

Tecnologías de fabricación rápida. Optimización y mejora de la tecnología de mecanizado rápido-Coproinmold

*Milton Caba Salcedo^{a, *}, Esther Serres Moliner^b*

(Recibido el 1.º de marzo de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

- a Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, ETSEIB-UPC. Avenida Diagonal 647. CP. 08028. Departamento de Ingeniería Mecánica. Laboratorio de Tecnología de Fabricación.
- b ASCAMM PLUS, Servicios Tecnológicos S. L., Applus + Materiales y Procesos Industriales. Campus Universidad Autónoma de Barcelona. A. C. 18. C. P. 08193. Barcelona, España.

Resumen

La producción de piezas físicas directamente de modelos CAD, se considera un método importante de reducción de los costos y el tiempo de fabricación de nuevos productos. Las técnicas de prototipado rápido son una forma de producir modelos conceptuales de forma rápida y sencilla. Se denomina mecanizado rápido, al método de fabricación rápida de utillajes en general, para obtener series pequeñas y medianas de piezas. En esta contribución se describe el estudio de la optimización de la tecnología de mecanizado rápido Coproinmold para la obtención de moldes para la inyección de piezas plásticas.

----- *Palabras clave:* prototipado rápido, mecanizado rápido, estereolitografía, Coproinmold.

Rapid manufacturing technologies. Part 1: Optimization and improvement of rapid tooling technology-Coproinmold

Abstract

Making pieces directly from a CAD model is considered an important method for reduction of production time and manufacturing costs of new products. Rapid prototyping techniques are a way of producing conceptual models in a quick and simple fashion. Rapid tooling is the method of producing tools of general use, aimed specifically at obtaining small and medium series of pieces. This article studies the optimization of Coproinmold technology for obtaining molds for plastic injection.

----- *Key words:* rapid prototyping, rapid tooling, stereolithography, Coproinmold.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +34+93 405 40 14, fax: +34+93 567 20 01, Correo electrónico: milton.fabian.coba@upc.edu (M. Caba Salcedo).

Introducción

El prototipado rápido puede ser definido como un conjunto de técnicas usadas en la fabricación de modelos a escalas de una parte o conjunto de partes, usando datos de diseño asistido por computador CAD [1].

Las técnicas de prototipado rápido (*en inglés Rapid Prototyping —RP—*) pueden ser divididas en dos grandes líneas de acuerdo con el estado del material del prototipo antes de la formación de la pieza, aquellas que involucran tecnología por aportación de material, y por sustracción de material (figura 1) [2]. Hay un número diferente de técnicas de prototipado rápido que se pueden utilizar para producir modelos y partes funcionales.

Las tecnologías más difundidas en la actualidad son [3]:

- *SLA. Estereolitografía.* Emplea un láser UV (ultravioleta) que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida para polimerizarla. También la podemos encontrar con la denominación de STL.
- *FDM. Deposición de hilo fundido.* Una boquilla que se mueve en el plano XY horizontal deposita un hilo de material a 1 °C por debajo de su punto de fusión. Este hilo solidifica inmediatamente sobre la capa precedente.

- *SLS. Sinterización selectiva láser.* Se deposita una capa de polvo, de unas décimas de mm, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO₂ sinteriza el polvo en los puntos seleccionados.
- *LOM. Fabricación por corte y laminado.* Una hoja de papel encolado se posiciona automáticamente sobre una plataforma y se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.
- *DSPC. Proyección aglutinante.* Esta tecnología trabaja mediante la deposición de material en polvo en capas y la mezcla selectiva del mismo mediante la impresión de “chorro de tinta” de un material aglutinante.

Muchos de estos métodos pueden ser aplicados también para la manufactura de prototipos y la producción de piezas. El mecanizado rápido (*en inglés Rapid Tooling —RT—*) es una extensión del prototipado rápido. Se originó de la necesidad de mejorar modelos de prototipado en términos de su rendimiento [4]. El mecanizado rápido se hace cada día más popular en la fabricación no solo como una alternativa al prototipado rápido, sino especialmente en la producción de series cortas en las que no se justifica una inversión en máquinas de mecanizado convencional [5].

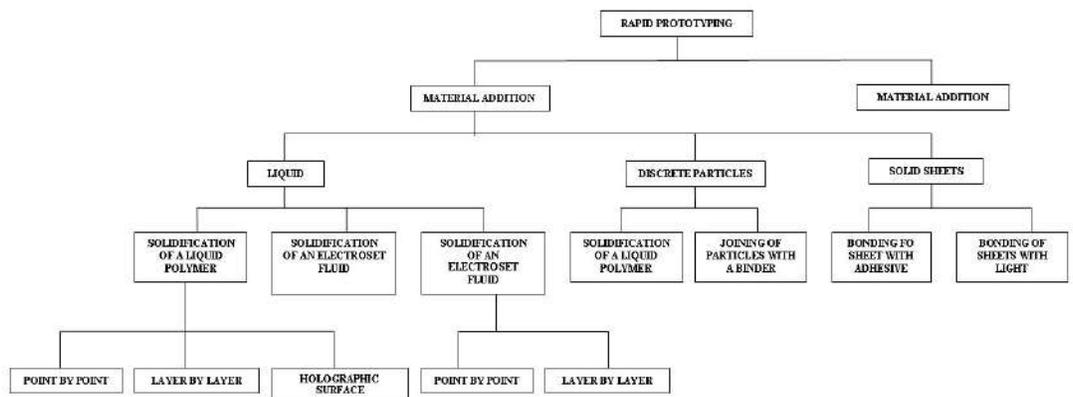


Figura 1 Clasificación de métodos de prototipado rápido [2]

Varias tecnologías de mecanizado rápido están disponibles en la industria (figura 2). Algunas de estas tecnologías producen directamente la pieza desde el proceso de prototipado rápido (*mecanizado directo* o *direct tooling*). Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de mecanizado rápido usan el modelo creado por el proceso de prototipado como un proceso secundario de producción de la pieza (*mecanizado indirecto* o *indirect tooling*) [7].

La tecnología Coproinmold ha sido desarrollada por la empresa del mismo nombre. Está clasificada como una tecnología de mecanizado rápido del tipo mecanizado indirecto, pues el negativo del modelo que se va a generar se elabora por métodos de prototipado rápido. Mientras que la tecnología de sinterizado selectivo por láser es una tecnología de prototipado del tipo mecanizado directo ya que las piezas son generadas directamente desde un fichero CAD.

Bases del estudio

Este artículo presenta parte de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación técnica sobre la optimización y mejora de la tecnología de mecanizado rápido Coproinmold. La tecnología Coproinmold consiste básicamente en el proceso de deposición electrolítica de capas metálicas, sobre un prototipo de estereolitografía que hace las veces de negativo del molde que se va a generar. La elección de utilizar esta tecnología vino condicionada básicamente por el bajo costo y la rapidez de obtención de los insertos, en comparación con los métodos convencionales de mecanizado para la fabricación de moldes prototipo. Aunque dicha tecnología estaba dando muy buenos resultados en calidad, costo y tiempo de ejecución, a medida que se fueron fabricando insertos metálicos para diferentes tipos de pieza, aparecieron también, en algunos casos, problemas que condicionaron el éxito de la aplicación. Estos problemas se cen-

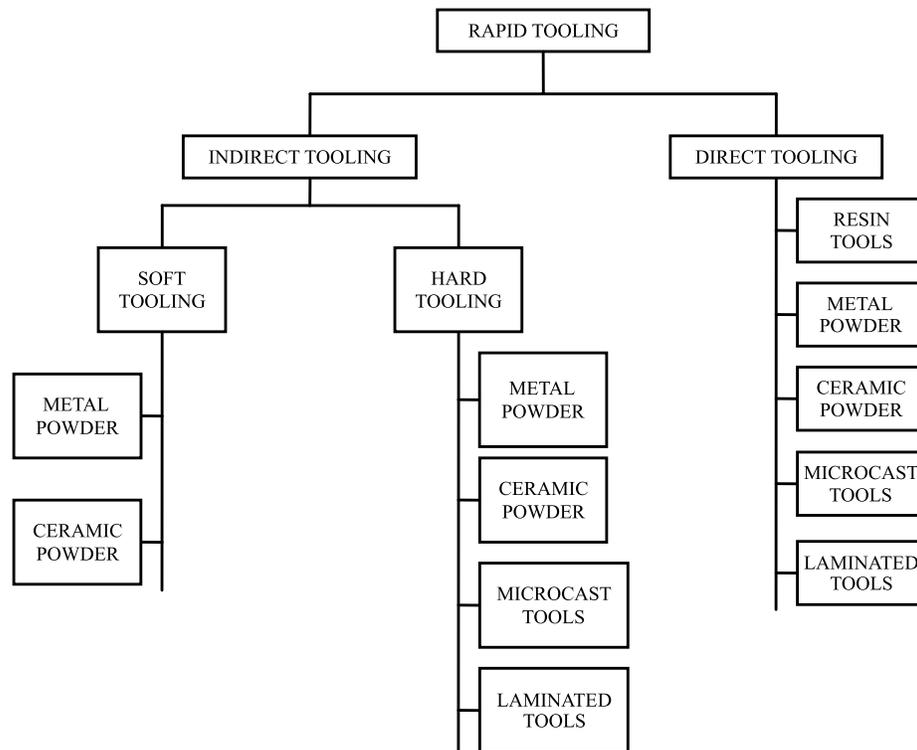


Figura 2 Clasificación de los métodos de mecanizado rápido (RT) [6]

traban en la calidad superficial y dimensional de las piezas inyectadas, el número de piezas que se podían inyectar con cada molde y el tiempo de ejecución total del proceso. La calidad de la pieza, medida básicamente en precisión tanto dimensional como superficialmente, se veía afectada por:

- Contracciones y deformaciones en diferentes partes del proceso de obtención de los insertos.

La durabilidad del molde prototipo dependía de:

- La presión y temperatura de inyección.
- La dureza y grueso de las capas metálicas.
- Resistencia del material del núcleo.
- Adherencia entre las capas de los materiales metálicos y del núcleo.

El tiempo de ejecución total del proceso dependía en mayor parte de:

- El tiempo empleado en el diseño 3D tanto de los insertos como de las distintas partes del molde.
- El tiempo de deposición para la obtención de las capas metálicas con el espesor necesario en cada caso.

En este artículo se analiza la influencia de algunos parámetros importantes del proceso, sobre la calidad del inserto, para que a partir de los modelos en CAD de la pieza que se va a obtener, se puedan definir los parámetros y los valores óptimos para el proceso.

Descripción de la tecnología Coproinmold

El proceso de metalización de la piel de impronta metálica para crear moldes de inyección, consiste básicamente en generar una capa metálica a partir de un negativo en estereolitografía (modelado en CAD) de la pieza diseñada, por la electrodeposición en un baño de níquel y otro de cobre.

El proceso se realiza en dos fases; primero se sumerge el prototipo ya preparado en un baño de níquel sulfatado durante los días especificados para que se produzca la electrodeposición de la capa metálica de níquel, y una vez cumplido este tiempo se pasa a un baño de cobre ácido durante unos días para que se lleve a cabo la electrodeposición de la capa de cobre; de esta forma se obtiene la piel de impronta metálica.

Para esto hay que realizar con antelación una serie de tareas para poner en marcha el proceso, las cuales, tienen que ver con la puesta a punto de los baños y la preparación de los prototipos, pues estos requieren unas condiciones especiales de preparación para su correcto desempeño. En la preparación de los prototipos para la metalización, también necesitan enlazarse mediante un electrodo, los ánodos que conducen la corriente, para que se realice la reacción electrolítica. Para esto se introduce el cable eléctrico que va adherido a la superficie del inserto, del mismo modo se recubren los insertos con una capa metálica de plata que ayudan a crear la electrodeposición sobre la superficie que nos interesa (figura 3).

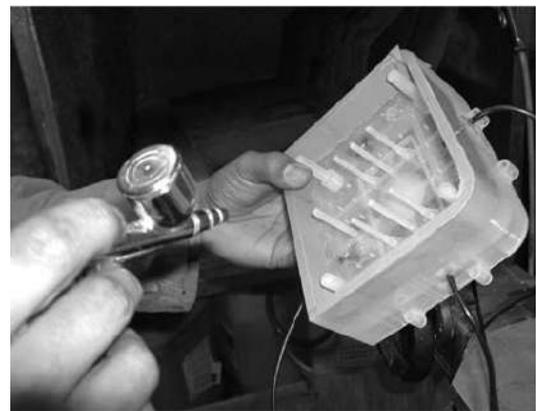


Figura 3 Preparación de un inserto

Una vez preparados los insertos, se fijan sobre plataformas para sumergirlos en los baños, donde permanecen durante el tiempo para que se produzca la deposición de la piel metálica (figura 4).



Figura 4 Baño de níquel sulfatado

En el baño de níquel se tiene una solución compuesta de níquel metálico, ácido sulfámico, ácido bórico, disuelto en aproximadamente 500 L de agua destilada, a la cual se le agregan constantemente aditivos para mantener su pureza y concentración en unos niveles óptimos para su trabajo. Las principales variables que se controlan en el baño de níquel son el pH, la densidad y la presencia de contaminante e impurezas, esto último es un aspecto fundamental pues afecta directamente el funcionamiento del baño, es decir la electrodeposición de la capa de níquel.

En cuanto al baño de cobre ácido, se trata de una solución que contiene sulfato de cobre, ácido sulfúrico, cloruro de sodio, todo disuelto en aproximadamente 500 L de agua destilada, a la cual se le debe controlar igualmente el pH y la densidad, y se le agregan constantemente una serie de aditivos los cuales tenían como función, entre otras, garantizar la uniformidad y la calidad de la capa de cobre depositada. Una vez pasado el tiempo determinado para que se produzca la metalización de la capa, se procede a la extracción de las plataformas con los prototipos (figura 5).

Descripción del estudio

Una de las partes más importante del proyecto se basó en el diseño de experimentos para estudiar una primera aproximación en la modelación del proceso. En esta primera aproximación se



Figura 5 Baño de cobre ácido

pretendía detectar los principales factores que afectaban los resultados de los insertos obtenidos, y la tendencia de éstos para poderlos optimizar.

Diseño de los experimentos

Para planificar la modelación del proceso de obtención de improntas metálicas mediante la tecnología Coproinmold, se utilizó el método estadístico de diseño de experimentos [10].

Debido al alto costo necesario para realizar el diseño de experimentos con un número elevado de factores, se decidió utilizar el diseño factorial a dos niveles (2k). Este diseño permitía obtener información relevante para un número reducido de experimentos y también permitía detectar las interacciones entre los diferentes factores.

A partir de la tabla de combinaciones de diseño se definió la planificación de 32 experimentos. Se dividió el trabajo requerido en diferentes tareas:

- Preparación y puesta a punto de los baños.
- Fabricación de los prototipos en estereolitografía.
- Fabricación de los insertos metálicos.
- Evaluación del acabado superficial y dimensional para los prototipos de estereolitografía y los prototipos metálicos.

Definición de los parámetros y respuesta

Con la ayuda del técnico cualificado encargado de trabajar día a día con esta tecnología, se detectaron los factores más relevantes que afectaban de manera directa los resultados. Entre los factores implicados en el proceso de obtención de insertos metálicos se pueden citar, el tipo de resina, la geometría de la pieza (factor de forma), el tiempo de curado de la pieza de resina, la temperatura e intensidad de los baños de níquel y cobre, el tiempo de metalización de los insertos y la carga del relleno del núcleo, entre otros.

Un estudio completo que tuviera en cuenta la totalidad de los factores se sale del propósito de esta investigación ya que aumentaría de forma considerable el número de experimentos, así como la complejidad del estudio y la posterior interpretación de los resultados. Al ser el costo de fabricación bastante alto, se tuvo que definir muy detalladamente la prioridad de cada uno de los factores. De esta manera se redujo el número de factores y en consecuencia el número total de experimentos, así como el costo total del proyecto.

Se realizaron diferentes pruebas con las resinas 10120 y 9120, utilizadas para la elaboración de los insertos en estereolitografía y en paralelo se efectuó un análisis de costes comparando los dos materiales. Como resultado, se seleccionó la resina denominada 9120 debido a su mayor flexibilidad y funcionalidad, así como, mayor velocidad en cuanto a la polimerización, reduciendo de esta manera el tiempo de curado. Por tanto, en el momento de replantear el diseño de experimentos, el primer factor se pensó eliminar pues se tenía suficiente información como para conocer las respuestas, aunque de esta manera, se perdía toda la información referente a la interacción con el resto de los factores.

El siguiente factor que se planteó eliminar fue el material del núcleo del inserto que variaba en función de la cantidad de viruta de aluminio que contenía. Al estudiar más detalladamente el proceso se observó, partiendo de la experiencia

acumulada, que este factor únicamente afectaba dos de las respuestas definidas: la propiedad estructural del núcleo y la conductividad térmica y a la vez, estas respuestas no estaban afectadas directamente por el resto de factores. Por tanto, se planteó realizar un estudio posterior para obtener estos resultados parciales.

En el presente trabajo se han considerado únicamente como factores o parámetros de diseño: 1) factor de forma, 2) tiempo de curado, 3) temperatura de baños, 4) intensidad de baños y 5) tiempo de baños.

La selección de estos cinco factores se ha realizado porque son los factores más importantes y los que según los técnicos afectan mayormente los resultados obtenidos al fabricar los insertos metálicos, centrándose básicamente en el comportamiento de la capa metálica del inserto. Para cada uno de los factores propuestos por los técnicos, se definieron dos valores dentro de su rango de trabajo. Para obtener mejores resultados en el diseño de experimentos, estos niveles se fijaron entre un valor máximo y un valor mínimo lo más alejados posibles dentro de dicho rango. De esta manera se podía observar mejor la tendencia lineal de cada uno de los factores respecto a las diferentes respuestas definidas.

En la tabla 1 se citan los cinco factores con sus dos niveles de experimentación. A continuación, se definen de manera más detallada el factor de forma y la temperatura de los baños de níquel y cobre.

A partir del programa de modelado CAD SolidWorks se diseñaron dos geometrías con el fin de diseñar:

- Los insertos de estereolitografía que serán los negativos de las improntas metálicas generadas a través de la tecnología Coproinmold.
- Los ficheros CAD SLS para generar los insertos a partir de la tecnología de sinterizado selectivo por láser.

En ellas hemos definido el factor de forma FF, como la relación entre el área superficial y el

Tabla 1 Niveles de los factores de diseño

Factores	Nivel +	Nivel -
Factor de forma (FF) (sup/vol)	Tapa	Base
Tiempo de curado	½ h	2 h
Temperatura baños	T ₁	T ₂
Intensidad	1 A/dm ²	2 A/dm ²
Tiempo baños	6 días	10 días

volumen. Esto nos servirá para establecer la complejidad geométrica de cada una de las piezas.

Factor de forma: pieza tipo (A); volumen = 13.059 m³; superficie = 17.805 m²; FF = 1,36.

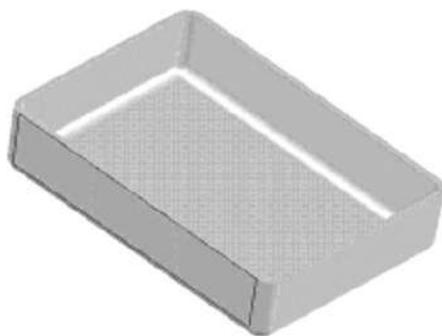


Figura 6 Detalle de la pieza tipo tapa

Pieza tipo (B); volumen = 12.784 m³; superficie = 12.843 m²; FF = 1,00.



Figura 7 Detalle de la pieza tipo base

Temperatura baños:

T1 T. N. I. = 35 °C T. C. U. = 24 °C

T2 T. N. I. = 45 °C T. C. U. = 32 °C

Finalmente el diseño de experimentos quedó de la siguiente manera:

N.º de factores = 5

N.º de experimentos = 2⁵ = 32

En cuanto al cálculo efectuado para verificar el acabado dimensional de los insertos en estereolitografía y los insertos metálicos, se definieron una serie de cotas para evaluar nivelado exterior, nivelado interior, error en el eje X y error en el eje Y (figura 8).

Mediante el *software* de la máquina de medición, se generó un programa para cada una de ellas, que permitía capturar las cotas de los insertos del mismo tipo, de manera automática.

A partir de estos cálculos se generaron los correspondientes listados de cotas y con todos estos datos se realizó un cálculo posterior para obtener unos valores representativos que nos permitieran extraer resultados con el programa estadístico [8]. Se calcularon los errores para cada cota y se agruparon para calcular la media extrayendo el valor máximo y el mínimo a fin de no distorsionar los resultados [9]. Los valores obtenidos son:

Z ext (representando nivel del partaje).

Z int (representando la planitud interior de la figura).

X (representando la desviación según el eje X).

Y (representando la desviación según el eje Y).

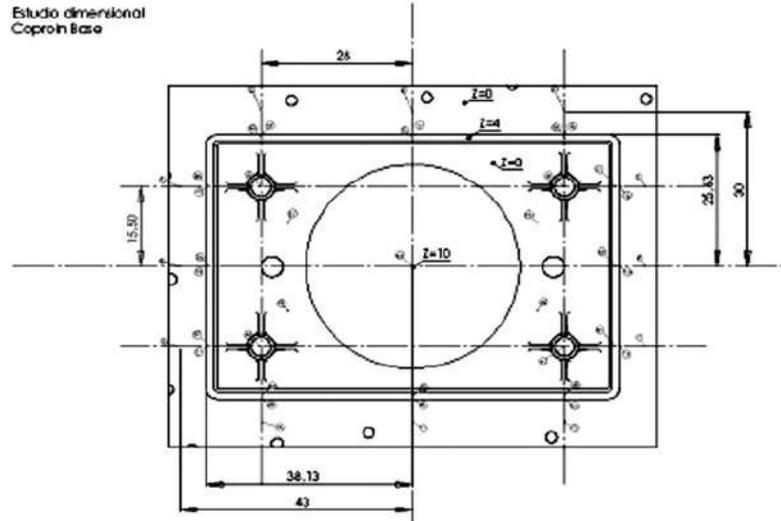


Figura 8 Cotas definidas para la pieza base

Mediante este estudio se pretendía optimizar la calidad final de los insertos metálicos. Para ello se calculó el acabado superficial con la medida de la rugosidad, y el acabado dimensional con el cálculo de un grupo de cotas diferentes definidas para cada tipo de pieza (tabla 2).

Tabla 2 Respuestas seleccionadas para el experimento

Respuestas
Acabado superficial
Calidad dimensional

Para calcular la rugosidad existen métodos muy variados de cálculo, cada vez más precisos y complejos. En el presente estudio se ha utilizado una máquina de medir rugosidades y perfiles Taylor-Hobson “Talysurf Serie 2” con un equipo electrónico incremental “Y” Axis Table.

Los parámetros de rugosidad que se han estudiado como variables tecnológicas de respuesta, definidas según la norma ISO 4287: 1997 [10], son las siguientes:

- *Desviación media aritmética del perfil de rugosidad, Ra*

Se define dicho parámetro a partir de la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ (donde $Z(x)$ es la altura del perfil evaluado en una posición cualquiera “x”) que se encuentran comprendidas en una longitud de muestreo según el eje Y.

$$R_a = \iint_a |Z(x,y)| dx dy$$

Este parámetro es el que más amplia difusión ha tenido y más se ha venido usando generalmente entre los investigadores, por lo que la totalidad de los equipos de medida lo tienen implementado en su configuración. Además, es el parámetro de rugosidad más importante también a nivel industrial.

- *Altura total del perfil de rugosidad, Rt*

Se define como la suma de la mayor altura de pico, Z_p , y de la mayor profundidad de valle, Z_v , del perfil, comprendidas en la longitud de evaluación.

$$R_t = R_{Pick} + R_{Valley} = R_{Max}$$

Estos parámetros vienen expresados en micrómetros (μm).

Metodología de trabajo

El proceso de experimentación estaba determinado por el diseño de experimentos hecho previamente, pero para llevarlo a cabo debían realizarse adecuadamente una serie de tareas, para el desarrollo óptimo de los experimentos.

En principio, se debían preparar los insertos de estereolitografía; esto comprendía limpiar los insertos una vez terminados en la máquina de estereolitografía. Luego los insertos eran llevados a la máquina de medir por coordenadas, en la cual tomaríamos las medidas de referencia que utilizaremos para la comparación con los insertos obtenidos por la tecnología Coproinmold.

Una vez hechas las mediciones correspondientes para cada inserto de estereolitografía, se procedía a la preparación de los insertos antes de sumergirlos en los baños metálicos, para que la electrodeposición de la capa metálica se realizara en óptimas condiciones. La inmersión se producía montando los insertos sobre una plataforma que después se introducía dentro de la cuba con los insertos sumergidos en el baño metálico (véanse figuras 4 y 5). Una vez transcurrido el tiempo estipulado en el diseño de los experimentos para que se produjera la deposición electrolítica de las respectivas capas metálicas, se procedía a desmontar los insertos de las plataformas, se

cortaban los electrodos y se agregaba el núcleo metálico para reforzar el prototipo (figura 9).

Este núcleo estaba compuesto de una mezcla de un polímero, el cual le daba la consistencia, y polvo de aluminio para mejorar la conductividad térmica (figura 10). El proceso de preparación del núcleo consistía en mezclar dos polímeros que al reaccionar producían una macilla que se endurecía dando la consistencia necesaria.

Una vez rellenos los insertos metálicos se procedió a rectificarlos para tener una base plana del inserto, y una vez se retira el inserto de resina queda finalmente la matriz del inserto metálico (figura 11).

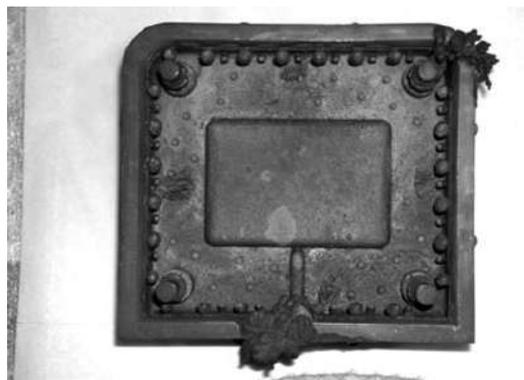


Figura 9 Impronta metálica



Figura 10 Relleno con resina



Figura 11 Inserto final

Posteriormente, para tener un patrón de la calidad dimensional de la impronta metálica una vez estuviera hecha, se midieron una serie de puntos de comparación, que previamente habían sido establecidos entre el prototipo en estereolitografía y la impronta metálica. Estos puntos se midieron con la máquina de medición por coordenadas. Luego se procedió a medir el acabado superficial de cada uno de los insertos en una máquina de medición de rugosidades y perfiles.

Así se concluía con las tareas de fabricación y medición de los parámetros de los insertos metálicos, dando paso ahora al estudio de los resultados.

Estudio de los resultados

En esta parte del estudio se analizaron los resultados con el objeto de optimizar la tecnología de fabricación rápida de moldes, Coproinmold. En ella se hizo un estudio de cómo influían los distintos factores sobre la calidad dimensional de los insertos metálicos. Se utilizó el programa estadístico *Minitab 13* [8], el cual al introducirle los distintos valores del diseño de experimentos los procesa, y presenta una serie de alternativas de análisis estadísticos, como tablas de análisis de varianza (ANOVA), diagramas de Pareto, gráficas y curvas, entre otras.

Análisis dimensional de los insertos de estereolitografía y de los insertos metálicos

En la figura 12 se representa el diagrama de Pareto para los efectos correspondientes a la variable de respuesta Zint. El diagrama de Pareto ordena las estimaciones de los efectos, según su contribución, de mayor a menor. La longitud de cada barra del diagrama es proporcional al efecto estandarizado, es decir, el valor del efecto estimado dividido entre su error estándar. En los diagramas de Pareto, todas las barras del diagrama que sobrepasan la línea vertical se corresponden con los efectos que son estadísticamente significativos, para un intervalo de confianza del 90%.

Los resultados obtenidos para los insertos en estereolitografía mostraban al factor de forma (A), como el que influía de mayor manera sobre los errores dimensionales. En cambio, se podía comprobar que el otro factor principal, el tiempo de curado (B), no tenía ninguna significación sobre la respuesta dimensional. A su vez, la interacción de los dos factores, A y B, tampoco afectaba la respuesta.

De las cuatro respuestas dimensionales analizadas: Zext, Zint, X y Y, la única que presentó un efecto claro del factor A fue la respuesta Zint (figura 12).

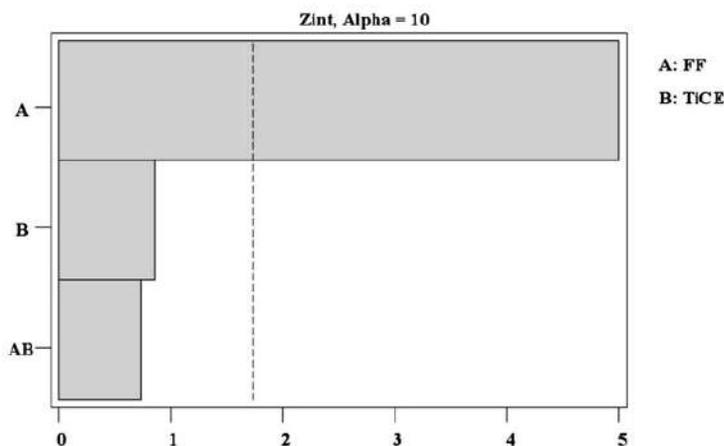


Figura 12 Diagrama de Pareto para la respuesta E Zint

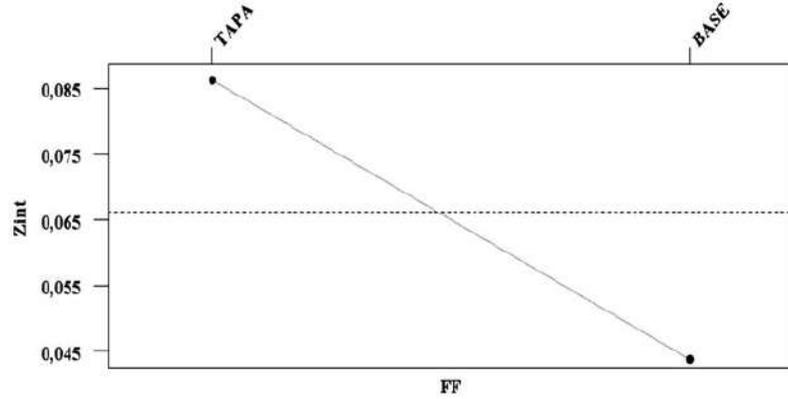


Figura 13 Gráfica del efecto principal factor de forma (A) de E Zint

En la figura 13 se muestra el efecto del factor de forma (A) respecto al error de planitud de figura (Zint).

Como se representa en la figura 13 al cambiar de nivel el factor de forma, el error en cuanto a planitud de figura disminuye considerablemente. Este hecho denota que dependiendo de la geometría de la pieza (grado de complejidad, diferencia de alturas en distintas partes de la figura, etc.), el error de figura en cuanto al eje Z variará en cada caso.

En el caso de los insertos metálicos fabricados con la tecnología Coproimold, el efecto de los factores es similar para las cuatro respuestas.

En ellas podemos observar la influencia del factor de forma (A), sobre los demás parámetros estudiados. Los resultados obtenidos fueron similares para las respuestas Zint, X y Y (figuras 14-15).

Por lo que queda claro que el grado de complejidad de la pieza, o del molde para inyección de

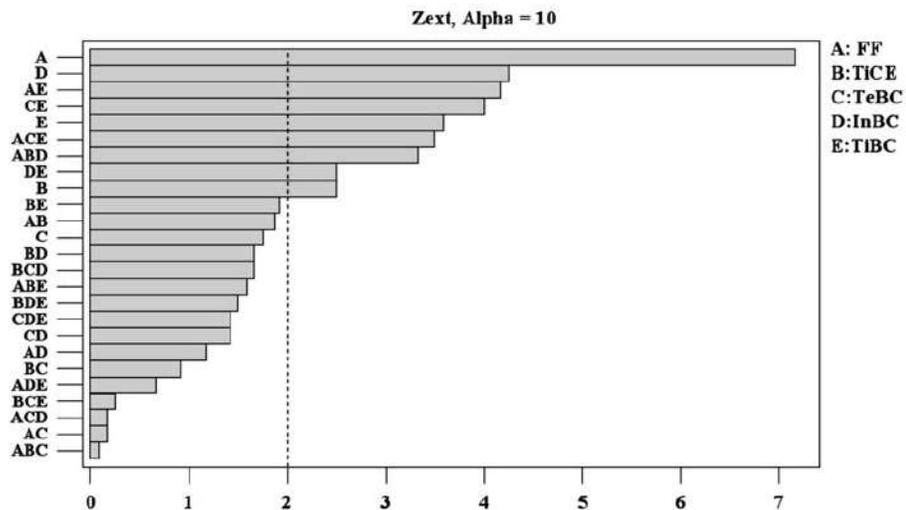


Figura 14 Diagrama de Pareto para la respuesta C Zext

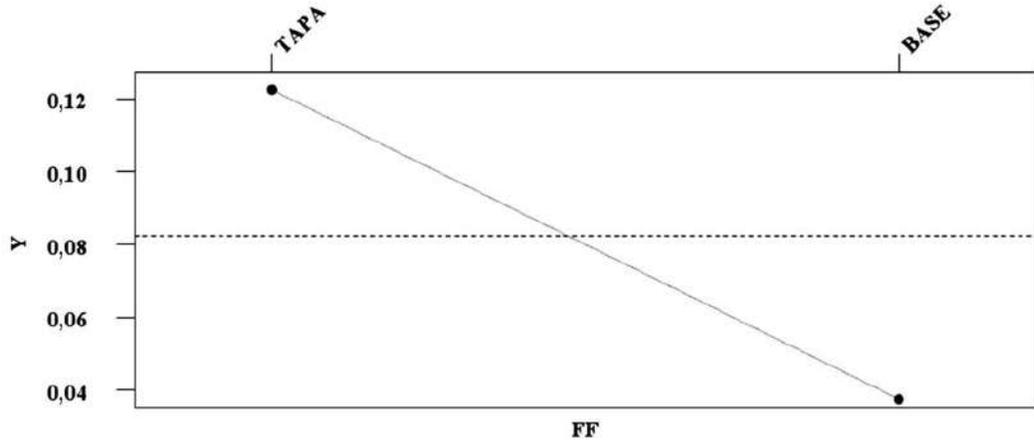


Figura 15 Gráfica del efecto principal factor de forma (A) de Y

piezas que se van a diseñar, tendrá influencia significativa sobre la calidad dimensional.

Para el estudio de la rugosidad superficial únicamente se han considerado los parámetros de rugosidad Ra y Rt , aunque hubiera sido posible seleccionar más ya que el rugosímetro empleado en este caso proporciona gran cantidad de los mismos. En la figura 16 se representa el diagrama de Pareto para los efectos correspondientes a la

variable de respuesta Ra . En este se muestra que no existe ningún efecto significativo, aunque los factores que más influyen son la interacción entre la temperatura y la intensidad de los baños (CD), el factor de forma (A) y por último la interacción entre el factor de forma, el tiempo de curado y la temperatura de los baños (ABC).

El valor del parámetro de respuesta Ra aumenta de forma importante con el factor de forma (figu-

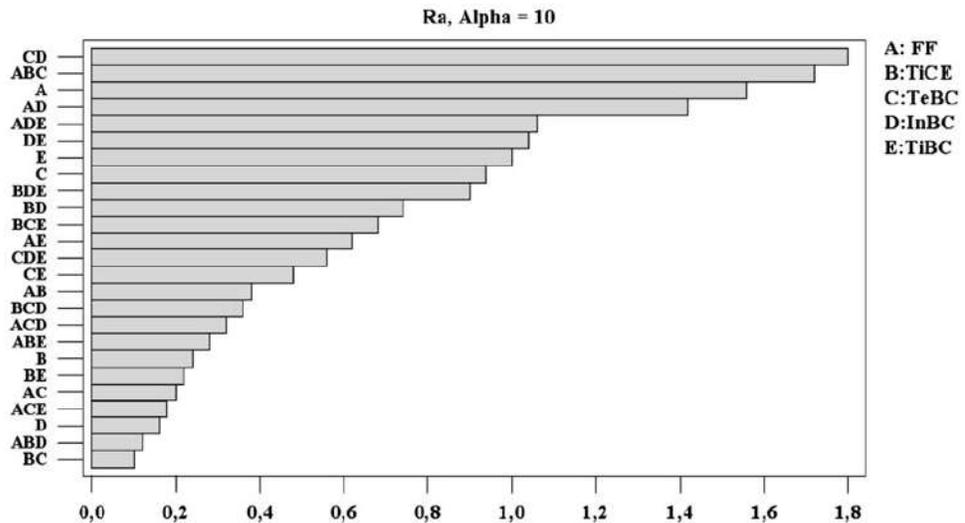


Figura 16 Diagrama de Pareto para la respuesta Ra

ra 17). Por tanto, al aumentar la complejidad de la geometría de la pieza se empeora el acabado superficial del inserto metálico.

Para el parámetro de respuesta Rt , en el correspondiente diagrama de Pareto (figura 18), se puede comprobar que ciertas barras sobrepasan la línea vertical que delimita el nivel de significancia de los efectos para un intervalo de confianza del 90%. Por tanto, en este caso sí existen efectos significativos. Estos son: la interacción entre la temperatura y la intensidad de los baños CD y la interacción entre el factor de forma, el tiempo de curado y la temperatura de los baños, ABC.

Los factores CD y ABC se repiten para el caso de la respuesta Ra . Este resultado es de esperarse pues los parámetros Ra y Rt están estrechamente ligados, aunque adquieren una mayor relevancia para la respuesta Rt ya que ésta tiene mayor información sobre el error máximo de la rugosidad. En cambio el parámetro Ra da una idea más homogénea de la rugosidad calculada.

La gráfica de probabilidad normal para el caso de la variable de respuesta Rt , se puede usar como ayuda para discernir entre los efectos significativos reales y aquellos que representan

únicamente ruido. Además, resulta de especial interés, cuando no se puede estimar el error experimental, de forma que los errores que no sean realmente significativos o que sean, simplemente, ruido se comportan como si siguieran una distribución normal de media cero. Tales efectos considerados como ruido, caerán, pues, aproximadamente a lo largo de la línea recta, mientras que los efectos realmente significativos caerán fuera de la línea.

En un diseño de experimentos convencional una vez llegado a esta etapa deberíamos analizar si el experimento requiere realizar réplicas. Uno de los análisis más utilizados para evaluar esta situación es un test de hipótesis en el cual se estudia la relación entre la varianza del modelo y la varianza presentada por un conjunto de puntos centrales del experimento realizado. En este experimento los factores tiempo de curado, temperatura de baños, intensidad, tiempo de baños, son de variables continuas que tienen un punto central, en cambio el factor de forma, que ha mostrado tener la mayor influencia sobre el experimento, no es un factor continuo y por tanto no se le puede definir un punto central. Por esta razón no es posible realizar un test de hipótesis para estudiar si es necesario realizar réplicas.

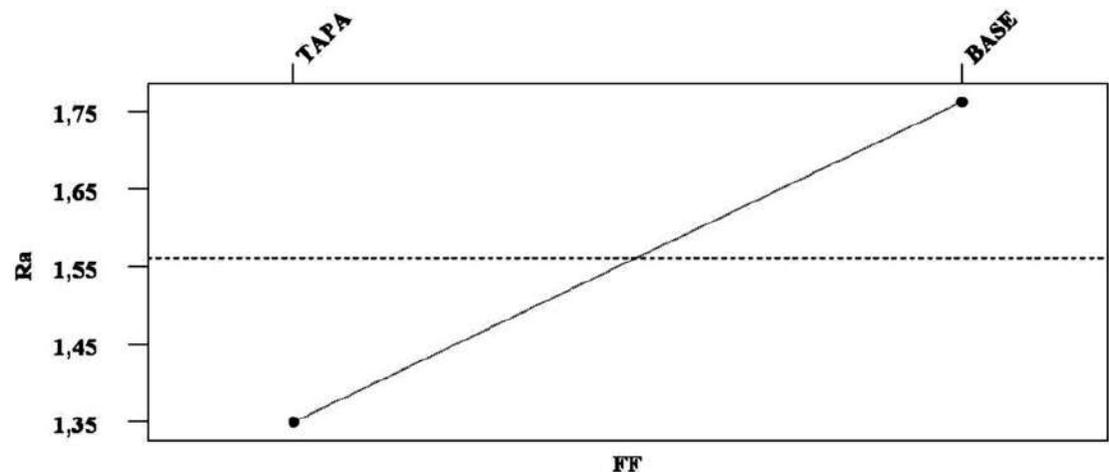


Figura 17 Gráfica del efecto principal factor de forma en la rugosidad Ra

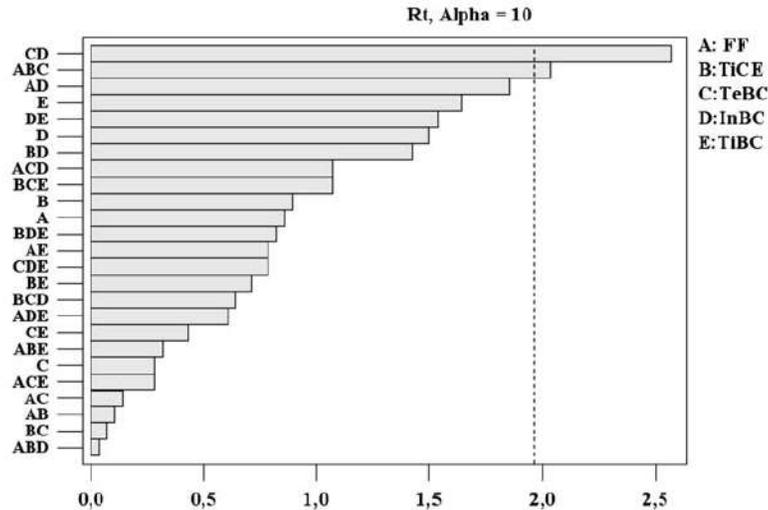


Figura 18 Diagrama de Pareto para la respuesta *Rt*

Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante la experimentación, y de la evaluación de los parámetros, es de anotar que los datos arrojan una importante influencia de la forma geométrica del molde que se va a prototipar. Esto queda bastante claro, en el efecto del factor de forma sobre las variables: calidad superficial y calidad dimensional.

Para futuros usos de este tipo de tecnología se deberá tener muy en consideración la geometría de la pieza a la cual se le quiera prototipar un molde, pues es clara la influencia que la forma geométrica tiene sobre el proceso de fabricación del molde mediante la tecnología Coproinmold.

Referencias

1. T. Nakagada, "Rapid Prototyping: Modern Manufacturing". Cap. 13. *Mechanical Engineering Handbook*. Ed. Frank Kreith. Boca Raton. CRC Press LLC. 2000. pp. 107-116.
2. D.T. Pham, R.S Gault D. T. Pham, "A comparison of rapid prototyping technologies". *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 38. U. K. 1998. pp. 1257-1287.
3. X. Yan, P. Gu. "A review of rapid prototyping technologies and systems". *Computer-Aided Design*. Vol. 28. N.º 4. U. K. 1996. pp. 307-318.
4. S.O. Onuh, Y.Y.Yusuf. "Rapid prototyping technology: Applications and benefits for rapid product development". *Journal of Intelligent Manufact.* Vol. 10. U. K. 1999. pp. 301-311.
5. D. T. Pham, S.S. Dimov. "Rapid prototyping and rapid-the key enablers for rapid manufacturing". *Proc. Inst. Mech. Engrs.* Vol. 217. Part C. J. Mechanical Engineering Science. U.K. 2003. pp. 1-23.
6. A. Rosochowski, A. Matuszak. "Rapid tooling: the state of the art". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 106. U. K. 2000. pp. 191-198.
7. C. K. Chua, K. H. Hong, S. L. Ho. "Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study". *The Int. J. of Advan. Manufact. Technol.* Vol. 15. U. K. 1999. pp. 604-608.
8. J. Ginebra, P. Grima, A. Prat, I. Sole, X. Tort-Martorell, M.X. Valls. *X Prácticas de estadística con MINITAB*. CPDA. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 1999.
9. D. Montgomery. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa-Wiley. México D. F., México. 2002.
10. ISO 4287:1997. "Especificación Geométrica de Productos (GPS)". *Calidad Superficial: Método del Perfil; términos, definiciones y parámetros del estado superficial*.