

Moldeo por inyección de cerámicas

A. ODRIOZOLA, I. OCHOA, M. GUTIERREZ

INASMET, Centro Tecnológico de Materiales. San Sebastián.

En este trabajo se estudia la técnica de fabricación, relativamente reciente, de Moldeo por Inyección de Cerámica, diferenciando cada etapa de su proceso y considerando los parámetros que intervienen, así como las ventajas y aplicaciones. Se presta particular atención a la optimización y control y se resaltan las principales influencias en cada paso del proceso.

Palabras clave: inyección, cerámica, moldeo, proceso.

Ceramic injection moulding

The relatively recent manufacturing technique of Ceramic Injection Moulding is studied in terms of each constituent process stage, along with its processing parameters, advantages and applications. Particular attention is paid to optimization and control, with major influences at each process step highlighted.

Key words: injection, ceramic, moulding, process.

1. INTRODUCCION

La técnica de Moldeo por Inyección de Polvos Cerámicos (C.I.M.) tiene la capacidad de producir, a costes comparativamente bajos, componentes de geometría compleja con la alta precisión del Moldeo por Inyección de Plástico pero con materiales de niveles de resistencia más altos que los polímeros [1-5].

El proceso CIM consta de cuatro etapas principales: mezclado, moldeo, eliminación del ligante y sinterización. La figura 1 muestra este proceso de una manera esquemática.

El polvo cerámico de granulometría fina se combina con un medio termoplástico portador del polvo: el ligante. Tras un premezclado, se granula el producto homogéneo de polvo/ligante, generalmente en forma de pastillas. A continuación, el granulado es conformado mediante un proceso convencional de moldeo por inyección de plástico: se calienta para formar una masa plástica de baja viscosidad y se inyecta, bajo presión, en un molde de acero. La mezcla adopta la forma del molde, se enfría y solidifica. El molde, que consta de dos mitades, se abre y se extrae la pieza.

Seguidamente el ligante es extraído de la pieza en verde por métodos térmicos, químicos o capilares. La pieza en estado marrón (sin ligantes) es sometida entonces a ciclos térmicos que la sinterizan hasta cerca de la densidad completa. Las elevadas densidades que se consiguen con la tecnología CIM son debidas al uso de polvos de tamaño fino y al empleo de temperaturas de sinterización elevadas.

Las aplicaciones del proceso CIM se dirigen hacia componentes pequeños, cuyo peso sea inferior a 50 g, de geometría compleja, espesor máximo de pared de 20 mm y acabado a sus cotas finales sin necesidad de otros procesos secundarios. Asimismo, el proceso

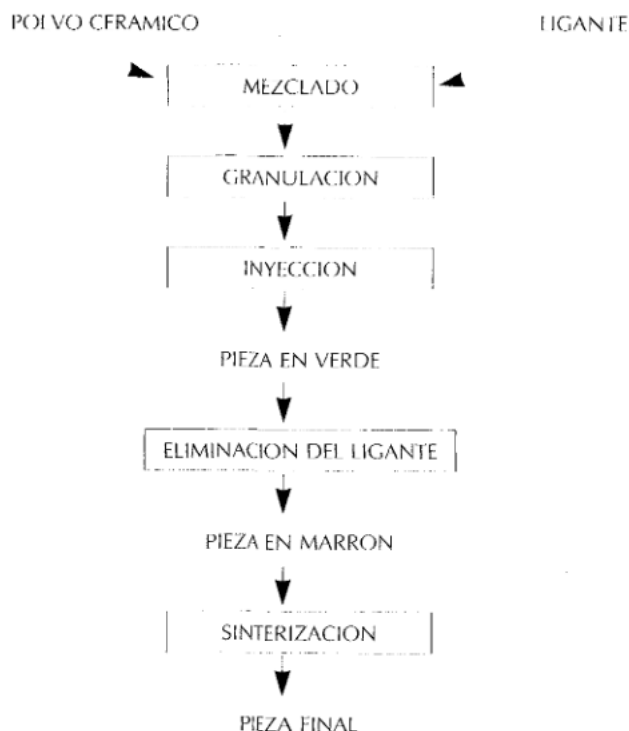


Figura 1 - Proceso de Moldeo por Inyección de Cerámica (CIM).

de Moldeo por Inyección puede ser aplicado con polvos Metálicos (MIM), obteniéndose piezas con las ventajas de la pulvimetalurgia y geometrías complejas [6].

2. MATERIAS PRIMAS

Las materias primas que alimentan la máquina de inyección están constituidas aproximadamente por un 70% en volumen de los polvos cerámicos y un 30% de aditivos formados por ceras, lubricantes y plastificantes, que componen el sistema ligante.

En general, cualquier composición cerámica puede ser procesada por CIM; sin embargo, se requiere una forma esférica de los granos y tamaños del orden de una micra.

Respecto al sistema ligante o aditivos, es donde mayor esfuerzo se viene realizando en estos últimos años. Cada compañía desarrolla su propia formulación, que en la mayoría de los casos se encuentra patentada.

Existen diversas composiciones [7], [8], según la clase de material, geometría de la pieza y tipo de extracción de los aditivos, pero en general se componen de:

- Aglomerantes
- Plastificantes
- Agentes humectantes
- Lubricantes
- Agentes desmoldeantes.

Las tendencias respecto al sistema ligante se dirigen hacia:

- Disminuir su contenido de aglomerantes en su relación con los polvos cerámicos.
- Encontrar formulaciones que faciliten su posterior eliminación.
- Disminuir los efectos contaminantes.
- Disponerlo mezclado con los polvos cerámicos listo para inyectar (aparición de empresas que preparan mezclas granuladas).

Los aglomerantes pueden ser termoplásticos, termoendurecibles y solubles en agua. Los termoplásticos se utilizan con preferencia en inyección y se caracterizan por su comportamiento reversible que hace que se endurezcan al enfriarse. Las diferencias entre los distintos tipos de termoplásticos radica en su temperatura de utilización. Las ceras de abeja pueden utilizarse por debajo de 100 °C en máquinas de inyección de baja presión, mientras que los sistemas de ligante que utilizan polietileno y polipropileno como aglomerante, trabajan en máquinas de alta presión con temperaturas superiores a 150 °C.

Los aglomerantes termoendurecibles son resinas que reticulan con la temperatura. La mezcla cerámica que utilizan estos aglomerantes se endurece en el molde a una temperatura superior a la de inyección. Dado su carácter irreversible la mezcla no puede reciclarse.

Los aglomerantes solubles en agua son derivados de la celulosa que gelifican térmicamente a temperaturas moderadas (próximas a 60 °C). La inyección se realiza a temperatura ambiente y la rigidización se produce en el molde caliente.

Un sistema ligante típico consta, generalmente, de tres o cuatro componentes. Uno de ellos es el polímero soporte aglomerante (p.ej. polipropileno) que determina la viscosidad de la masa plástica en el moldeo de la pieza, la resistencia en verde y el comportamiento durante la eliminación de aditivos. Las ceras y los aceites son los principales productos para facilitar respectivamente la cohesión entre partículas y la disgregación de los aglomerados de partículas; ambos productos orgánicos son eliminados en las primeras etapas del proceso de extracción del ligante. También se emplean agentes de superficie activa (humectantes), tal como el ácido esteárico, para mejorar la compatibilidad entre polvo y ligante, y acrecentar la mol-

deabilidad reduciendo la viscosidad de la masa. En ocasiones se utiliza un plastificante adicional, tal como los ésteres de bajo peso molecular, para modificar el comportamiento reológico del polímero soporte [2].

Los ligantes multi-componente ofrecen diversas ventajas sobre los de un único componente: una mejor dispersión, mayor carga de polvo y mejor control en la extracción térmica y en disolventes. A pesar de todo, los ligantes multi-componente son adecuados solamente para algunos tipos de polvos. Existen también otros sistemas polivalentes cuyo componente principal es un polímero poliacetal [9]. No se conoce su composición exacta y su posterior etapa de extracción de aditivos se realiza mediante un proceso catalítico en lugar de térmico.

3. MEZCLADO

Parece imperativo que para obtener piezas consistentes se tenga que partir de un granulado homogéneo [1]. Por homogeneidad se entiende el alcanzar una producción de gránulos uniformes en tamaño y composición para facilitar la alimentación y moldeo en la máquina de inyección.

En la figura 2 se expone una máquina mezcladora de cuchillas tipo σ instalada en nuestro laboratorio.

Asimismo, la relación de granulado nuevo/reciclado debe ser consistente, ya que el granulado sobrante reciclado se degrada durante el ciclo de moldeo. Para evaluar las características del granulado se utilizan ensayos de viscosidad a altas velocidades de cizalladura y diferentes temperaturas.

Otros aspectos a considerar son la temperatura adecuada de mezcla (factor crítico que es función de la composición de los aditivos), el control de la contaminación del granulado debida al desgaste del equipo mezclador, las velocidades de alimentación para el polvo y aditivos, el secado previo de las partículas antes de mezclarlas para anular la humedad, así como el evitar la retención de aire.

El tamaño, forma y distribución de las partículas de partida se sabe que tienen una gran influencia sobre la viscosidad y moldeabilidad de la mezcla para inyección. Para determinar la moldeabilidad, se mide la distancia de material inyectado en un molde de prueba en espiral bajo condiciones normales de ensayo [10]. La relación entre la distancia recorrida en la espiral y el porcentaje en volumen de carga de polvo para una condición específica de moldeo viene dada por la expresión:

$$d = A / \eta_0 (1 - V)^k$$

donde: d es la distancia recorrida en la espiral

A es una constante que depende de la mezcla polvo/ligante

η_0 es la viscosidad del ligante

V es el volumen de la carga de polvo

k es un parámetro dependiente del polvo.

Se observa lógicamente, que a mayor viscosidad de la mezcla existirá una menor probabilidad de llenado del molde.

4. MOLDEO

La inyección de materiales cerámicos puede realizarse en baja y en alta presión. En el primer caso se utilizan masas de inyección de gran fluidez a temperaturas inferiores a 100 °C. La mezcla del material cerámico con el sistema ligante se prepara y almacena en la pro-

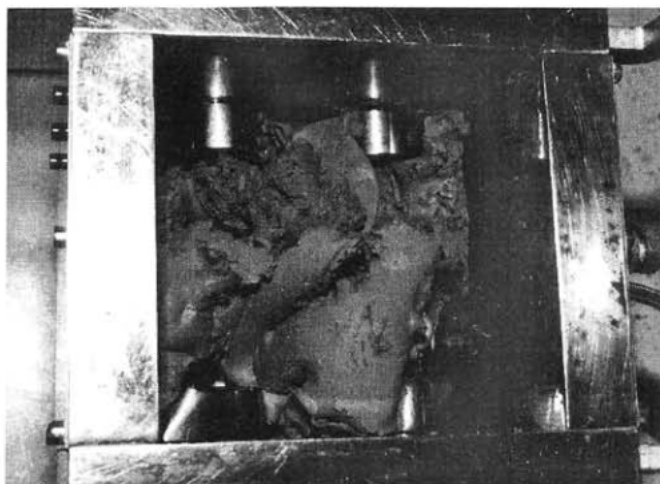


Figura 2 - Detalle de la mezcladora de cuchillas tipo σ .

pia máquina. Dicha mezcla se transporta e inyecta en baja presión al molde donde se solidifica por enfriamiento. Este sistema posee las ventajas de facilidad de preparación de la mezcla y de utilizar masas fluidas fáciles de transportar, sin apenas rozamiento con las paredes de la máquina y del molde. Esto último posibilita la utilización de equipos de inyección simples, de bajo costo y mantenimiento, y de moldes realizados con materiales de baja dureza. Sin embargo, la gran desventaja de la inyección en baja presión radica en la tendencia a la segregación de los componentes cerámicos de los orgánicos, lo cual puede producir deformaciones de las piezas moldeadas en las etapas sucesivas de eliminación de aditivos y sinterización.

Las máquinas de inyección de alta presión trabajan con masas viscosas que impiden dicha segregación, pero que para su introducción en el molde requieren de elevadas presiones (del orden de 100 veces las de baja presión). Si la consistencia viscosa de la masa da lugar a piezas de composición homogénea dentro de su volumen y de una pieza a otra dentro de la producción (reproducibilidad), por otro lado, dicha consistencia requiere de máquinas más complicadas (mayor presión), construidas con materiales antidesgaste costosos y difíciles de mecanizar.

Las máquinas de inyección de husillo utilizadas para plásticos pueden emplearse para inyectar cerámicas, siempre que el cilindro y el husillo sean de materiales duros o recubiertos de capas de material duro, capaces de soportar el efecto abrasivo de las partículas cerámicas que contiene la mezcla para inyección.

Otro tipo de máquina de inyección en alta presión es la de tipo pistón. La masa a inyectar se desplaza mediante un pistón sin los problemas de abrasión que se presentan en el rozamiento con el husillo. Sin embargo, las diferencias de temperatura en la masa y las bolsas de aire que originan defectos en la inyección son debidas al tipo pistón, al no forzarse como en los de tipo husillo el movimiento transversal de la mezcla a lo largo del cilindro de la máquina.

En la tabla I se presenta un resumen de la comparación entre los distintos sistemas de inyección.

En la figura 3 se presenta una fotografía de una máquina de inyección de alta presión tipo husillo que suele utilizarse para plásticos; dicha máquina está acondicionada para inyección de cerámicas mediante incorporación de materiales duros en zonas de desgaste. En lo sucesivo nos referiremos a la inyección con este tipo de máquina.

La etapa de moldeo por inyección con sistemas de ligantes ter-

TABLA I - COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE INYECCIÓN.

COMPARACION DE SISTEMAS

BAJA PRESION (Tipic. hasta 10 atm)

- VENTAJAS :

Mezclado incorporado
Menor costo y mayor duración del molde
Simplicidad (equipo y mantenimiento)

- INCONVENIENTES :

Segregación del material

ALTA PRESION (Tipic. 1000 atm)

- VENTAJAS :

Homogeneidad
Reproducibilidad

- INCONVENIENTES :

Desgaste (materiales duros)
Costo del molde

Pistón:

Diferencias de temperatura
Bolsas de aire

Husillo:

Desgaste del husillo



Figura 3 - Máquina de Moldeo por Inyección.

mo plásticos abarca el calentamiento de la mezcla hasta su punto de fluidez y la inyección de la misma en un molde relativamente frío donde el material solidifica, adquiriendo la forma de la cavidad del molde.

Existen ciertos parámetros clave que requieren un control durante la etapa de moldeo, como por ejemplo las temperaturas del molde y la de reblandecimiento del granulado (generalmente 30 ± 50 °C y 155 ± 165 °C, respectivamente en sistemas ligantes termoplásticos) así como la presión de inyección (50 ± 100 MPa). En general, es necesaria la optimización de estos parámetros según la geometría de cada componente en vistas a conseguir piezas libres de defectos detectables visualmente o a través de rayos X. En muchos casos, los defectos (grietas, poros, falta de homogeneidad) aparece-

rán después de la eliminación del ligante o durante la sinterización [10].

Recientemente, se han diseñado herramientas con controladores de presión integrados dentro del molde, que pueden medir directamente la presión de inyección. Esta información se emplea para ajustar el ciclo de moldeo (siendo la posición óptima del controlador la porción de la cavidad del molde que más tarde se llena) [1].

El ciclo completo de moldeo de la pieza comprende cuatro fases:

- Llenado del molde con la masa de inyección;
- Mantenimiento de la presión para consolidar la pieza;
- Descarga de presión;
- Extracción de la pieza moldeada.

La duración del ciclo es, aproximadamente, de 25 segundos.

5. ELIMINACION DEL LIGANTE

El proceso de eliminación del ligante de la pieza conformada debe ser progresivo del exterior al interior de la misma (Fig. 4) y, por tanto, cuanto más gruesa es la pieza, más difícil resulta eliminar los aditivos.

Se pueden emplear diversos métodos para extraer el ligante [11]: degradación térmica, extracción química con disolventes, proceso capilar o «melt wicking» y extracción catalítica. En la práctica industrial se utilizan muchas veces combinaciones de varios procesos.

La eliminación de ligante por medios térmicos [12] se emplea a menudo. En este proceso, la pieza se calienta lentamente en aire para descomponer el ligante en compuestos volátiles. Es sencillo y bien conocido. Sin embargo, las velocidades de calentamiento deben ser lentas y se necesitan tiempos largos de extracción.

El empleo de los procesos químicos de extracción con disolvente en general acelera la eliminación del ligante y produce una buena retención de forma del compacto. Con la extracción en disolvente, una vez que se ha creado una porosidad continua, la velocidad de eliminación del ligante por otros métodos aumenta de una manera significativa [1]. En general, mediante disolventes se extrae entre un 30 y un 60 % de los aglomerantes. El resto se elimina en un proceso posterior o durante la etapa inicial de la sinterización.

En la figura 5 se muestra un ciclo térmico utilizado para la eliminación de un sistema ligante termoplástico. Previamente la pieza ha estado sometida a una extracción del 30% del ligante con disolven-

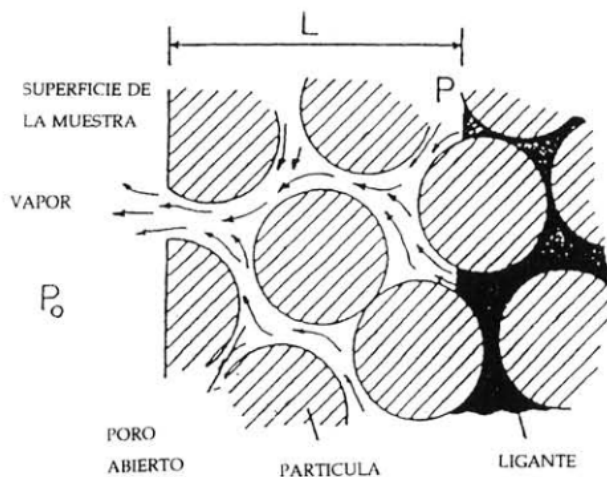


Figura 4 - Esquema del proceso de extracción de los aglomerantes.

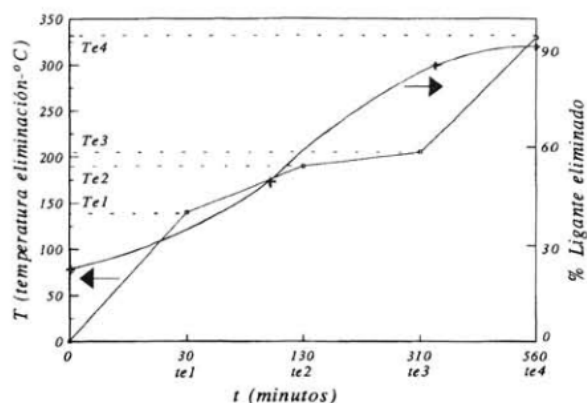


Figura 5 - Ciclo térmico típico utilizado para la eliminación de aditivos. Temperatura final (300-500 $^{\circ}\text{C}$). Tiempo ciclo (9-24 horas).

tes (fracciones más solubles). Dicho ciclo se establece de acuerdo con estudios termogravimétricos que informan las discontinuidades que se producen en la descomposición térmica del sistema orgánico. Como puede observarse la zona crítica corresponde al intervalo de temperatura $Te2$ - $Te3$ en el cual se acelera el grado de descomposición, pudiéndose provocar, si no se controla dicho efecto, defectos y roturas catastróficas de las piezas a tratar.

A partir de la temperatura $Te3$ dicha velocidad de descomposición decrece. Normalmente las piezas después de este ciclo contienen un 10% de ligante que permite su manipulación antes de la sinterización. En el proceso de sinterización se elimina sin riesgo de dañar la pieza esta última fracción del ligante.

El proceso capilar o «melt wicking» [13] consiste en enterrar las piezas en un lecho de arena o material poroso que proporciona un soporte a la pieza. Este lecho es calentado en un horno hasta la temperatura de eliminación de ligantes (por encima del punto de reblandecimiento de la cera) y mantenido a temperatura durante un cierto tiempo. Por flujo capilar se absorbe el ligante orgánico y se extrae lentamente de la pieza. Este proceso tiene la ventaja de disminuir los riesgos de deformaciones y de la estabilidad dimensional del componente.

Finalmente, la extracción catalítica [9] consiste en la hidrólisis del polímero a componentes monoméricos, de forma que el aglomerante pasa directamente de estado sólido a gaseoso, utilizando catalizadores que aceleran el proceso.

6. SINTERIZACION

La sinterización se define como un tratamiento térmico que permite la unión de las partículas por calentamiento a una temperatura inferior a la de fusión del componente principal. La pieza en estado marrón se calienta a velocidad controlada y el ligante que quedaba en la pieza se evapora. Durante el calentamiento el componente se contrae, dependiendo dicha contracción principalmente del volumen de ligante; si el contenido inicial de ligante es del 30% en volumen, la pieza llega a sufrir una contracción homotética del orden del 11% en todas sus dimensiones.

La sinterización es una operación delicada debido a que las altas temperaturas y tiempos largos de mantenimiento pueden provocar deformaciones y agrietamientos en las piezas. Por eso, durante la sinterización, la geometría y el tamaño de la pieza también están

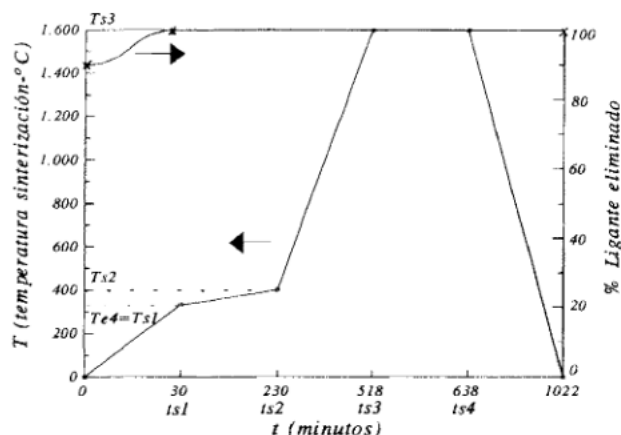


Figura 6 - Ciclo térmico típico de sinterización (Alúmina Ts3=1600 °C).

restringidos. Las piezas más pesadas que unos pocos gramos precisan una «superficie de sinterizado», una superficie plana para soportar la pieza e impedir su pandeo. Las formas complejas requieren el diseño de estructuras soporte para la sinterización.

En la figura 6 se presenta un ciclo clásico de sinterización de Alúmina. Dicho ciclo puede modificarse (alargarse o acortarse) en función de la geometría y volumen de la pieza. Como puede verse consiste en una primera subida rápida para alcanzar la temperatura final de la etapa de eliminación de aditivos Ts1=Te4, una rampa lenta para eliminar el resto de aditivos orgánicos que permanecen en la pieza Ts1-Ts2, después una subida hasta la temperatura de sinterización (1600 °C) y posterior enfriamiento a una velocidad dependiente de las dimensiones de la pieza.

Las densidades finales de las piezas dependen fundamentalmente de la granulometría de los polvos cerámicos (tamaño de partícula). Habitualmente se trabaja con tamaños de partícula inferiores a 5 µm lo cual permite alcanzar densidades superiores al 95% de la teórica.

7. POSIBILIDADES DE LA TECNOLOGIA

El moldeo por inyección está considerado como un método moderno de conformado de cerámicas avanzadas [14]. El proceso CIM puede aplicarse a cualquier material cerámico siempre que se adecúe su distribución granulométrica a las formas y tamaños de partícula que se requieren en las etapas de inyección, eliminación de aditivos y sinterización (forma esférica y tamaño entre 1 y 5 µm, aproximadamente). Se pueden obtener piezas de gran complejidad de forma, incluso con espesores finos de pared, con gran acabado superficial y exigencia de cotas. Esto permite reducir, o suprimir, las costosas etapas de mecanizado intermedio o final durante el proceso. La alta densidad de las piezas en verde (70% D_T) da lugar a bajas contracciones durante la sinterización, con lo cual se disminuye el riesgo de rechazos por deformación o falta de dimensiones. Los tiempos de moldeo (10-20 seg.) y la uniformidad de características de las piezas obtenidas, hace que el proceso CIM pueda y tenga que aplicarse a grandes series de fabricación (≥10⁴), lo cual viene obli-

gado por los costes iniciales de fabricación de moldes (1-2 millones de ptas.).

Últimas referencias del mercado mundial para inyección de cerámicas avanzadas, indican que se ha producido, desde 1986 hasta 1993, una tasa de crecimiento anual entre el 10 y el 12% (Informe Gorham 1994). El proceso CIM se muestra por lo tanto, como un proceso industrial técnicamente consolidado.

Entre las aplicaciones cerámicas que utilizan actualmente la inyección figuran: machos para moldeo de metales, boquillas de soldadura y quemadores de gas, guías de hilos en tejedoras, piezas roscadas, radomos, engranajes, pasamuros y partes aislantes para electrónica y elementos calefactores. Se han conseguido resistencias mecánicas de 700 MPa en rotores para turbocompresores de Carburo de Silicio. La complejidad de las partes de los motores térmicos ha requerido del moldeo por inyección para su desarrollo. Así mismo esta tecnología se está ensayando para la fabricación de materiales compuestos reforzados con monocristales y fibras cortas. Por último, cabe señalar la introducción de la tecnología en el campo de porcelanas, para la fabricación de tazas y piezas con asas en un solo paso, sin necesidad de tener que soldar el asa al resto del cuerpo después de obtener ambas piezas por separado.

8. AGRADECIMIENTOS

El equipo investigador desea agradecer a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) su ayuda económica para la realización del proyecto MAT 93 - 0867, dentro del Programa Nacional de Materiales. ♦

9. BIBLIOGRAFIA

1. R. M. German. «Technological Barriers and Opportunities in Powder Injection Moulding». *P. M. J.* **25**[4] 165-169 (1993).
2. R. M. German; K. F. Hens; S. T. Lin. «Key Issues in Powder Injection Moulding». *Ceramic Bulletin* **70**[8] 1294-1302 (1991).
3. R. M. German. «Introduction to Powder Injection Moulding» pp. 3-22 en *Powder Injection Moulding*, Metal Powder Industries Federation, Princeton (1990).
4. J. A. Mangels; W. Irela. «Ceramics by Injection Moulding». *Adv. Ceram.* **9**, 220-233 (1983).
5. B. C. Mutsuddi. «Le Moulage par Injection en Céramique». *L'Industrie Céramique* **83**[6] 436-441 (1989).
6. B. H. Rosof. «The Metal Injection Moulding Process Comes of Age». *J.O.M.* **41**[8] 13-16 (1989).
7. J. S. Reed. «Plastic-Forming Processes» pp. 355-379 en *Introduction to the Principles of Ceramic Processing*, John Wiley & Sons, Inc, New York (1988).
8. D. W. Richerson. «Shape-Forming Processes» pp. 492-496 en *Modern Ceramic Engineering*, Peter Hilton, Marcel Dekker, Inc, New York (1992).
9. M. Bloemacher; D. Weinand. «Metamold - BASF's new Powder Injection Moulding System». *M. P. R.* **47**[5] 43-49 (1992).
10. G. Bandyopadhyay; K. W. French. «Injection - Moulded Ceramics: Critical Aspects of the Binder Removal Process and Component Fabrication». *Journal of European Ceramic Society* **11**, 23-34 (1993).
11. H. M. Shaw; M. J. Edirisinghe. «Removal of Binder from Ceramic Bodies Fabricated Using Plastic Forming Methods». *American Ceramic Society Bulletin* **72**[9] 94-99 (1993).
12. R. M. German. «Theory of Thermal Debinding». *Int. J. Powder Metall.* **23**[9] 237-245 (1987).
13. B. R. Patterson; C. S. Aria. «Debinding Injection Moulded Materials by Melt Wicking». *J. O. M.* **41**[8] 22-24 (1989).
14. R. M. German. «Today and the Future» pp. 493-509 en *Powder Injection Moulding*, Metal Powder Industries Federation, Princeton (1990).

Comité Editorial Internacional del Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio

D. ALVAREZ-ESTRADA

Sociedad Española de Cerámica y Vidrio
Arganda del Rey, Madrid, España

R. BROOK

(Académico de la IAC)
Max Planck-Institut für
Metallforschung and Institut für
Werkstoffwissenschaften Stuttgart República Federal
Alemana

S. DE AZA

Vicepresidente del CSIC
Madrid, España

F. CAMBIER

Centre de Recherches de l'Industrie
Belge de la Céramique
Mons, Bélgica

P. DURÁN

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Arganda del Rey, Madrid, España

A. ESCARDINO

Departamento de Ingeniería Química
Universidad de Valencia
Valencia, España

G. FANTOZZI

Institut National des Sciences Appliquées
de Lyon
Villeurbanne, Francia

J. M.ª FERNÁNDEZ NAVARRO

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Arganda del Rey, Madrid, España

A. GARCÍA VERDUCH

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Arganda del Rey, Madrid, España

G. GUILLEMENT

Saint-Gobain Recherche
Aubervilliers, Francia

P.F. JAMES

Division of Ceramics
Glasses and Polymers
School of Materials
The University of Sheffield
Reino Unido

E. MARI

Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Argentina

R.E. MOORE

Ceramic Engineering Department
University of Missouri-Rolla
Rolla, Missouri, USA

J. S. MOYA

(Académico IAC)
Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Arganda del Rey, Madrid, España

F. NICOLETTI

Stazione Sperimentale del Vetro
Venezia-Murano, Italia

J.A. PASK

(Académico IAC)
Department of Materials Science and Mineral
Engineering
University of California
Berkeley, USA

T. YAMAMOTO

Department of Electrical Engineering
National Defense Academy
Yokosuka, Japón

M. YOSHIMURA

(Académico IAC)
Research Laboratory of Engineering Materials
Tokyo Institute of Technology
Yokohama, Japón

IAC = International Academy of Ceramics