998.

- [36] UNE-EN ISO 3167, Plásticos: Probetas de usos múltiples. UNE, 1997.
- [37] VAP, Catálogo general de componentes normalizados par moldes, 1998.
- [38] LOCTITE, Hoja de descripción del producto HYSOL 3472. Henkel, 2002.
- [39] LOCTITE, Product Description Sheet HYSOL 3479. Henkel, 2002.
- [40] Menges/Mohren. How to make injection molds. Society of plastics engineers. Ed. Hansen.1986.
- [41] KIEF, H., Manual CN/CNC. Ed. Gran DUC, 1998.
- [42] Berhhardt, E., CAE, computer aided Engineering for Injection Molding. Ed. Hanser 1983
- [43] Castany, J. y otros, Simulación aplicada al diseño y la producción de componentes inyectados. Revista Plásticos Modernos, mayo 2000.
- [44] Manual de usuario de Moldflow MPA 6.0.
- [45] Manual de usuario de ANSYS 5.7.
- [46] ASCAMM (1996). El diseño industrial y el "rapid prototyping". ASCAMM.
- [47] UNE-EN ISO 527-1 Plásticos: Determinación de las propiedades en tracción.
 UNE, 1996.
- [48] Corz, A. Extensometría y fotoelasticidad. Ed. Reverte, 1997
- [49] <u>www.kistler.com</u>
- [50] AISA, J., Estudio experimental de la inyección secuencial de termoplásticos.

 Universiad de Zaragoza, 2003.
- [51] MCP, Cool Spray Moldmaking, MCP, 1997.
- [52] Dusel, K. y otros, Rapid Tooling Simulation and Applications of the Injection Moulding Process. IKP-University of Stuttgart, 1998.

- [53] Krar, Illustrated Dictionary of Metalworking and Manufacturing technology.

 McGraw-Hill, 1999.
- [54] AENOR, Metrología Dimensional. AENOR, 1998.
- [55] Michaeli, Introducción a la tecnología de los plásticos. Ed. Hanser 1988.
- [56] Kalpakjian, Manufactura. Ingeniería y Tecnología. Prentice may, 2002.
- [57] www.rentooling.com
- [58] <u>www.vistatek.com</u>
- [59] Castany, J. y otros, Principios de diseño en el proyecto de máquinas. Prensas universitarias de Zaragoza, 1999.
- [60] Murali, A., Introducing Molflow Plastics Advisers 6.0. Flowfront, marzo 2002.
- [61] Ashley, S., From CAD art to rapid metal tool. SME, marzo 1997.

Otra bibliografía consultada

- Niemann, G., Elementos de máquinas. Volumen I. Ed. Labor. 1987.
- Manual de aceros. S. A. Echevarría. Bilbao.
- L. F. Hamilton, S. G. Simpson y D. W. Ellis. Cálculos de Química Analítica.
 Séptima edición. Editorial McGraw-Hill, 1989.
- hhtp://www.ipt.dtu.dk/~tt/micro/ecd.htm. 2001. Electrochemical Deposition (ECD).
- Filtration and purification of plating and related solutions and effluents. Jack H.
 Berg. Serfilco Ltd., Northbrook, III.
- http://www.inco.com

- Anodes for electrodeposition of nickel. Dr. S. Alec Watson. Nickel Development Institute. 1989.
- K. P. Wong, K. C. Chan y T.M. Yue. Influence of spike current in different shaped waveforms on the hardness and grain size of nickel electroforms. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 117, págs. 97 104. Noviembre 2001.
- www-bsac.eecs.berkeley.edu/archive/ masters/jjudy/Chapter3.pdf
- T. W. Clyne. Residual Stresses in Thick and Thin Surface Coatings. http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/twc010.pdf.
- Thermal design and analysis of stereolithography rapid tooling for injection molding. Michael James Janczyk. University of Massachusetts Lowell. 1996.
- Analysis of 1 micron thickness metal coating effects on stereolitography rapid tooling for injection molding. David T. Burns. University of Massachusetts Lowell.
 1997.
- Decorative Precious Metal Plating. MFSA Quality Metal Finishing Guide, Vol. 1 No.
 1-B.
- Metalizado de materiales plásticos, II. Metalizado por electrodeposición. O.
 Laguna y S. Areso. Revista de plásticos modernos, núm. 453. Marzo 94.
- Plating bath control using ampere-time instruments. David A. Stewart. Systematics
 Inc., Bristol, R.I. Joseph J. Werbicki. Copperweld Metallon Div., Pawtucket, R.I.
 AESF
- Insight-Moving Toward Rapid Tooling. Jacobs, Paul F. in: The Edge, 3D Systems,
 Valencia, CA, Vol. IV, No3, pg. 6-7, 1995.
- Mohler, J.B., Metal Finishing, 1959
- Skwirzynski, J.K., Journal of the Electrochemical Society. 1957
- Gilmont, R., Proceedings of the American Electroplating Society. 1956.

Michaeli W., How Close are Moulded Parts from RT Moulds to Series Production?
 Kunststoffe Plastics Europe, Nov 1996.

Bases de datos consultadas.

- AST [WILSON APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY]. Base de datos bibliográfica con referencias de unas publicaciones periódicas en lengua inglesa sobre tecnología y ciencias aplicadas.
- BNE [BIBLIOGRAFIA NACIONAL ESPAÑOLA]. Contiene más de 500.000 registros visualizables y exportables en formato IBERMARC e ISBD(M), de las monografías ingresadas por depósito legal en la Biblioteca Nacional de Madrid desde 1976
- CIL [CSIC-CIRBIC-L]. Dentro de la base de datos del C.S.I.C. se encuentra CIRBIC que es el catálogo colectivo de libros y revistas de las bibliotecas del CSIC. CIRBIC-L recoge unas 355.288 referencias bibliográficas de libros de distintas temáticas.
- DA [DISSERTATION ABSTRACTS]. Recoge más de 1.400.000 referencias bibliográficas de tesis doctorales leídas o publicadas en más de 1000 Universidades del mundo y sobre más de 3.000 temas diferentes desde 1983
- GBP [GLOBAL BOOKS IN PRINT PLUS]. Contiene más de dos millones de citas de libros, en lengua inglesa, a la venta en Estados Unidos, Gran Bretaña, Australia, Canadá, Nueva Zelanda... así como las direcciones de más de 90.000 editores.

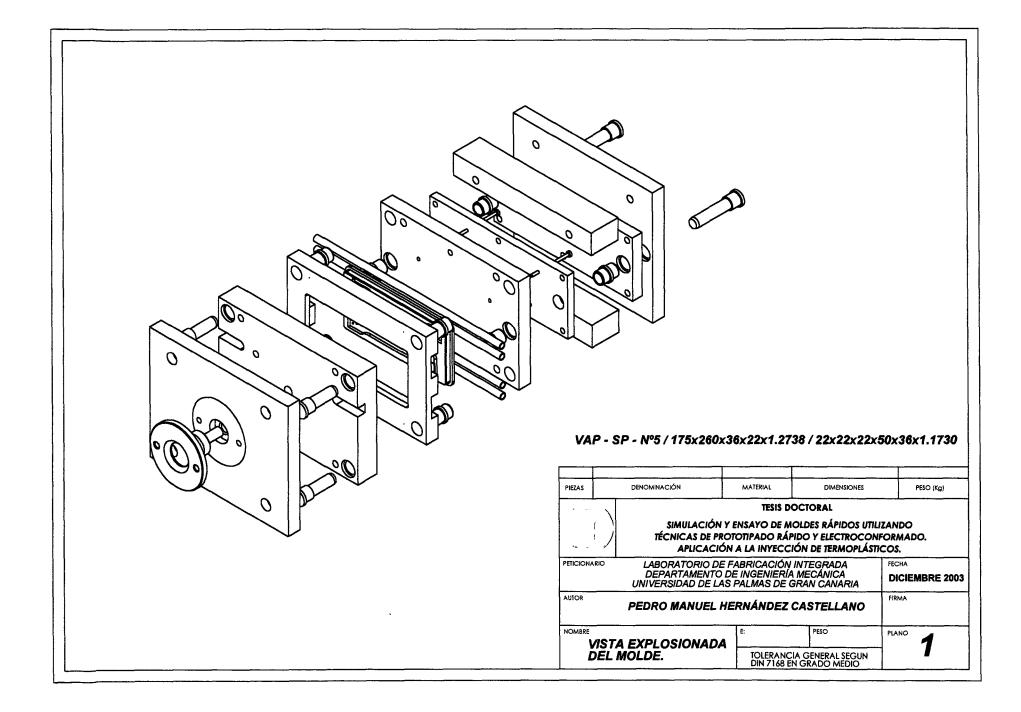
- ICY [C.S.I.C.-ICYT]. Dentro de la base de datos del C.S.I.C. se encuentra la del ICYT Indiza numerosos artículos de investigación en ciencia y tecnología en lengua española, recogidos en sus centros, desde 1979. Contiene más de 82.000 referencias bibliográficas.
- INS [INSPEC]. Base de datos del Institute of Electrical Engineers. Contiene referencias bibliográficas de artículos de revistas técnicas o actas de congreso, sobre informática, electrónica. física e ingeniería.
- ISB [I.S.B.N.]. Recoge mas de 500.000 referencias bibliográficas do las monografías publicadas en España tanto si están en venta como si están agotadas.
- REB [REBIUN]. Catálogo colectivo de la Red de Bibliotecas Universitarias y
 Científicas Españolas.
- SIG [SIGLE]. Contiene trabajos de investigación en las diferentes disciplinas, en formatos que no están disponibles a través de los canales comerciales habituales (informes de investigación, actas de congresos, documentos de trabajo, normas, recomendaciones técnicas, tesis doctorales...) generadas en Europa desde 1980.
- TES [TESEO]. Base de datos del Consejo de Universidades. Contiene información de las tesis doctorales leídas en Universidades Españolas desde 1976.

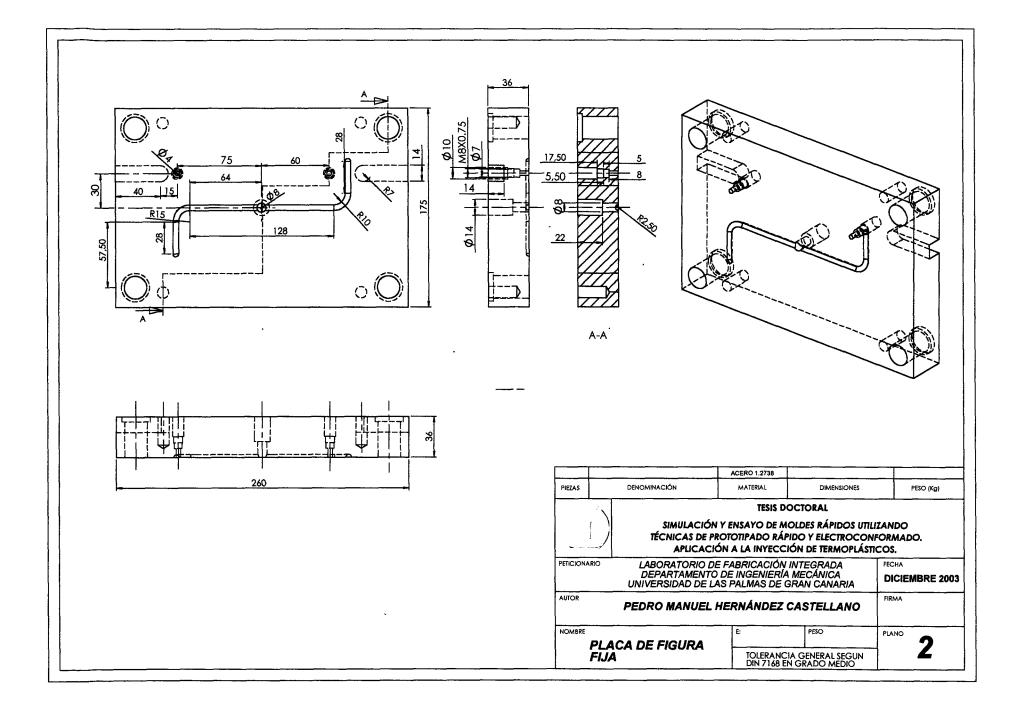
Todas estas bases de datos están disponibles en el servidor Doramas de la Biblioteca Universitaria http://www.ulpgc.es/servidores/biblio/Doramas.htm

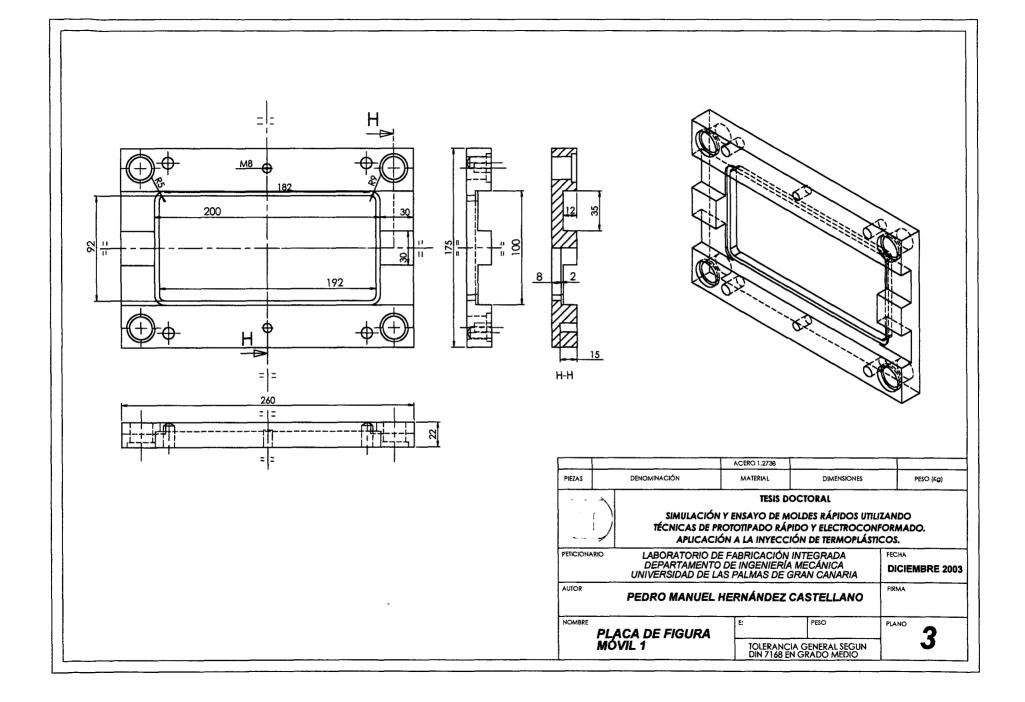
Anexo A PLANOS

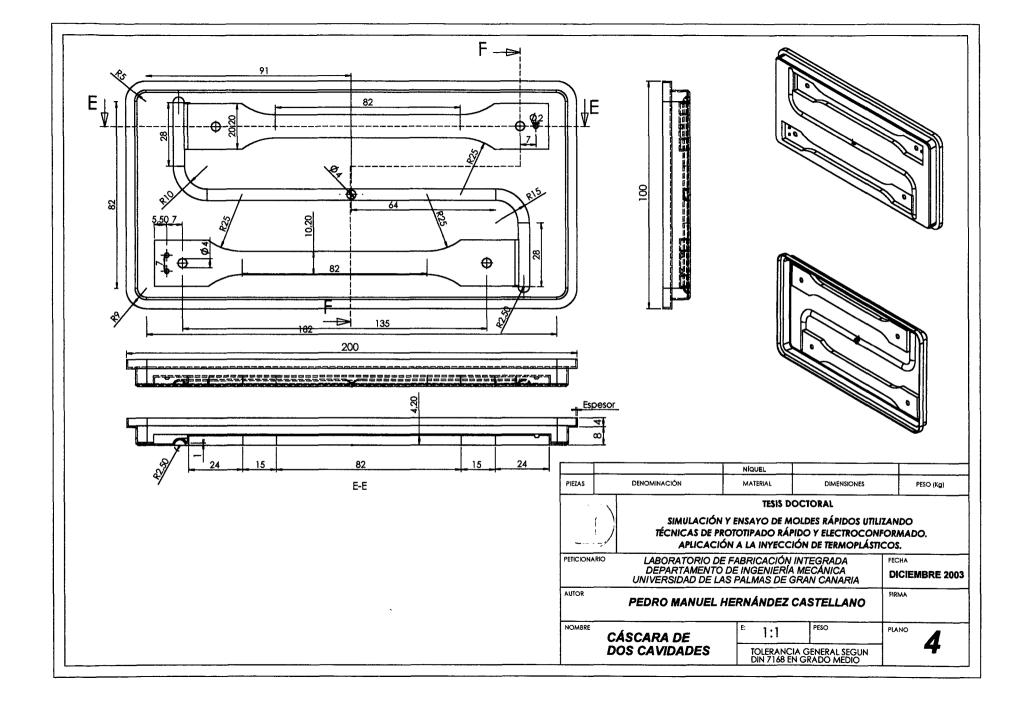
RELACIÓN DE PLANOS.

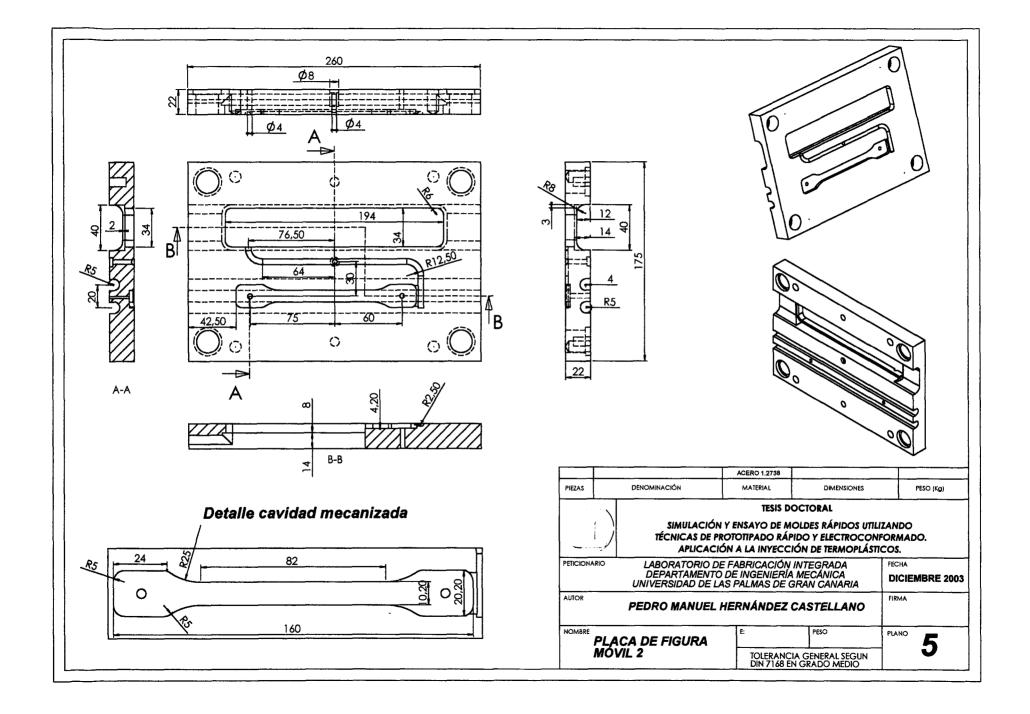
- 1. Vista explosionada del molde.
- 2. Placa de figura fija.
- 3. Placa de figura móvil 1.
- 4. Cáscara de dos cavidades.
- 5. Placa de figura móvil 2.
- 6. Cáscara de una cavidad.
- 7. Placa intermedia.
- 8. Ensamblaje del molde.

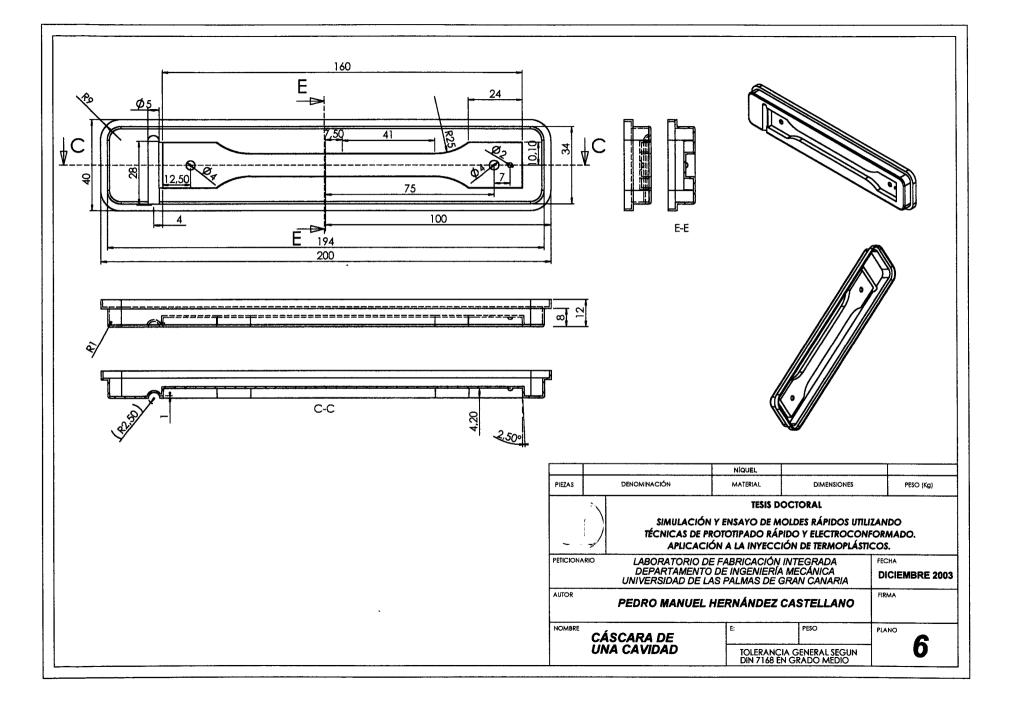


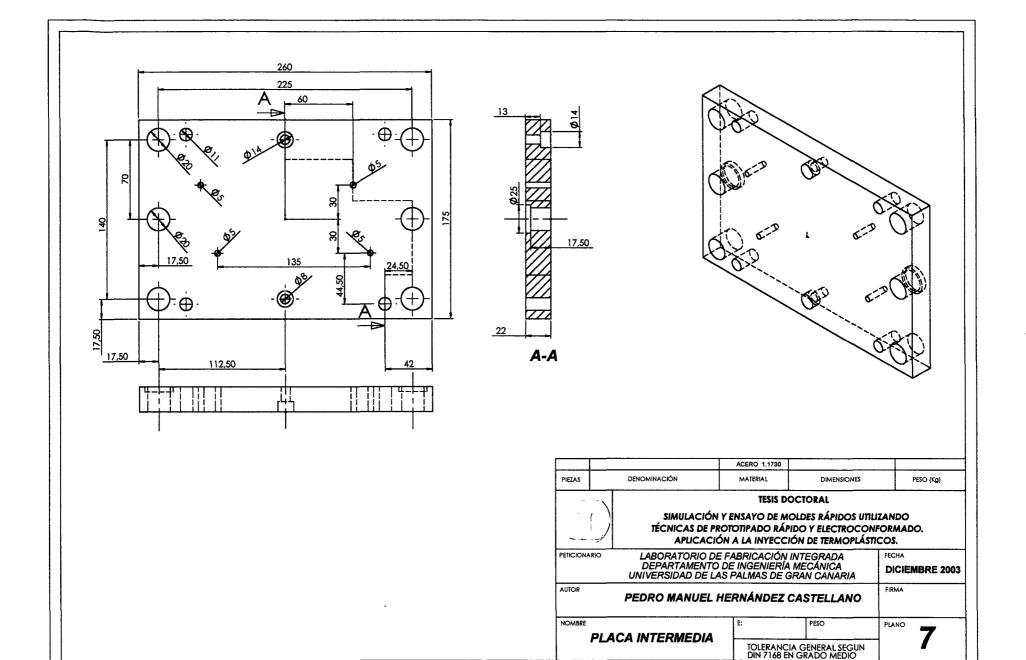


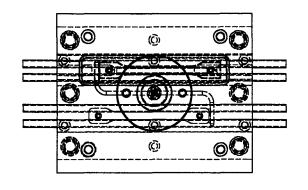


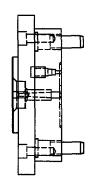


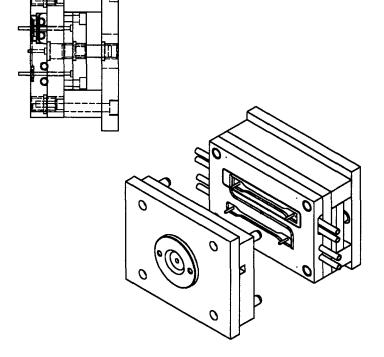


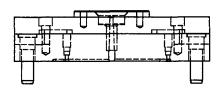


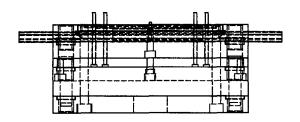


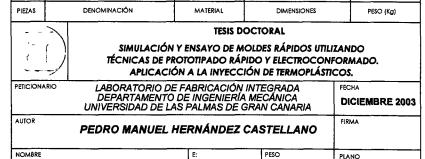












ENSAMBLAJE DEL MOLDE

TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 EN GRADO MEDIO

Anexo B

INFORMES MOLDFLOW PLASTICS ADVISERS

INFORMES MOLDFLOW PLASTICS ADVISERS.

- 1. Informe en condiciones de serie para PC Tarflon 1900.
 - Resumen.
 - Modelos de análisis.
 - Dimensiones de molde.
 - Sistema de alimentación.
 - Definición de puertas de entrada.
 - Tiempo de llenado.
 - Eficacia de llenado.
 - Presión de inyección.
 - Temperatura del frente de flujo.
 - Predicción de calidad de pieza.
 - Atrapamientos de aire.
- 2. Informe en condiciones de prueba de exigencia para PC Tarflon 1900.
 - Resumen.
 - Modelos de análisis.
 - Dimensiones de molde.
 - Sistema de alimentación.
 - Definición de puertas de entrada.
 - Tiempo de llenado.
 - Eficacia de llenado.
 - Presión de inyección.
 - Temperatura del frente de flujo.
 - Predicción de calidad de pieza.
 - Atrapamientos de aire.

Análisis PC TARFLON 1900 Prepared By: PEDRO M. HERNÁNDEZ CASTELLANO

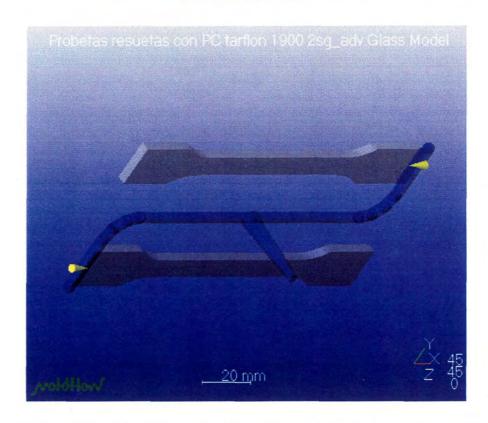
Prepared for: L.F.I. - U.L.P.G.C. Condiciones de Serie

Date: 28-10-2003

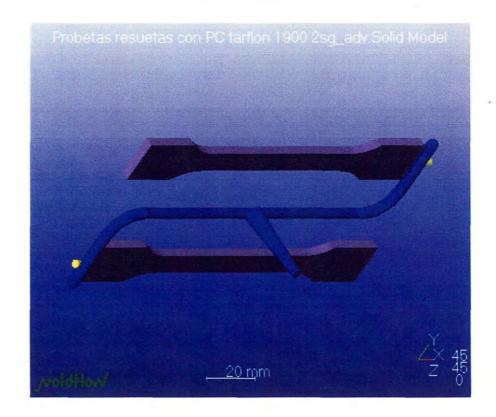
SUMMARY

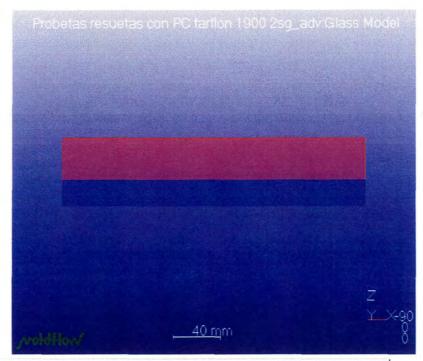
				
	6.0Probetas resuetas co tarflon 1900 2sg_adv	on PC		
	Part Name:	Probetas		
	Material Supplier:	Idemitsu Petrochemical Co Ltd		
	Material Grade:	Tarflon IR1900		
	Max Injection Pressure	: 140.00 MPa		
	Mold Temperature:	70.00 deg.C		
ļ	Melt Temperature:	300.00 deg.C		
	Model Suitability:	Part model was generally suitable for analysis.		
Release Level:	Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv			
	- Moldability:	Your part can be easily filled using the current feed system. However, the model has been identified as being less than highly suitable for a Part Adviser analysis.		
	Confidence:	Medium		
	Injection Time:	2.03 sec		
	Injection Pressure:	47.09 MPa		
	Weld Lines:	No		
	Air Traps:	Yes		
	Shot Volume (cavity, runner):	24.06 cu.cm (18.47, 5.59)		
	Filling Clamp Force:	4.48 tonne		
	Packing Clamp Force Estimate @20%:	(9.42)MPa 4.22 tonne		
	Packing Clamp Force Estimate @80%:	(37.67)MPa 16.89 tonne		
	Packing Clamp Force Estimate @120%:	(56.51)MPa 25.34 tonne		
	Clamp Force Area:	43.97 sq.cm		
Ì	Cycle Time:	19.38 sec		

GLASS MODEL



SOLID MODEL

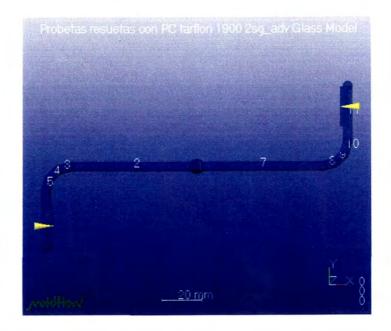


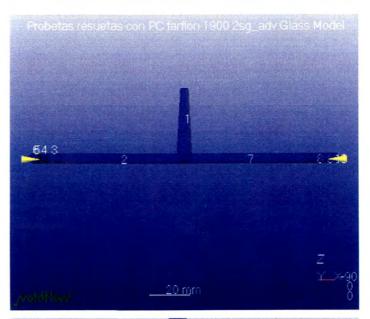


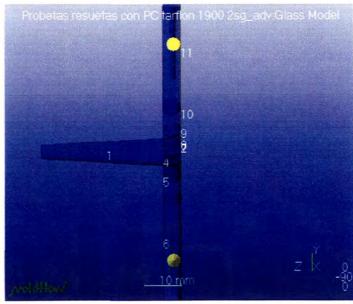
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv	
Width	260.0 mm
Length	175.0 mm
A-Plate	36.0 mm
B-Plate	22.0 mm

RUNNERS









Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Runner system coordinates are relative to the drop point (-0.09,-0.58,-0.58), not the centre of the mold.

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Runner No	Runner Start			Runner End		
1	X: o.o	Y: o.o	Z: o.o	X: o.o	Y: 0.0	Z:-36.0
2	X: 0.0	Y: 0.0	Z:-36.0	X:-64.0	Y: 0.0	Z:-36.0
3	X:-64.0	Y:0.0	Z:-36.0	X:-70.3	Y:-1.7	Z:-36.0
4	X:-70.3	Y:-1.7	Z:-36.0	X:-74.8	Y:-6.3	Z:-36.0
5	X:-74.8	Y:-6.3	Z:-36.0	X:-76.5	Y:-12.5	Z:-36.0
6	X:-76.5	Y:-12.5	Z:-36.0	X:-76.5	Y:-40.5	Z:-36.0
7	X:0.0	Y:0.0	Z:-36.0	X:64.0	Y:0.0	Z:-36.0
8	X:64.0	Y:0.0	Z:-36.0	X:70.3	Y: 1.7	Z:-36.0
9	X:70.3	Y: 1.7	Z:-36.0	X:74.8	Y: 6.3	Z:-36.0
10	X:74.8	Y:6.3	Z:-36.0	X:76.5	Y: 12.5	Z:-36.0
11	X:76.5	Y: 12.5	Z:-36.0	X:76.5	Y:40.5	Z:-36.0

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Runner No	Runner Size	Runner Type	
1	Length: 36.0 mm Start Diameter: 4.0 mm End Diameter: 8.0 mm	Cold Runner	
2	Length : 64.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
3	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
4	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
5	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
6	Length : 28.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
7	Length : 64.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
8	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
9	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
10	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
11	Length : 28.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Gate coordinates are relative to the drop point (-0.09,-0.58,-0.58), not the centre of the mold

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Gate No	Gate Start			Gate End		
A	X:-76.5	Y:-30.0	Z:-36.0	X:-72.5	Y:-30.0	Z:-36.5
В	X:76.5	Y:30.0	Z:-36.0	X:72.5	Y:30.0	Z:-36.5

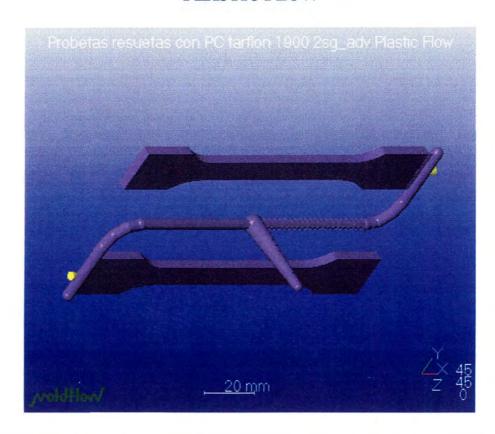
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg_adv

Gate No	Gate Size
A	Length : 4.0 mm Width : 20.0 mm Height: 1.0 mm
В	Length : 4.0 mm Width : 20.0 mm Height: 1.0 mm

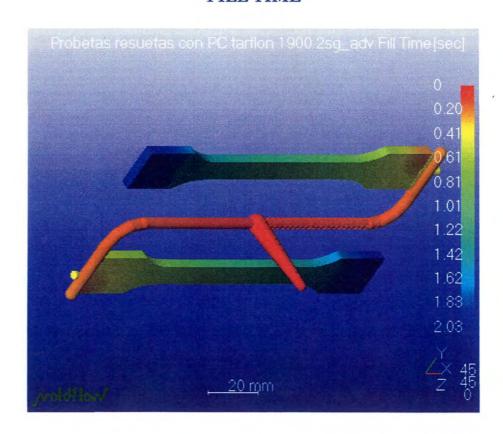
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 2sg adv

Gate No	Gate Type
A	Tab
В	Tab

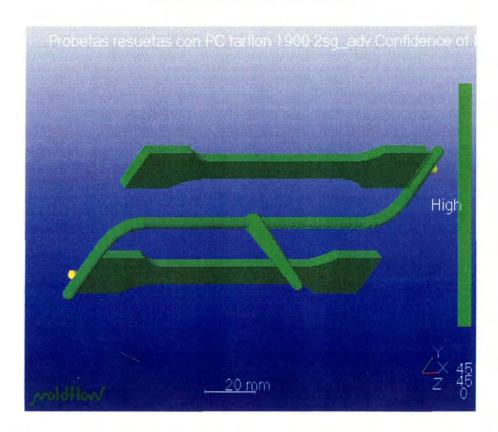
PLASTIC FLOW



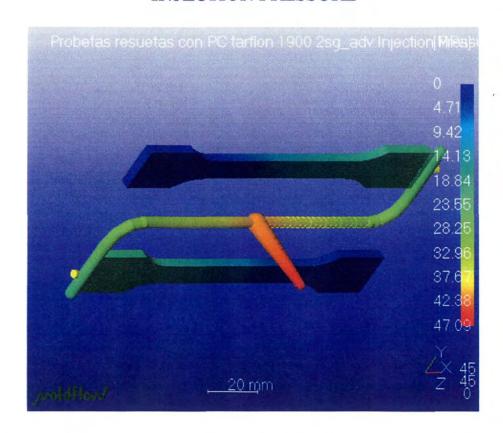
FILL TIME



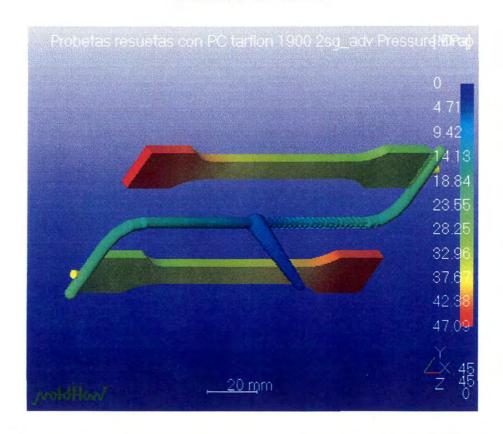
CONFIDENCE OF FILL



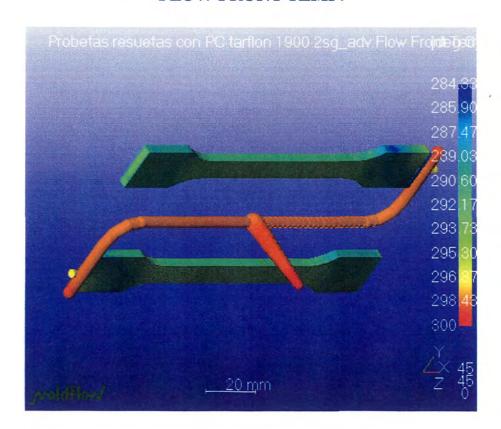
INJECTION PRESSURE



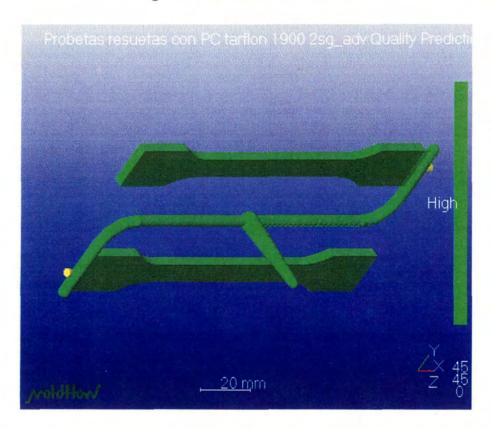
PRESSURE DROP



FLOW FRONT TEMP.



QUALITY PREDICTION



AIR TRAPS



Amálisis com IPC TAIRIFILON 1900

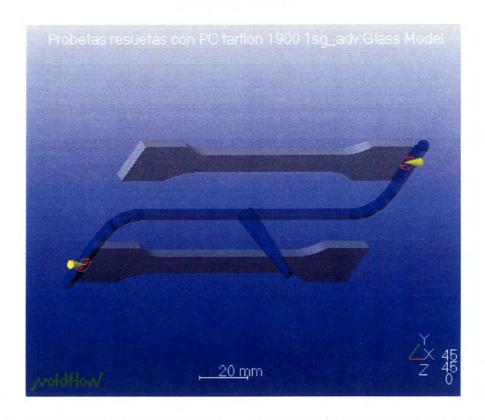
Prepared By: Pedro Manuel Hernández Castellano Prepared for: L.F.I. - U.L.P.G.C. Condiciones Prueba de Exigencia

Date: 27-10-2003

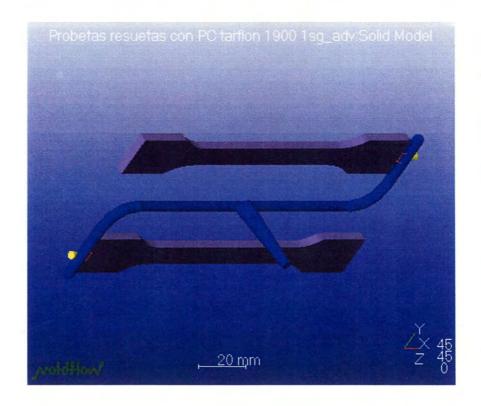
SUMMARY

	6.0Probetas resuetas c tarflon 1900 1sg_adv	on PC
	Part Name:	Probetas
	Material Supplier:	Idemitsu Petrochemical Co Ltd
	Material Grade:	Tarflon IR1900
	Max Injection Pressure	140.00 MPa
	Mold Temperature:	70.00 deg.C
	Melt Temperature:	300.00 deg.C
	Model Suitability:	Part model was generally suitable for analysis.
	Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv	
Release Level:	Moldability:	Your part can be easily filled but part quality may be unacceptable. View the Quality plot and use the Dynamic Adviser to get help on how to improve the quality of the part.
	Confidence:	Medium
	Injection Time:	1.02 sec
	Injection Pressure:	59.79 MPa
	Weld Lines:	No
Ì	Air Traps:	Yes
	Shot Volume (cavity, runner):	24.06 cu.cm (18.47, 5.59)
	Filling Clamp Force:	5.17 tonne
	Packing Clamp Force Estimate @20%:	(11.96)MPa 5.36 tonne
	Packing Clamp Force Estimate @80%:	(47.83)MPa 21.45 tonne
	Packing Clamp Force Estimate @120%:	(71.75)MPa 32.17 tonne
	Clamp Force Area:	43.97 sq.cm
	Cycle Time:	19.38 sec

GLASS MODEL



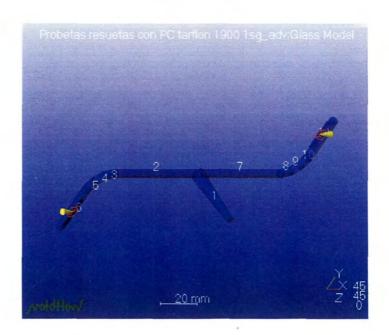
SOLID MODEL

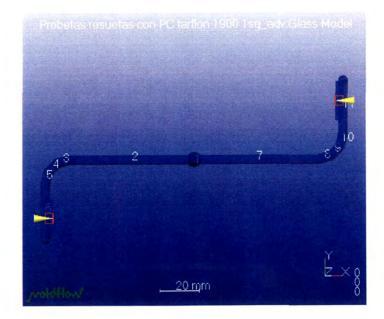




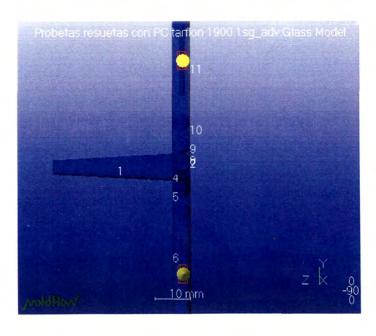
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv	
Width	260.0 mm
Length	175.0 mm
A-Plate	36.0 mm
B-Plate	22.0 mm

RUNNERS









Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv

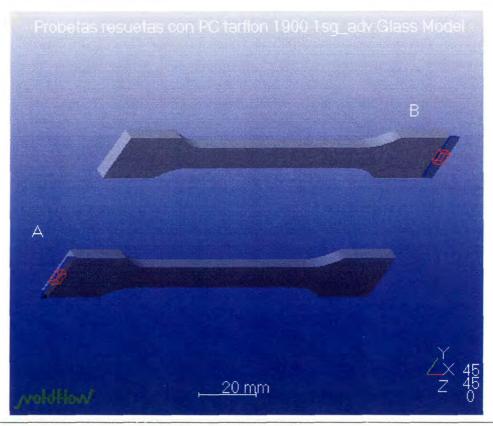
Runner system coordinates are relative to the drop point (-0.09,-0.58,-0.58), not the centre of the mold.

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv

Runner No	Runner Start			Runner End		
1	X: o.o	Y:0.0	Z:0.0	X: o.o	Y: o.o	Z:-36.0
2	X: 0.0	Y:0.0	Z:-36.0	X:-64.0	Y: 0.0	Z:-36.0
3	X:-64.0	Y : o.o	Z:-36.0	X:-70.3	Y:-1.7	Z:-36.0
4	X:-70.3	Y:-1.7	Z:-36.0	X:-74.8	Y:-6.3	Z:-36.0
5	X:-74.8	Y:-6.3	Z:-36.0	X:-76.5	Y:-12.5	Z:-36.0
6	X:-76.5	Y:-12.5	Z:-36.0	X:-76.5	Y:-40.5	Z:-36.0
7	X : o.o	Y:0.0	Z:-36.0	X:64.0	Y: 0.0	Z:-36.0
8	X:64.0	Y: 0.0	Z:-36.0	X:70.3	Y: 1.7	Z:-36.0
9	X:70.3	Y: 1.7	Z:-36.0	X:74.8	Y: 6.3	Z:-36.0
10	X:74.8	Y: 6.3	Z:-36.0	X:76.5	Y: 12.5	Z:-36.0
11	X:76.5	Y: 12.5	Z:-36.0	X:76.5	Y:40.5	Z:-36.0

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv

Runner No	Runner Size	Runner Type	
1	Length : 36.0 mm Start Diameter : 4.0 mm End Diameter : 8.0 mm	Cold Runner	
2	Length : 64.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
3	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
4	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
5	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
6	Length : 28.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
7	Length : 64.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
8	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
9	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
10	Length : 6.5 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	
11	Length : 28.0 mm Diameter : 5.0 mm	Cold Runner	



Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv

Gate coordinates are relative to the drop point (-0.09,-0.58,-0.58), not the centre of the mold

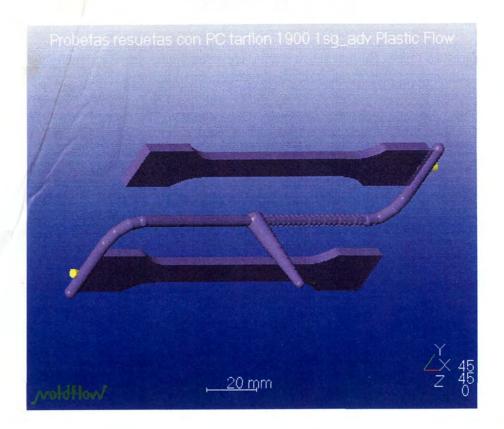
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv

Gate No	Gate Start			Gate End		
A	X:-76.5	Y:-30.0	Z:-36.0	X:-72.5	Y:-30.0	Z:-36.5
В	X:76.5	Y:30.0	Z:-36.0	X:72.5	Y:30.0	Z:-36.5

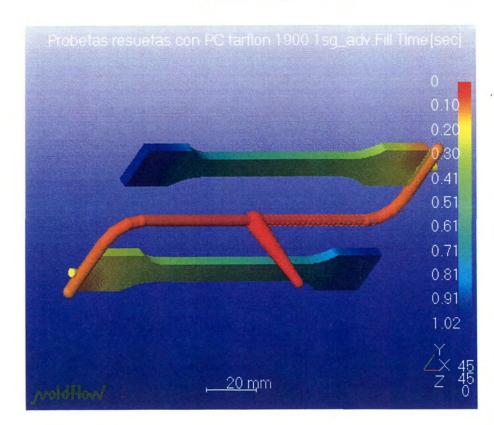
Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv	
Gate No	Gate Size
A	Length : 4.0 mm Width : 20.0 mm Height: 1.0 mm
В	Length : 4.0 mm Width : 20.0 mm Height: 1.0 mm

Probetas resuetas con PC tarflon 1900 1sg_adv	
Gate No	Gate Type
A	Tab
В	Tab

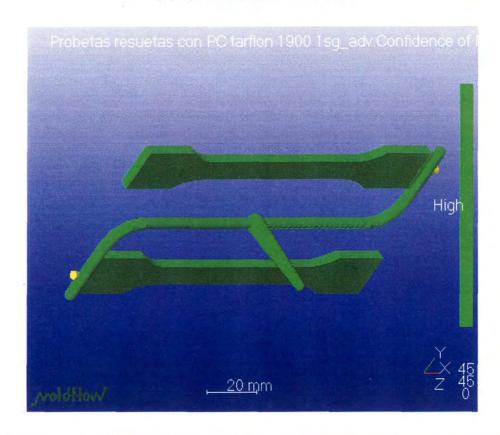
PLASTIC FLOW



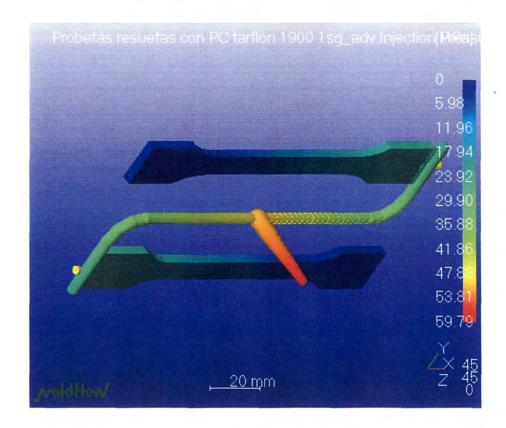
FILL TIME



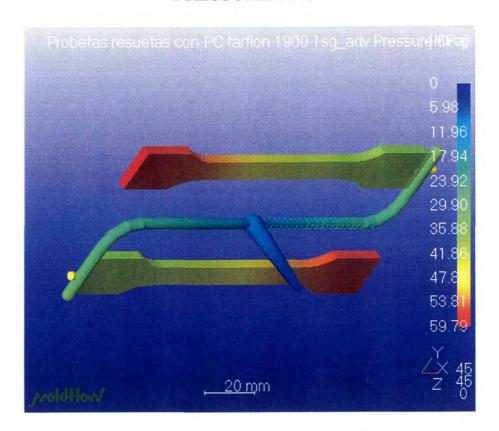
CONFIDENCE OF FILL



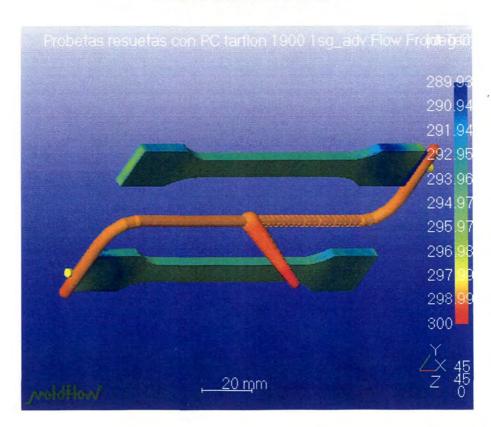
INJECTION PRESSURE



PRESSURE DROP

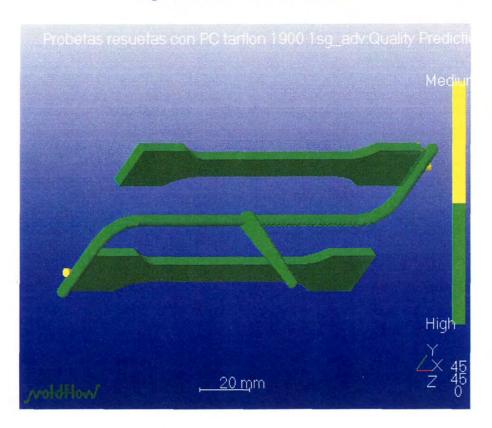


FLOW FRONT TEMP.

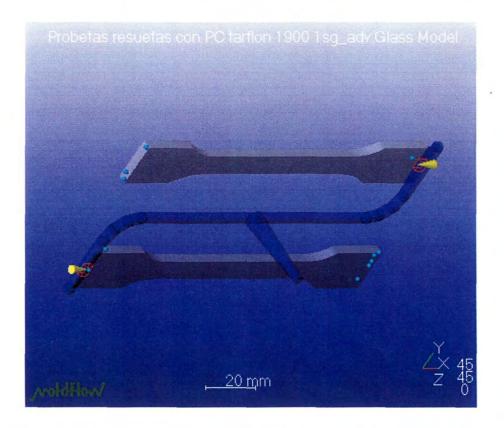


los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Ba

QUALITY PREDICTION



AIR TRAPS



Anexo C GRÁFICAS ANSYS

RELACIÓN DE GRÁFICAS DE RESULTADOS ANSYS.

INSERTO DEL MOLDE PARA PROBETAS.

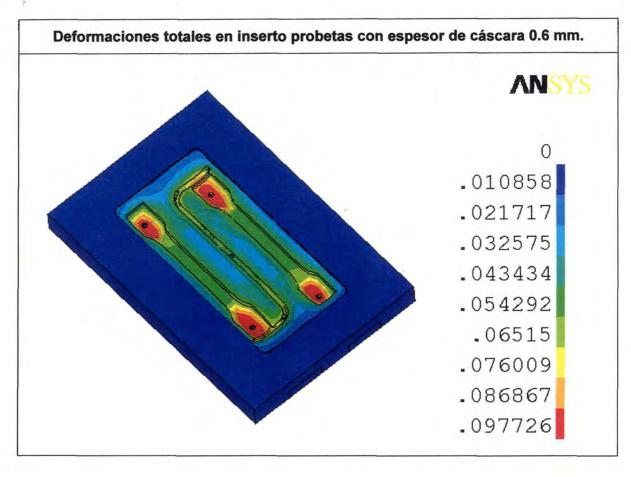
- 1. Deformaciones totales en inserto probetas con espesor de cáscara 0.6 mm.
- 2. Deformaciones totales en inserto probetas con espesor de cáscara 1.2 mm.
- 3. Sección con deformaciones totales del conjunto del inserto.
- 4. Detalle de las deformaciones resultantes en la zona de contacto cáscara-placa.

INSERTO HEMBRA DEL MOLDE PARA CARCASAS.

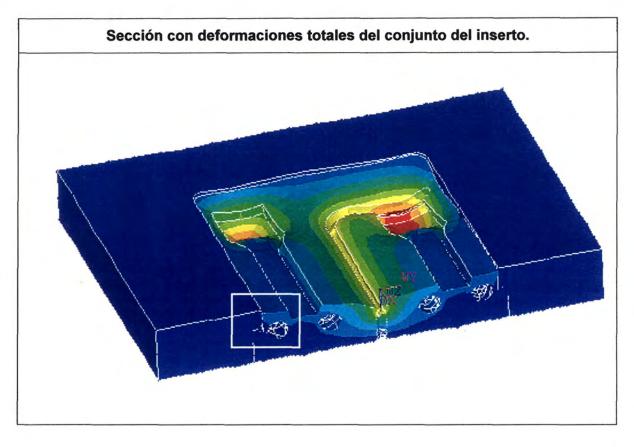
- Deformaciones totales de la cáscara hembra del molde de carcasas.
- 2. Deformaciones en dirección Z de la cáscara hembra del molde de carcasas.
- 3. Deformaciones totales del conjunto de componentes de la placa de figura fija.
- 4. Detalles de la deformación en la zona de contacto cáscara-placa.
- 5. Deformaciones totales en cáscara con resina de E=13800 MPa e inyección de PC.
- Deformaciones totales en cáscara con resina de E=6800 MPa e inyección de PS.
- 7. Tensiones de Von Misses en cáscara con resina de E=13600 MPa e invección de PC.
- 8. Tensiones de Von Misses en cáscara con resina de E=6800 MPa e inyección de PS.

INSERTO MACHO DEL MOLDE PARA CARCASAS.

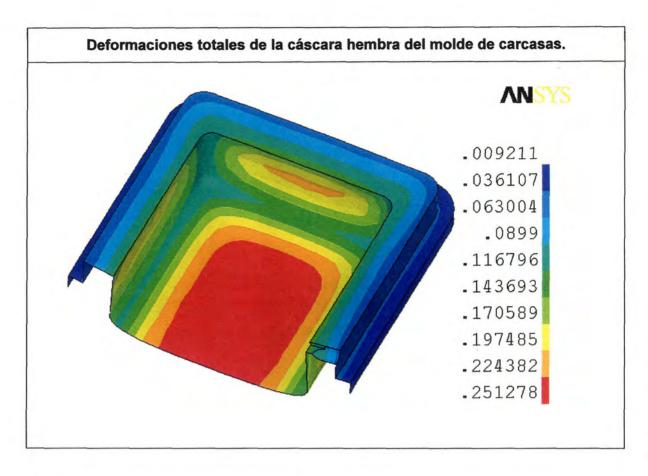
- Deformación en dirección Z de las cáscaras macho con resina de E=6800 MPa.
- Deformación en dirección Z de las cáscaras macho con resina de E=13600 MPa.
- Sección de Tensiones de Von Misses en resina con E=13600 MPa e inyección de PC.
- Sección de Tensiones de Von Misses en resina con E=6800 MPa e inyección de PS.

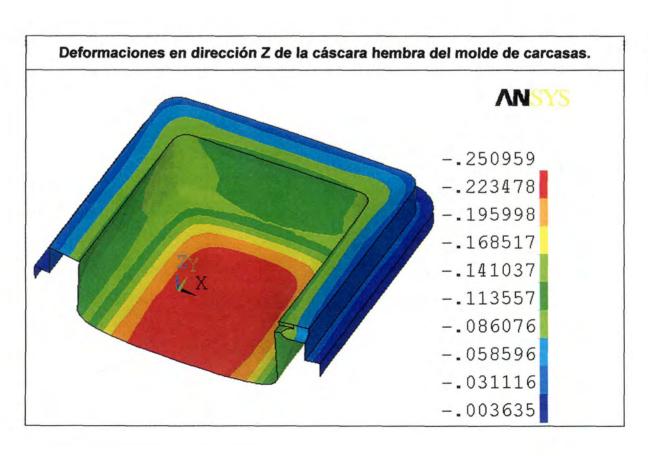


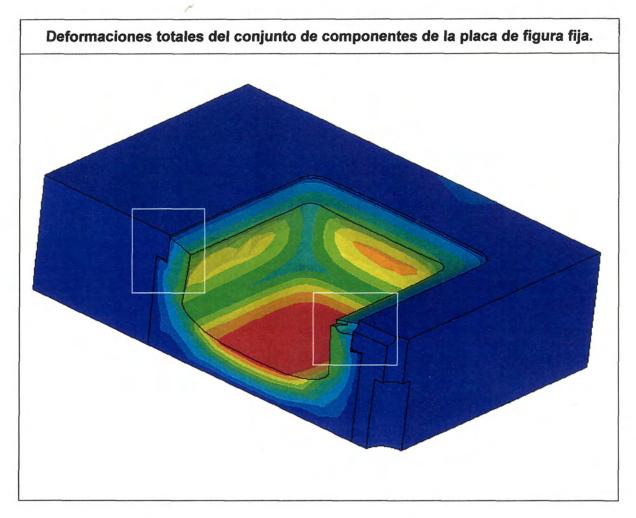


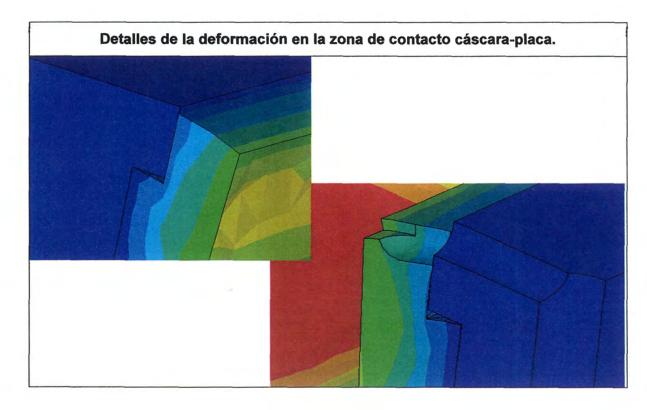


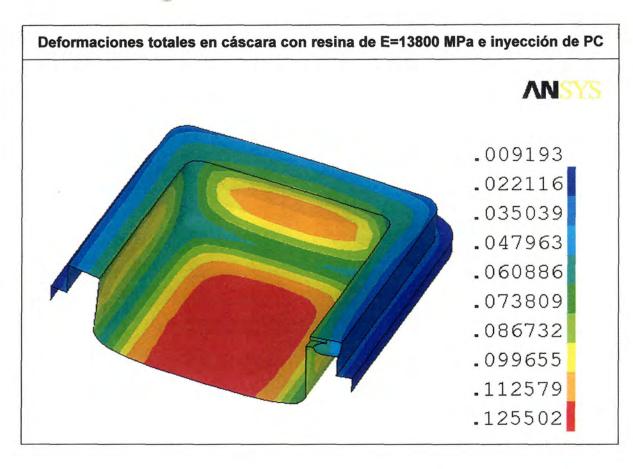


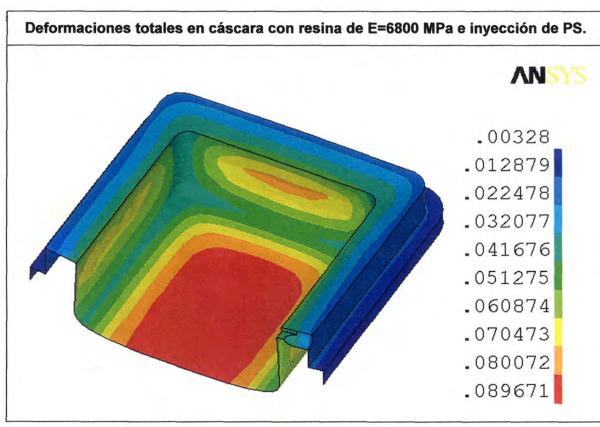


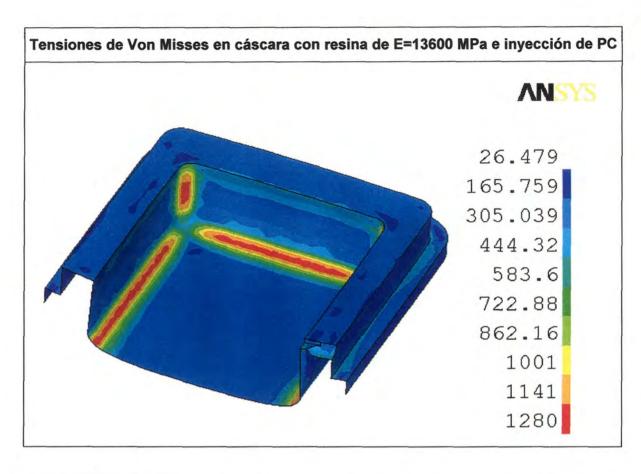


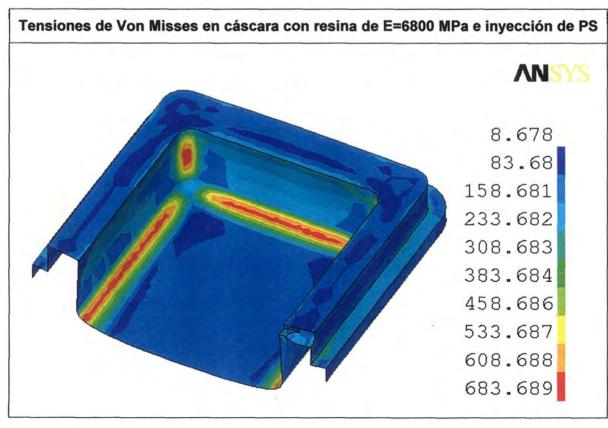


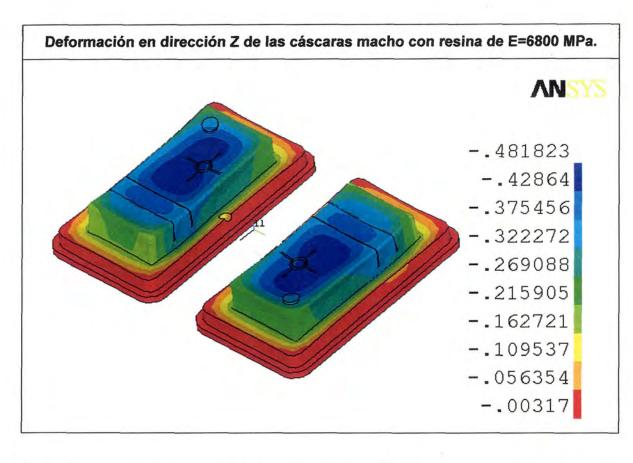


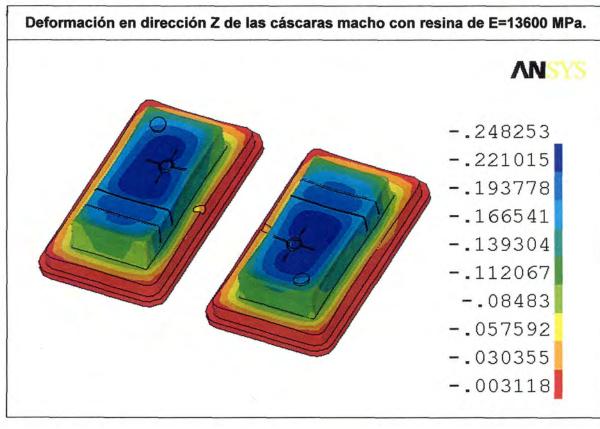


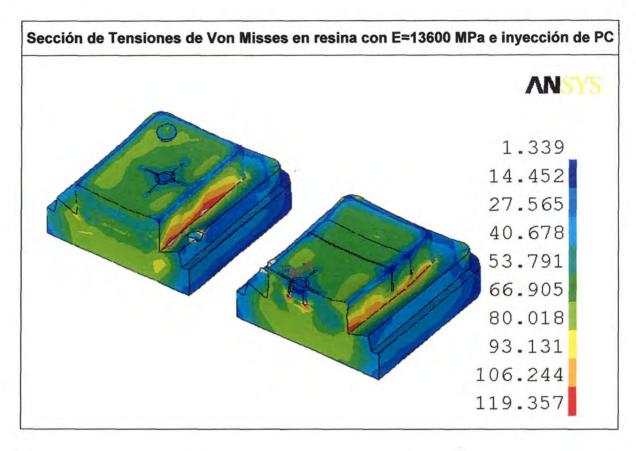


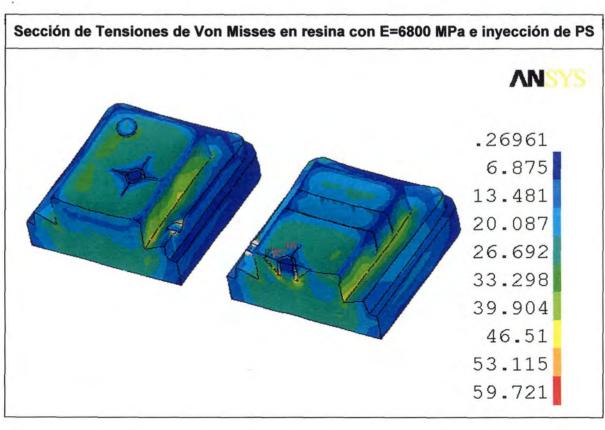












Anexo D GRÁFICAS MEDICIÓN

GRÁFICAS DE MEDICIÓN DIMENSIONAL.

MODELO ACABADO PARA CÁSCARA DE DOS CAVIDADES.

- Planitud cavidad probeta 1, Plano (4).
- Planitud cavidad probeta 2, Plano (10).
- Planitud total plano de partición, Plano (16).
- Planitud plano de apoyo, Plano (22).
- Planitud contorno plano de partición, Plano (27).
- Rectitud dirección longitudinal, Plano (46).
- Rectitud dirección transversal, Plano (53).

CÁSCARA DE DOS CAVIDADES.

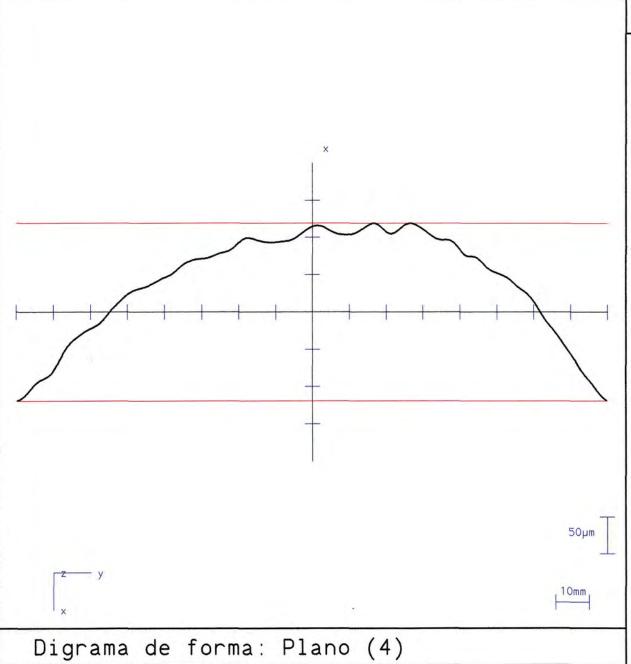
- Planitud cavidad probeta 1, Plano (4).
- Planitud cavidad probeta 2, Plano (9).
- Planitud total plano de partición, Plano (15).
- Planitud plano de apoyo, Plano (21).
- Planitud contorno plano de partición, Plano (27).
- Rectitud dirección longitudinal, Plano (45).
- Rectitud dirección transversal, Plano (50).

MODELO ACABADO PARA CÁSCARA DE UNA CAVIDAD.

- Planitud cavidad probeta, Plano (9).
- Planitud total plano de partición, Plano (20).
- Planitud plano de apoyo, Plano (33).

CÁSCARA DE UNA CAVIDAD.

- Planitud cavidad probeta, Plano (1).
- Planitud total plano de partición, Plano (1).
- Planitud plano de apoyo, Plano (9).



Rectitud

Oper: NIZARDO Fecha: 16.07.2003

Programa :

Hora: 13:02:41 Temperat: 24.41

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 712

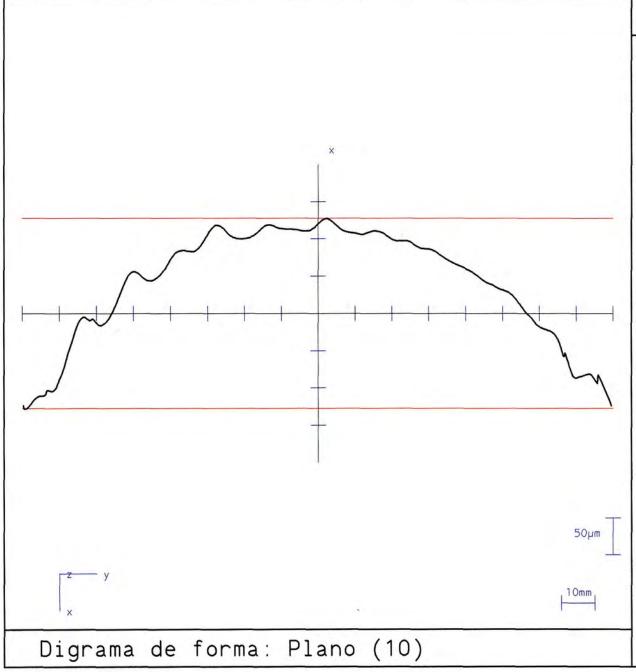
WTL: 8.0mm

Longitud : +152.8786mm

FMin : -0.1191mm FMax : +0.1191mm

t : +0.2382mm





Rectitud

Oper: NIZARDO Fecha: 16.07.2003

Programa :

Hora: 13:02:41 Temperat: 24.41

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 673

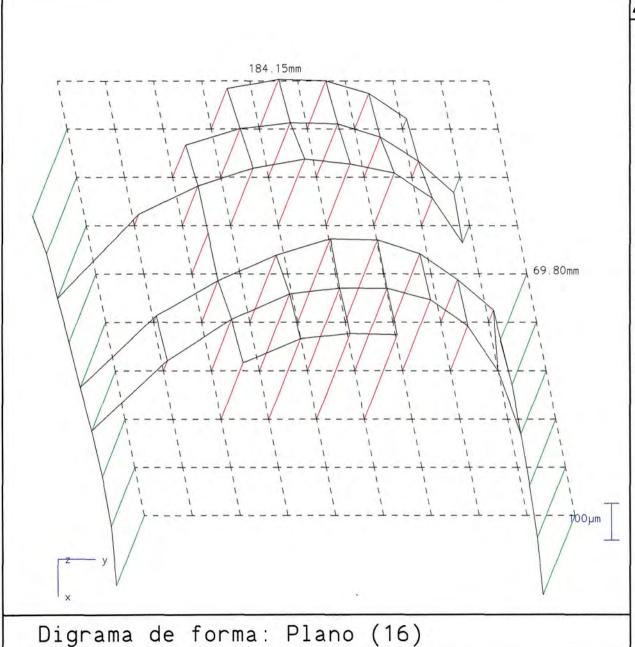
WTL: 8.0mm

Longitud : +154.2953mm

FMin : -0.1273mm FMax : +0.1273mm

t : +0.2546mm





Oper : NIZARDO

Fecha: 16.07.2003

Programa :

Hora: 13:02.41 Temperat: 24.41

Material : [0.000 ppm]

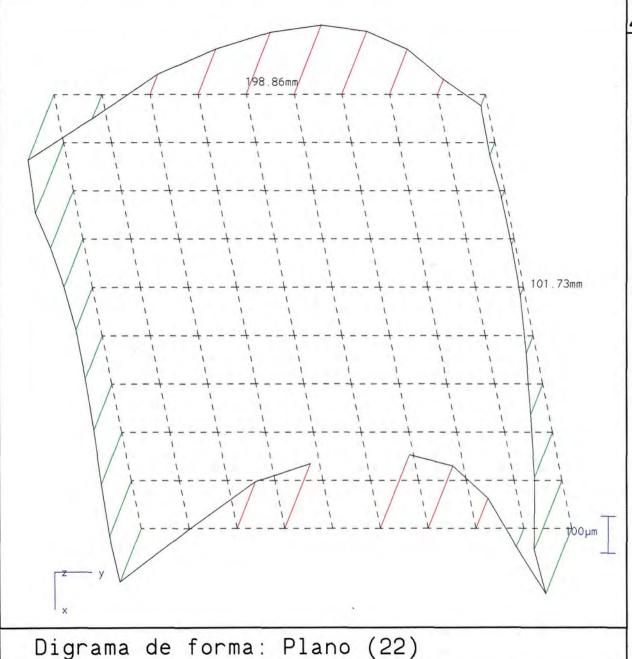
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 704 WTL : 8.0mm

FMin : -0.2344mm FMax : +0.2344mm t : +0.4689mm





Oper: NIZARDO Fecha: 16.07.2003

Programa :

Hora: 13:02:41 Temperat: 24.41

Material : [0.000 ppm]

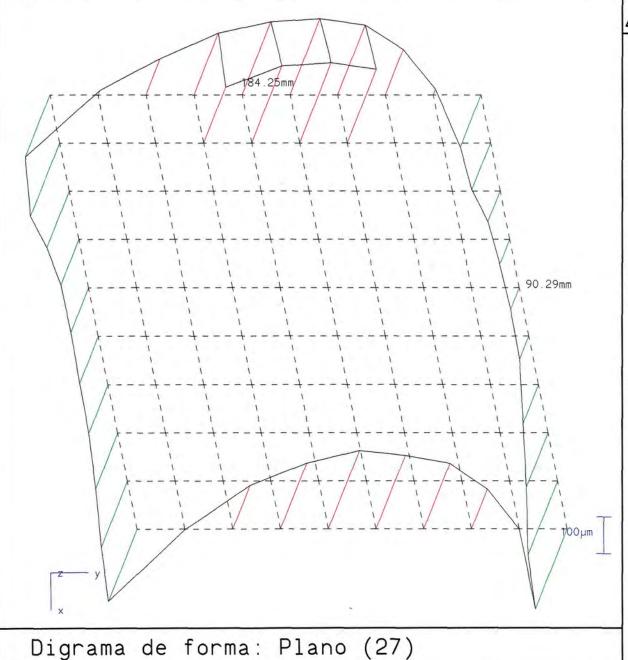
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 702 WTL : 8.0mm

FMin : -0.1996mm FMax : +0.1996mm t : +0.3993mm





Oper : NIZARDO

Fecha: 16.07.2003

Programa .

Hora: 13:02:41 Temperat: 24.41

Material : [0.000 ppm]

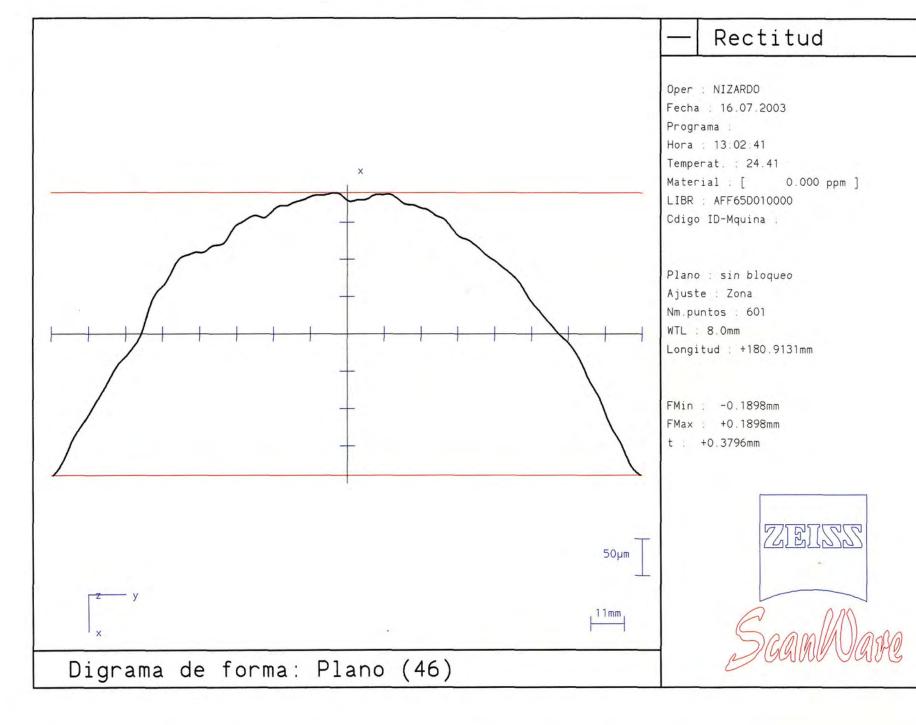
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

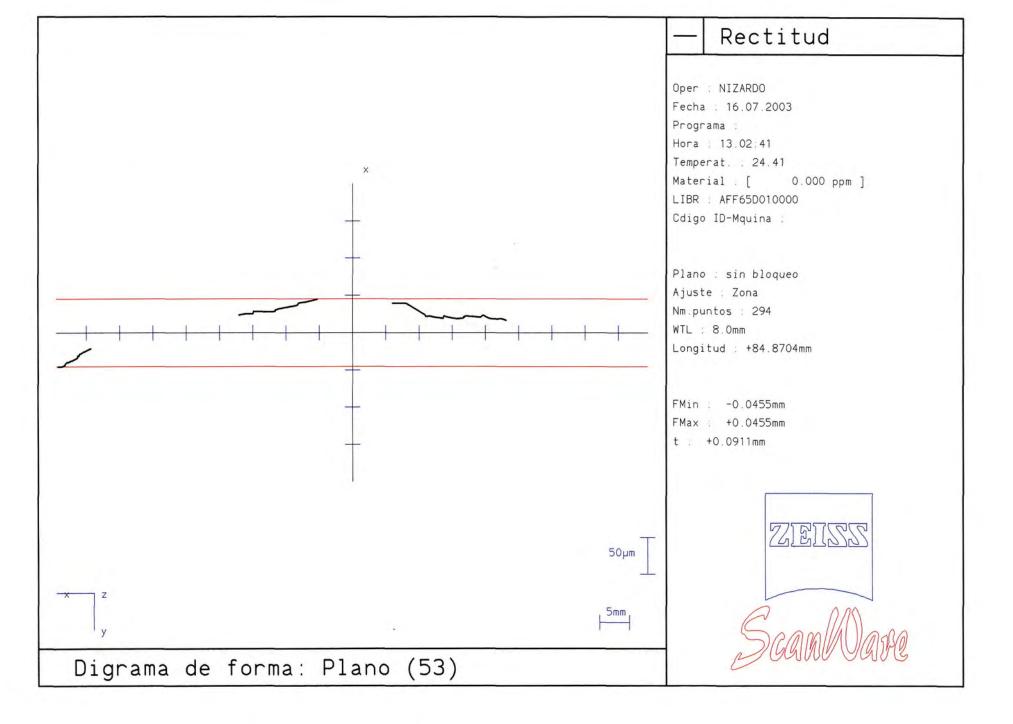
Plano . sin bloqueo

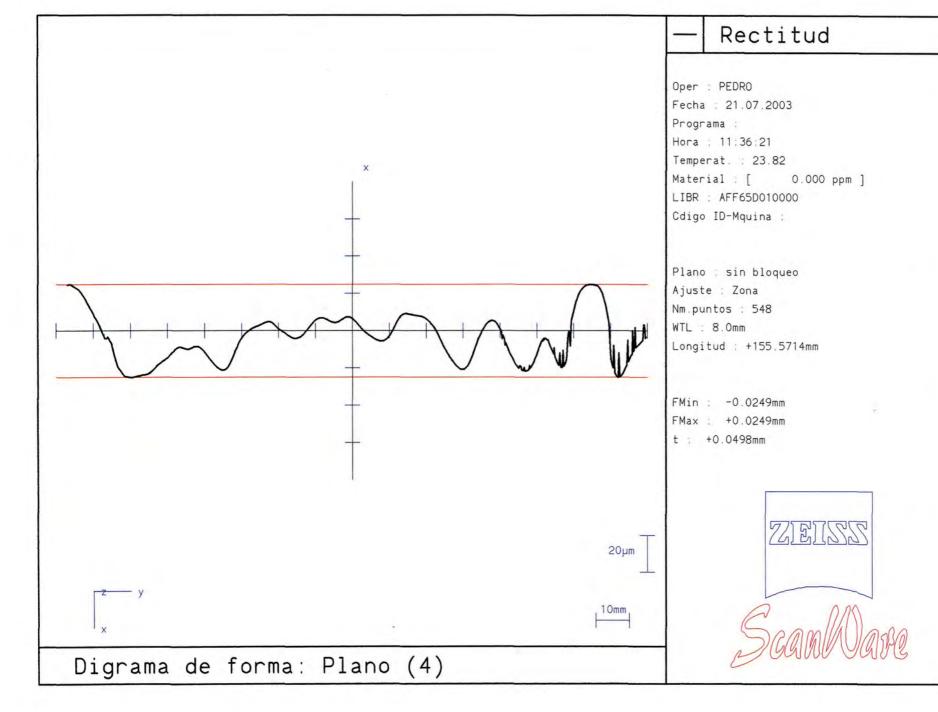
Ajuste : Zona Nm.puntos : 782 WTL : 8.0mm

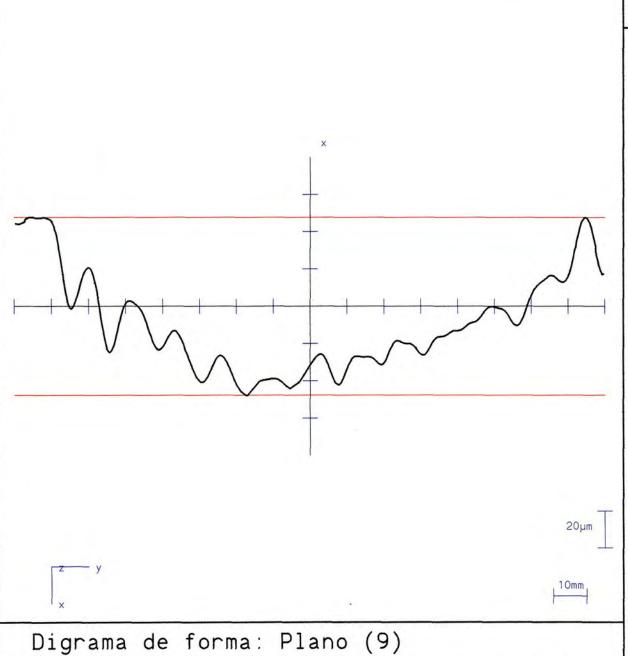
FMin : -0.2198mm FMax : +0.2198mm t : +0.4397mm











Rectitud

Oper : PEDRO

Fecha : 21.07.2003

Programa :

Hora: 11:36:21 Temperat: 23.82

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 683

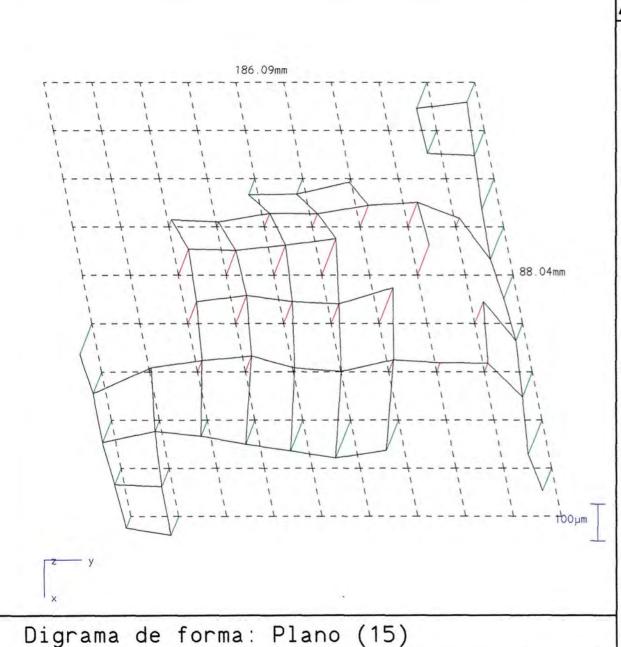
WTL: 8.0mm

Longitud : +153.2956mm

FMin : -0.0477mm FMax : +0.0477mm t : +0.0955mm



ScanWare



Oper : PEDRO

Fecha: 21.07.2003

Programa :

Hora : 11:36:21

Temperat.: 23.82

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000

Cdigo ID-Mquina :

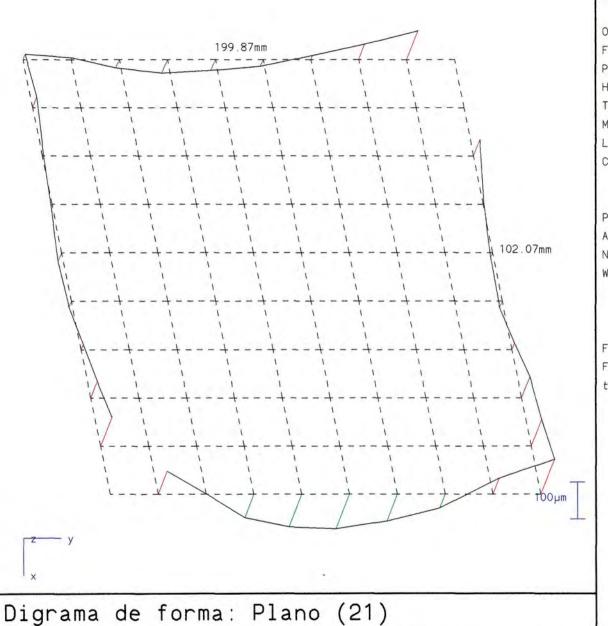
Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 625

WTL : 8.0mm

FMin : -0.1126mm FMax : +0.1126mm t : +0.2252mm





Oper : PEDRO

Fecha: 21.07.2003

Programa :

Hora : 11:36:21 Temperat : 23.82

Material : [0.000 ppm]

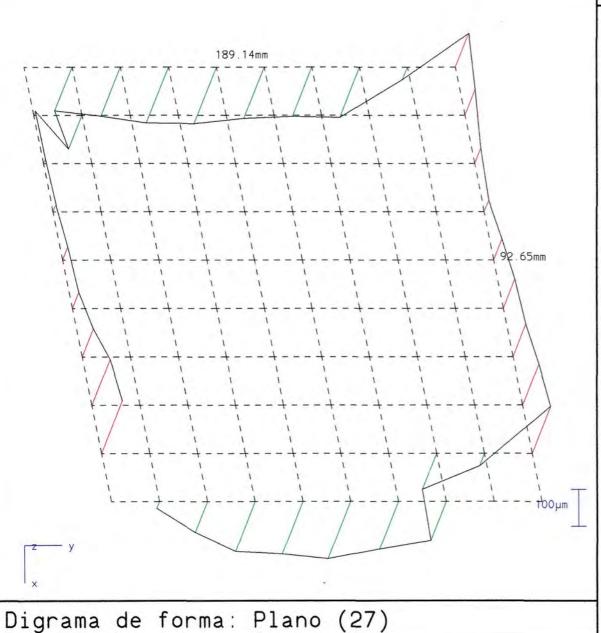
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 651 WTL : 8.0mm

FMin : -0.0950mm FMax : +0.0950mm t : +0.1900mm





Oper : PEDRO

Fecha: 21.07.2003

Programa :

Hora : 11:36:21 Temperat. : 23.82

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000

Cdigo ID-Mquina :

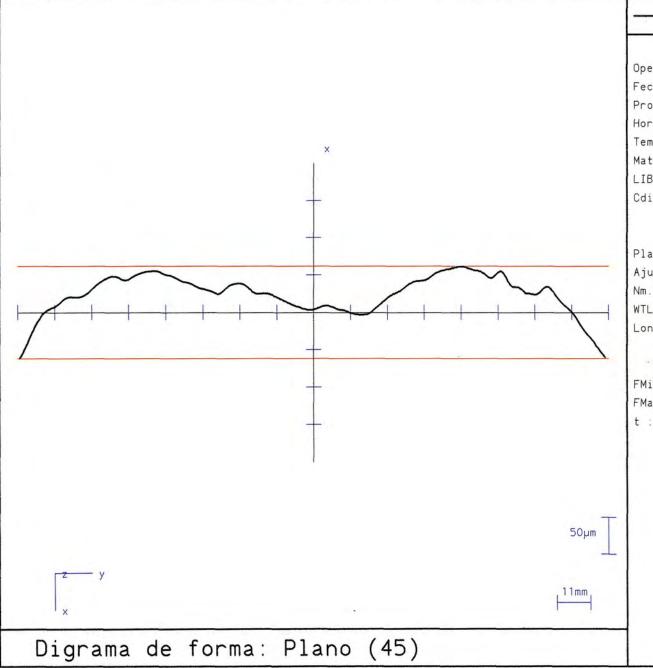
Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 753

WTL : 8.0mm

FMin : -0.1603mm FMax : +0.1603mm t : +0.3205mm





Rectitud

Oper : PEDRO

Fecha: 21.07.2003

Programa :

Hora: 11:36:21 Temperat: 23.82

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

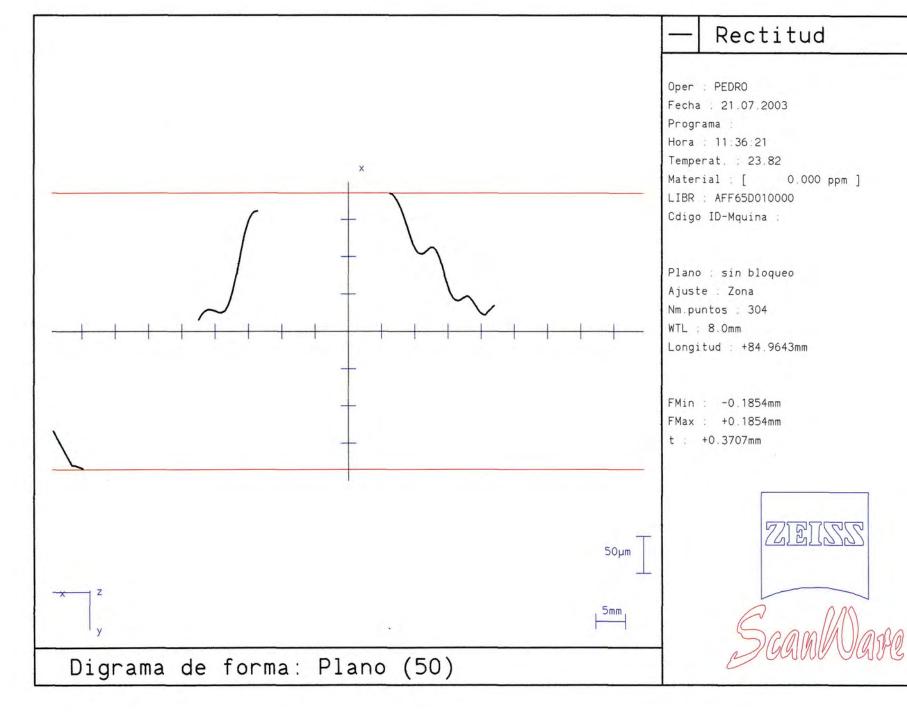
Ajuste : Zona Nm.puntos : 622

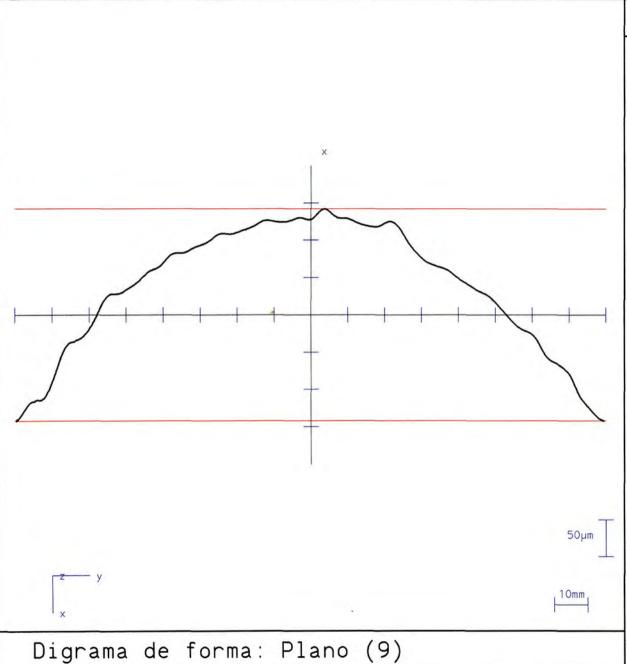
WTL : 8.0mm

Longitud : +173.5886mm

FMin : -0.0620mm FMax : +0.0620mm t : +0.1239mm







Rectitud

Oper . PEDRO

Fecha . 11.08.2003

Programa :

Hora: 09:48:05 Temperat: 23.96

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 717

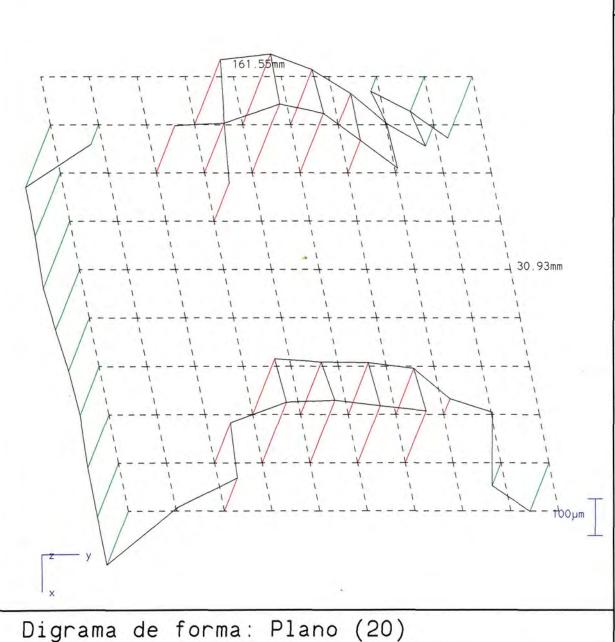
WTL: 8.0mm

Longitud : +153.4104mm

FMin : -0.1419mm FMax : +0.1419mm

t : +0.2839mm







Oper : PEDRO

Fecha : 11.08.2003

Programa :

Hora: 09:48:05 Temperat: 23.96

Material : [0.000 ppm]

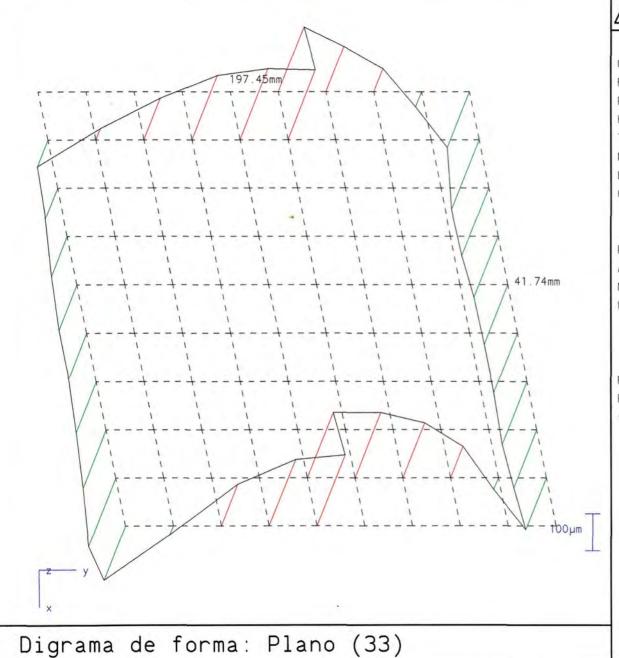
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 628 WTL : 8.0mm

FMin : -0.1900mm FMax : +0.1900mm t : +0.3800mm





7 Pl

Planitud

Oper : PEDRO

Fecha . 11.08.2003

Programa :

Hora: 09:48:05 Temperat: 23.96

Material : [0.000 ppm]

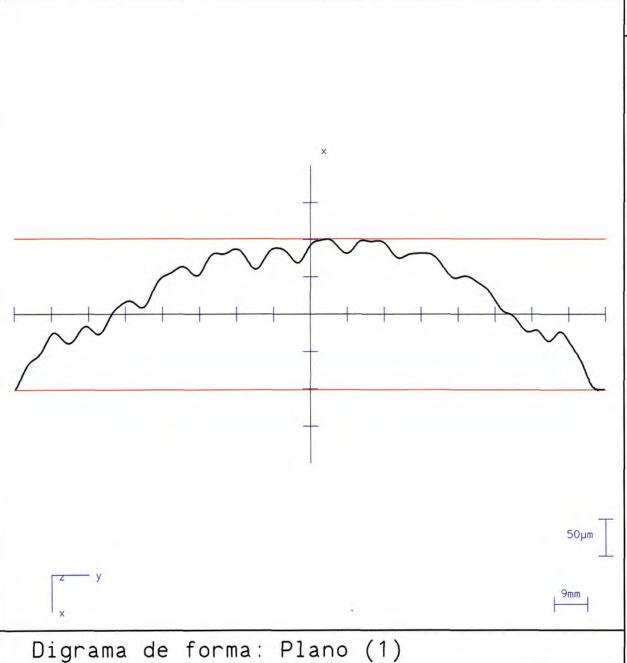
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 671 WTL : 8.0mm

FMin : -0.1934mm FMax : +0.1934mm t : +0.3869mm





Rectitud

Oper : PEDRO

Fecha . 26.08.2003

Programa :

Hora: 09:41:04 Temperat: 25.26

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

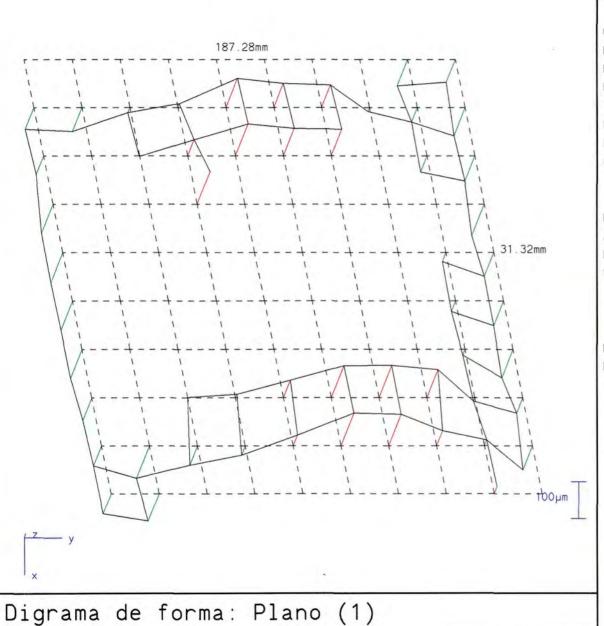
Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 692 WTL : 8.0mm

Longitud : +150.9723mm

FMin : -0.1011mm FMax : +0.1011mm t : +0.2022mm





Oper : PEDRO

Fecha: 26.08.2003

Programa :

Hora: 11:07:44 Temperat: 25.87

Material : [0.000 ppm]

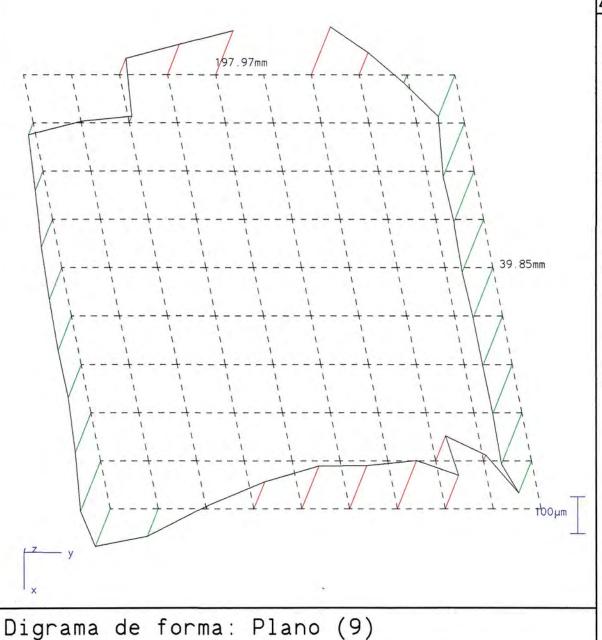
LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 680 WTL : 8.0mm

FMin : -0.0941mm FMax : +0.0941mm t : +0.1882mm





Oper : PEDRO

Fecha: 26.08.2003

Programa :

Hora: 11:07:44 Temperat: 25.87

Material : [0.000 ppm]

LIBR : AFF65D010000 Cdigo ID-Mquina :

Plano : sin bloqueo

Ajuste : Zona Nm.puntos : 688 WTL : 8.0mm

FMin : -0.1469mm FMax : +0.1469mm t : +0.2938mm



Anexo E

REGISTROS DE PRESIÓN EN CAVIDAD

© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Biblioteca Universitaria, 2006

REGISTROS DE PRESIÓN EN CAVIDAD.

SERIE CON POLIETILENO.

- Registro 1.
- Registro 2.
- Registro 3.
- Registro 4.

SERIE CON POLIESTIRENO.

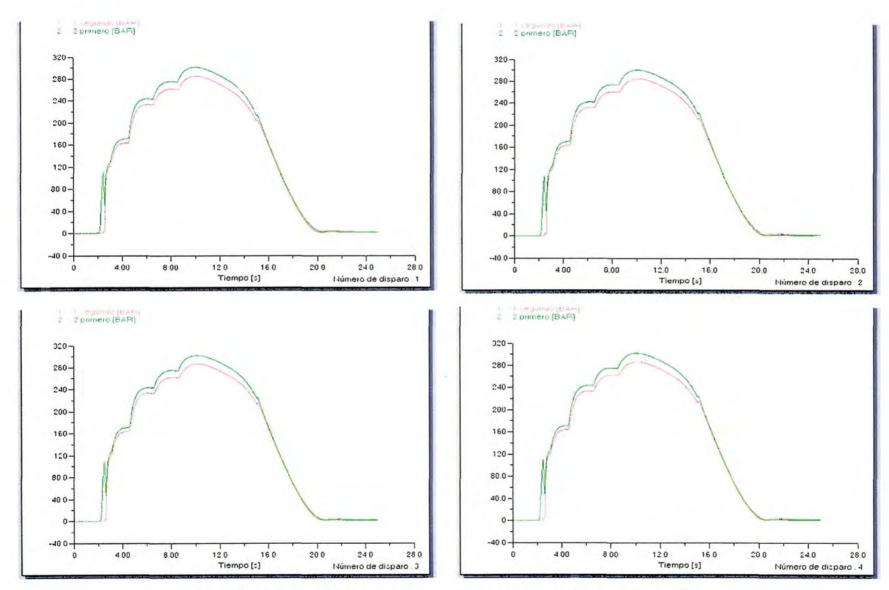
- Registro 1.
- Registro 2.
- Registro 3.
- Registro 4.

SERIE CON POLICARBONATO.

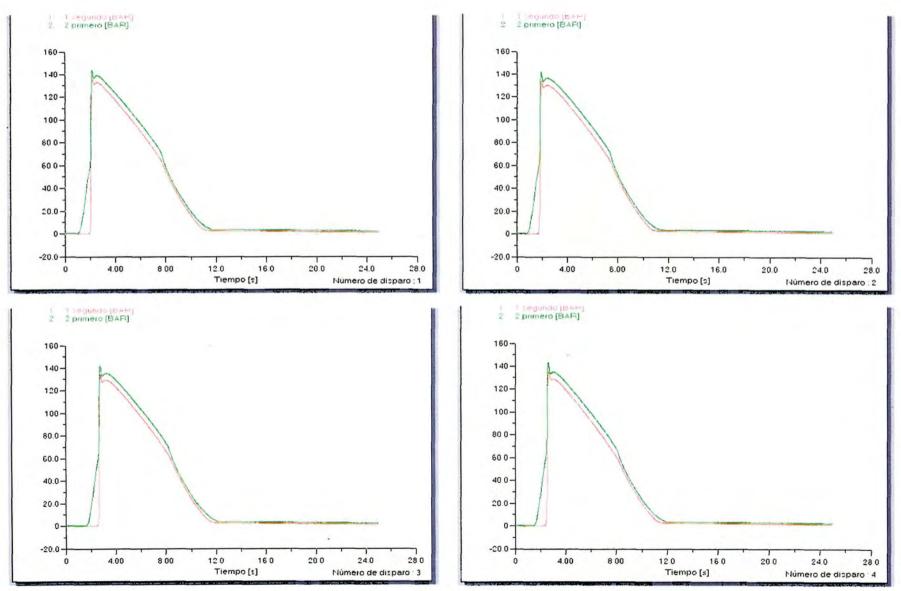
- Registro 1.
- Registro 2.
- Registro 3.
- Registro 4.

SERIE CON POLIAMIDA 6.

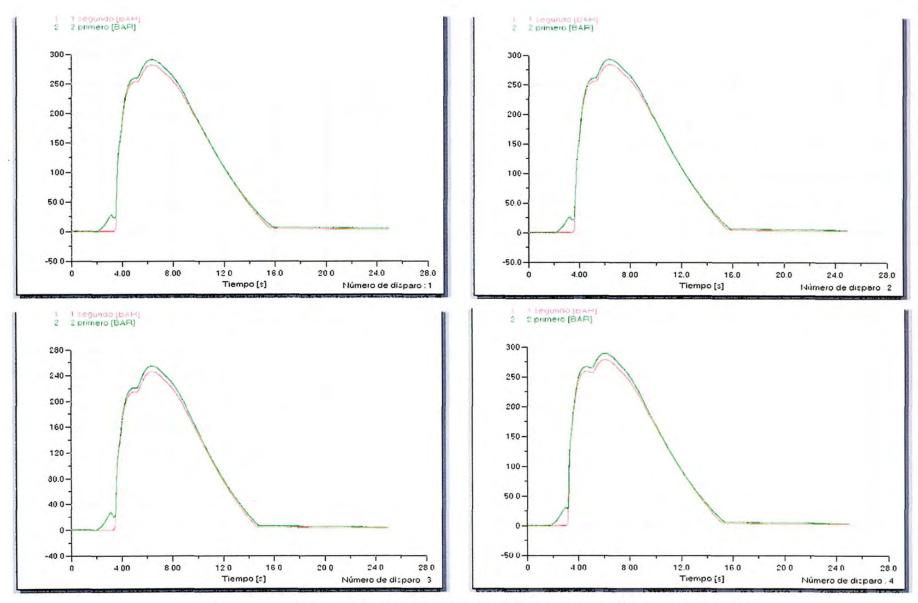
- Registro 1.
- Registro 2.
- Registro 3.
- Registro 4.



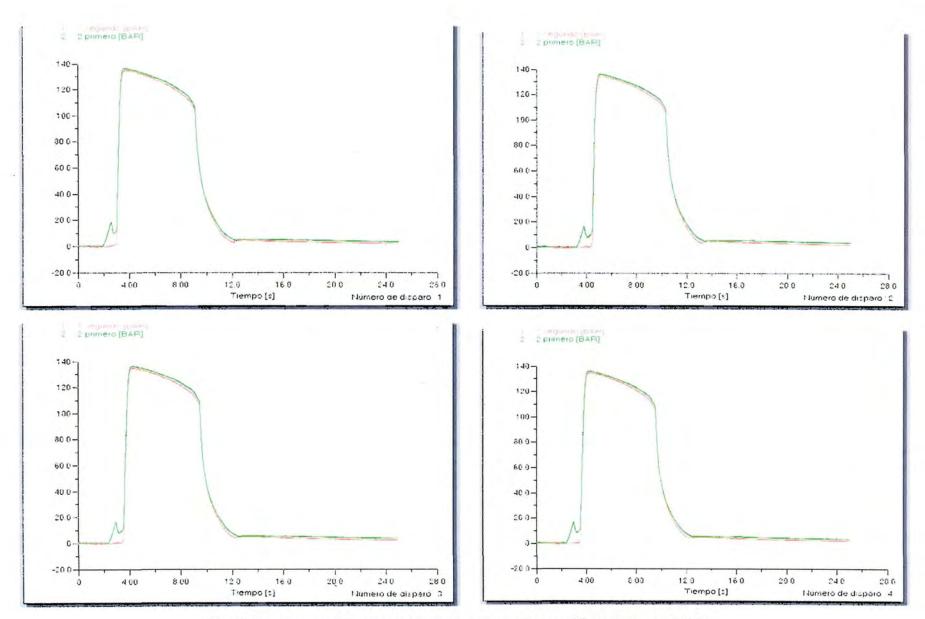
Registros de presión en cavidad de 4 inyecciones diferentes con PE.



Registros de presión en cavidad de 4 inyecciones diferentes con PS.



Regisros de presión en cavidad de 4 inyecciones diferentes con PC



Registros de presión en cavidad de 4 inyecciones diferentes con PA6

2 - H. D.C. Biblioteca Howeverland Distriction of the Part of the

Anexo F RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.

SERIE CON POLIETILENO.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

SERIE CON POLIESTIRENO.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

SERIE CON POLIAMIDA 6.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

SERIE CON POLICARBONATO.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

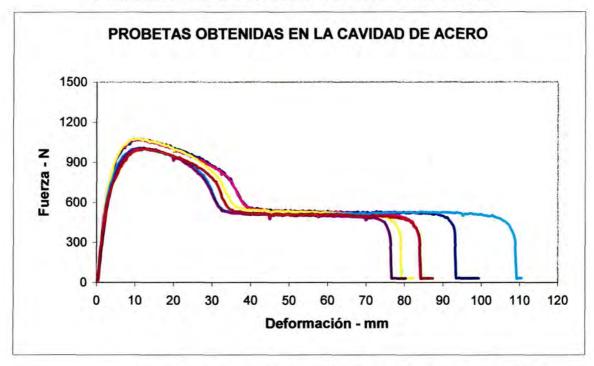
PRUEBAS DE EXIGENCIA CON POLIETILENO.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

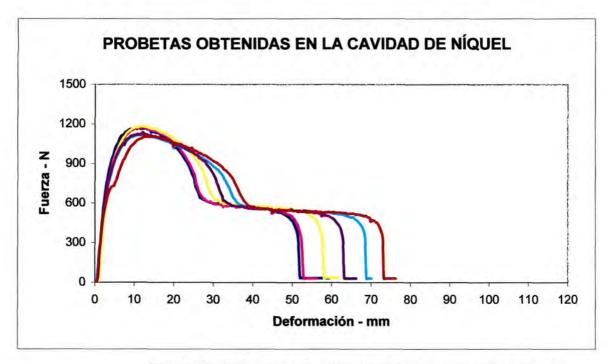
PRUEBAS DE EXIGENCIA CON POLICARBONATO.

- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de acero, mecanizada.
- Fuerza-Deformación de probetas generadas en la cavidad de níquel, inserto.
- Tensión-Deformación de las probetas generadas simultáneamente.

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PROBETAS DE PE. CONDICIONES DE SERIE.

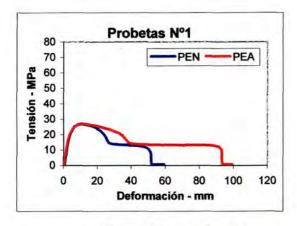


	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	1075	136,0%	27,15
Val. Mínimos	1002	95,5%	25,30



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	1184	91,2%	27,18
Val. Mínimos	1109	64,6%	25,46

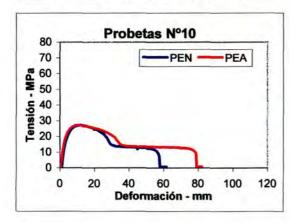
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.

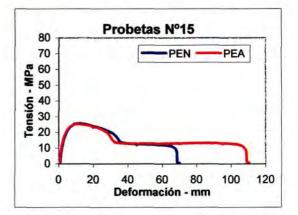


	80						71
7	70 -			P	EN -	PE	A
Tensión - MPa	60 -						1
Ξ,	50						
ê.	40 -						
IS!	30						
=	20 -	1	1				
10			Name and Address of the Owner, where				
P	10			1	1		i
P :	10	_				-	_

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1075	116,4%	27,15
C. NÍQUEL	1176	64,6%	27,00

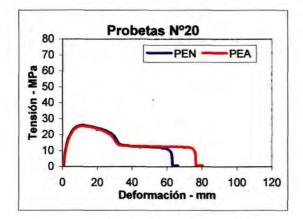
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1074	104,8%	27,12
C. NÍQUEL	1175	65,7%	26,97





	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1075	98,6%	27,15
C. NÍQUEL	1184	72,1%	27,18

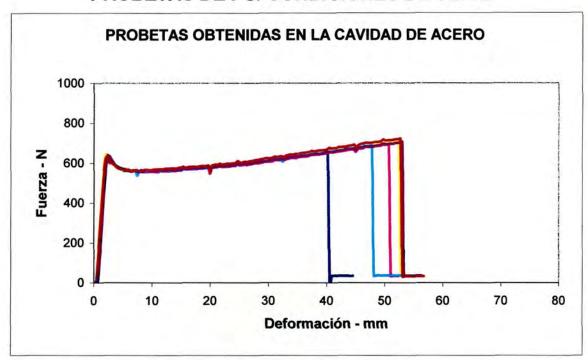
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1006	136,0%	25,40
C. NÍQUEL	1118	85,6%	25,67



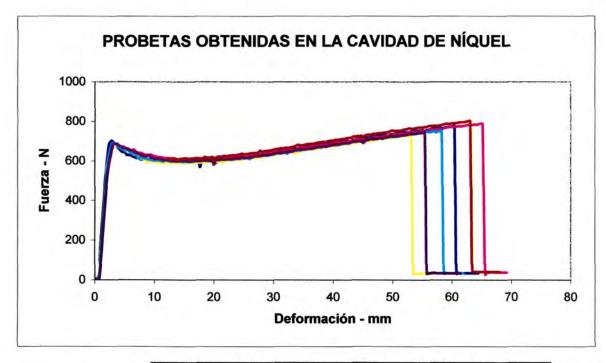
80						1
70 -			—PE	-N -	PEA	
₩ 60 -						- 1
60 − 50 −						1
5 40						- 1-
19 40 - 30 - 20 - 20 - 20 - 20						1
20		-				
10		_	_	7		1
0	-	1	-	_	-	_
0	20	40	60	80	100	120
		Defor	mación	- mm		

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1011	95,5%	25,53
C. NÍQUEL	1138	78,7%	26,12

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1002	104,9%	25,30
C. NÍQUEL	1109	91,2%	25,46

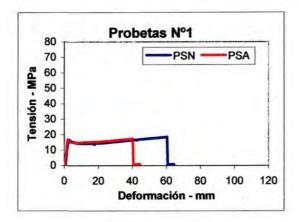


	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	722	66,3%	19,00
Val. Mínimos	661	50,2%	17,39



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	802	81,5%	19,10
Val. Mínimos	730	66,3%	17,38

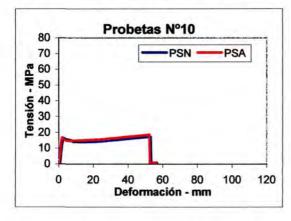
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.

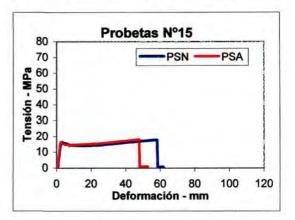


80		Probe				= 1
70 -			—F	SN -	PS	Α
6 60 −						1
₹ 50						
5 40						
2 30 -						1
30			_			
Tension - MP - 60 - 60 - 60 - 60 - 60 - 60 - 60 - 6	_	_	П			
30 20 10 0			П			

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	661	50,2%	17,39
C. NÍQUEL	777	75,5%	18,50

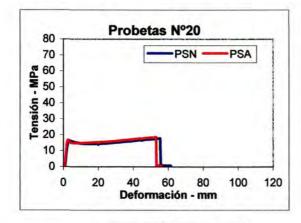
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	693	63,4%	18,24
C. NÍQUEL	789	81,5%	18,79

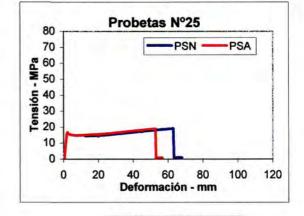




	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	708	65,4%	18,63
C. NÍQUEL	730	66,3%	17,38

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	687	59,7%	18,08
C. NÍQUEL	755	72,8%	17,98

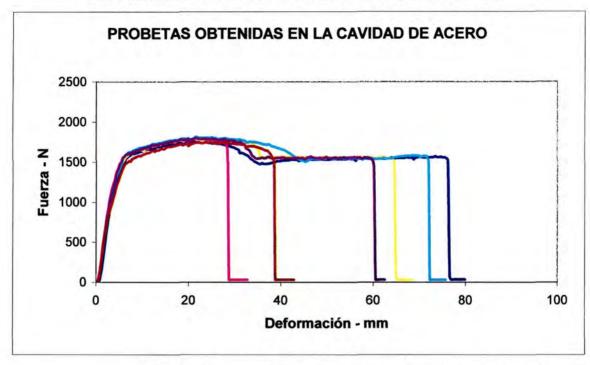




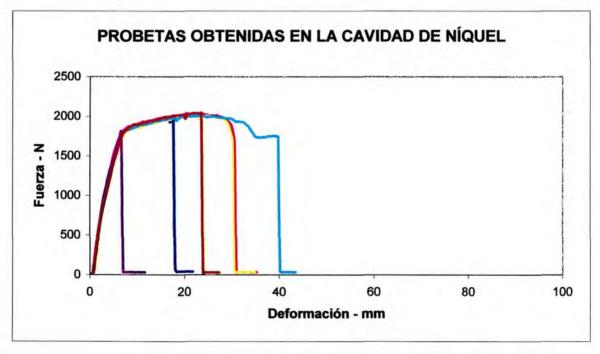
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	706	66,3%	18,58
C. NÍQUEL	746	69,3%	17,76

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	722	65,9%	19,00
C. NÍQUEL	802	78,8%	19,10

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PROBETAS DE PA6. CONDICIONES DE SERIE.

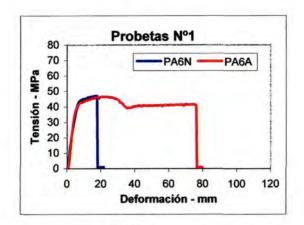


	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	1817	95,2%	48,30
Val. Mínimos	1751	35,6%	46,54



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	2042	49,7%	48,46
Val. Mínimos	1807	8,2%	42,88

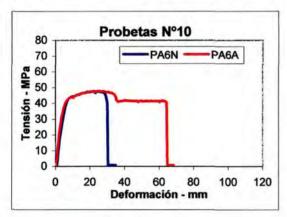
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.



	80	 Probe	W3 14		-	
	80 70		PA6N		PA6A	
	60 -					_
	50					
- u	40 /					
sid	30					
Leu	20 -					
	10 -					-
				-		_
	0				100	

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1752	95,2%	46,57
C. NÍQUEL	1983	22,0%	47,06

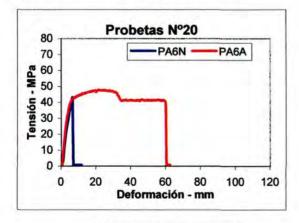
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1792	35,6%	47,63
C. NÍQUEL	2040	38,2%	48,41

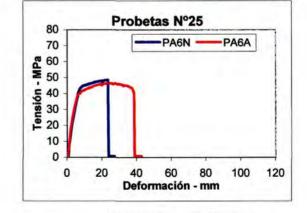


70		-	-PA6N	—	PA6A	
6 60						
≥ 50	-	T				
5 40		7		1		1
W 30						
30						i
Y 50 - W 50 - W 50 - W 20 - W 20 - 10 -						

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1798	80,5%	47,79
C. NÍQUEL	2007	37,7%	47,63

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1817	89,9%	48,30
C. NÍQUEL	2013	49,7%	47,77

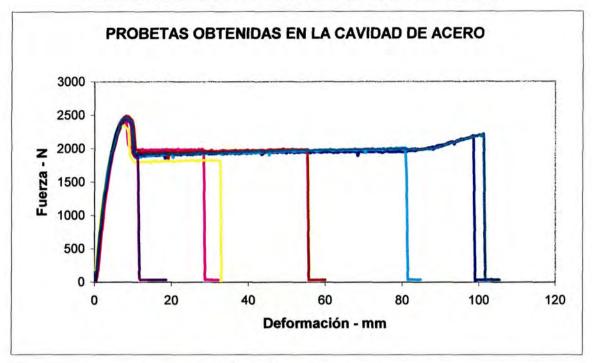




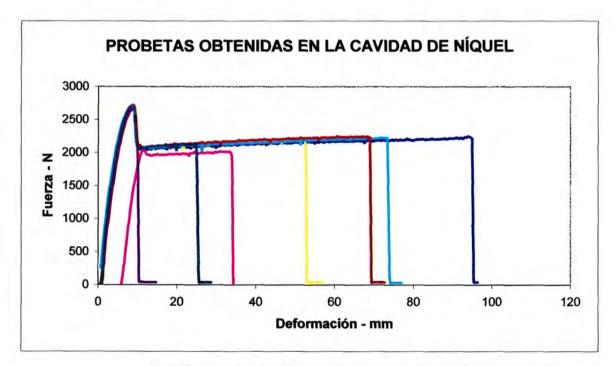
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1799	75,1%	47,82
C. NÍQUEL	1807	8,2%	42,88

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1751	48,1%	46,54
C. NÍQUEL	2042	29,4%	48,46

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PROBETAS DE PC. CONDICIONES DE SERIE.

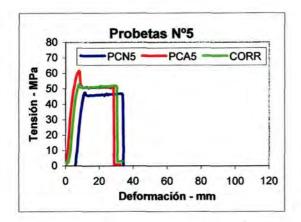


	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	2491	126,6%	63,87
Val. Mínimos	2343	14,1%	60,08



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	2717	118,7%	63,19
Val. Mínimos	2269	12,6%	52,77

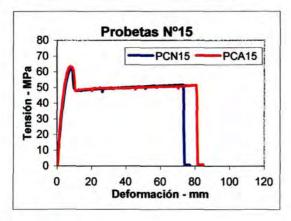
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.

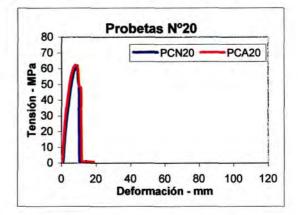


80 T	-					
70 -	-	-PCN1)	F	CA10	1
60	A					
₹ 50	/	-	2			ì
= 40		7				1
6 30			1			İ
	51		ı			1
ē 20 ·						
و 20 10 -		1				1
Lension - MPa 50 40 30 10			<u></u>	-		

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2401	35,5%	61,56
C. NÍQUEL	2050	42,4%	47,67

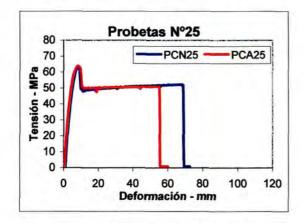
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2343	40,7%	60,08
C. NÍQUEL	2689	65,7%	62,53

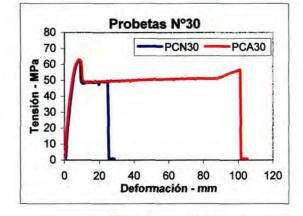




	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2475	100,9%	63,46
C. NÍQUEL	2679	91,8%	62,30

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2432	14,1%	62,36
C. NÍQUEL	2666	12,6%	62,00

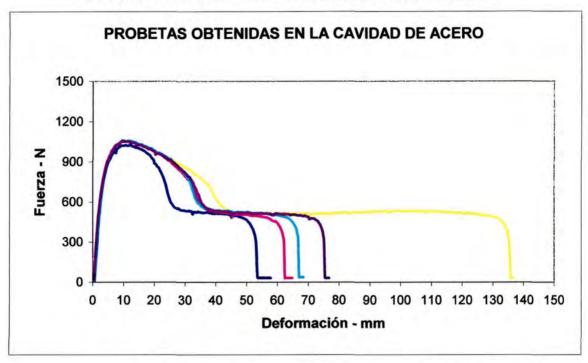




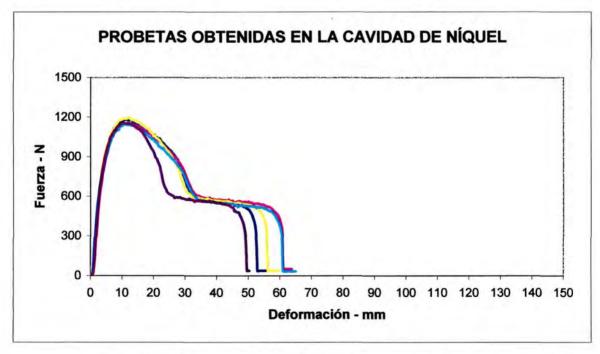
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2491	69,2%	63,87
C. NÍQUEL	2717	86,2%	63,19

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2466	126,6%	63,23
C. NÍQUEL	2704	31,2%	62,88

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PROBETAS DE PE. PRUEBAS DE EXIGENCIA.

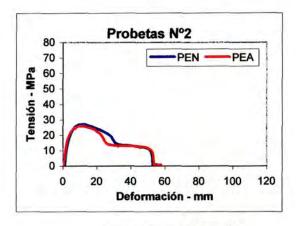


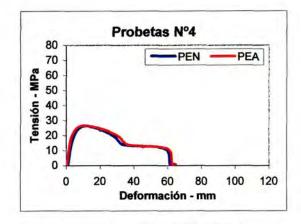
	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	1062	169,2%	26,82
Val. Mínimos	938	66,4%	23,69



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	1200	75,9%	27,55
Val. Mínimos	1148	61,6%	26,35

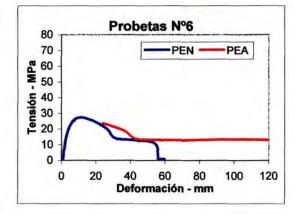
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.

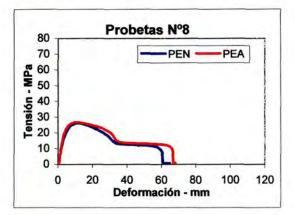




	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)	
C. ACERO	1032	66,4%	26,06	
C. NÍQUEL	1185	65,8%	27,20	

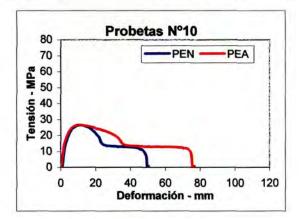
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1057	77,7%	26,69
C. NÍQUEL	1153	75,9%	26,47





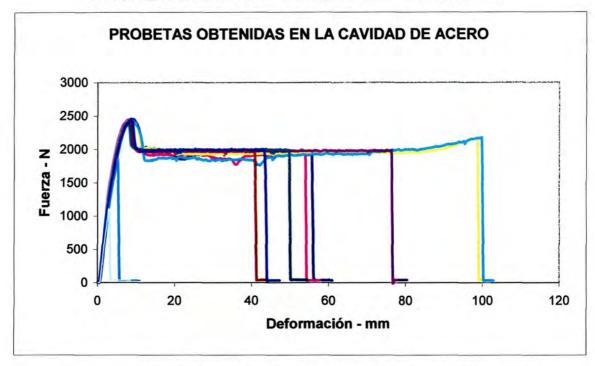
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	938	169,2%	23,69
C. NÍQUEL	1200	69,7%	27,55

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1062	83,3%	26,82
C. NÍQUEL	1148	75,8%	26,35

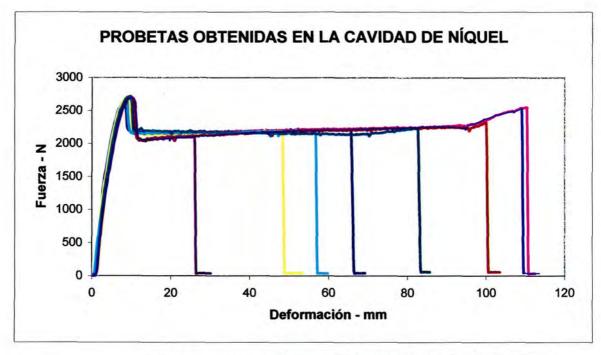


	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	1055	93,9%	26,64
C. NÍQUEL	1155	61,6%	26,52

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PROBETAS DE PC. PRUEBAS DE EXIGENCIA.

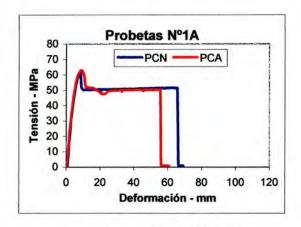


	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	2456	124,7%	64,21
Val. Mínimos	2378	51,1%	60,97



	Fuerza máx. (N)	Elongación máx. (%)	Tensión máx. (MPa)
Val. Máximos	2718	125,1%	63,21
Val. Mínimos	2651	32,6%	61,65

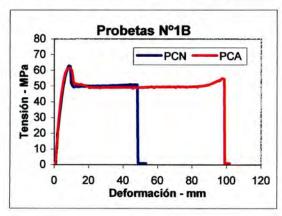
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS PROBETAS INYECTADAS EN EL MISMO MOMENTO.

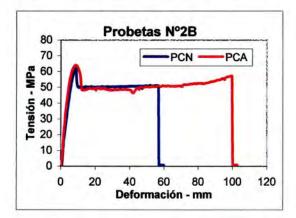


80			robet	a5 IV			
70	+ E	-	-PCN		_	PCA	
₩ 60 50	^						1
₹ 50	1/	_	~	1			
40 30 20	1						
2 30	1			1			
•	1			1			
10	1						
0	-	-1	- 1	-	-1	-	-
	0	20	40	60	80	100	120

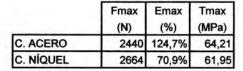
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2456	69,5%	62,97
C. NÍQUEL	2651	82,2%	61,65

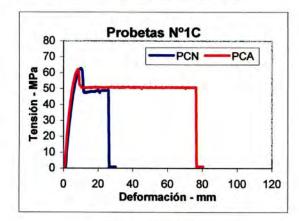
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2445	67,4%	62,69
C. NÍQUEL	2682	138,1%	62,37





	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2433	123,3%	61,77
C. NÍQUEL	2701	60,3%	62,81

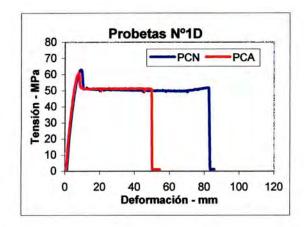


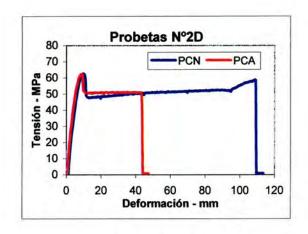


	70 -	1		—-Р	CN —	-PCA	
Tensión - MPa	50 -		-			-1	1
Ę,	10						1
usi (30 -						1
Ē 2	20 -		- 1				1
	10					_ [
	0	- 1	-	-	1	-	-
	0	20	40	60	80	100	120

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2421	95,4%	62,08
C. NÍQUEL	2695	32,6%	62,67

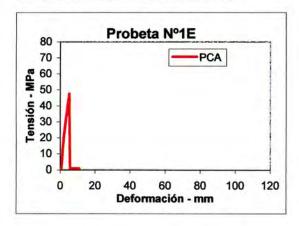
	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2402	51,1%	63,21
C. NÍQUEL	2718	125,1%	63,21





	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2378	62,2%	60,97
C. NÍQUEL	2709	103,3%	63,00

	Fmax (N)	Emax (%)	Tmax (MPa)
C. ACERO	2435	54,6%	62,44
C. NÍQUEL	2699	136,4%	62,77



80 T		Probe	ta Nº	2E		
70 -			-	-PC	A	1
50 - 40 - 30 - 20 -						-
₹ 50 -						1
5 40						1
30						Ì
2 0 -						- 1
10						1
0	-	-	1	-	-	
0	20	40	60	80	100	120
		Defor	mación	- mm		

	Fmax	Emax	Tmax
	(N)	(%)	(MPa)
C. ACERO	1850	6,5%	47,44

	Fmax	Emax	Tmax
	(N)	(%)	(MPa)
C. ACERO	1103	3,7%	28,28

