



**II CAIM 2010**  
**Segundo Congreso Argentino**  
**de Ingeniería Mecánica**  
**San Juan - Noviembre 2010**

## **Empleo de fibras orgánicas para optimizar propiedades de moldes cerámicos para Fundición de Precisión**

Varela P. G., Montelongo L. E., Cotella N. G., Radevich O. A., y Kohl R. G.

**Laboratorio de Ensayos de Materiales - Facultad de Ingeniería**  
**Universidad Nacional de Río Cuarto**  
**Ruta Nac. 36 km. 601 - Río Cuarto (Cba.) – Argentina**  
Tel/Fax: +54-3584676106 - E-mail: [pvarela@ing.unrc.edu.ar](mailto:pvarela@ing.unrc.edu.ar)

### **RESUMEN**

La fundición de precisión se emplea habitualmente para la elaboración de piezas de alta calidad, con muy buena terminación superficial y precisión dimensional.

La mencionada técnica tiene ventajas importantes en la producción de componentes de calidad, y beneficios de precisión, versatilidad e integridad; y constituye una alternativa más económica que otros procesos de conformado, tales como forja o mecanizado por arranque de viruta, puesto que el material desperdiciado es mínimo, disminuyendo costos y aumentando la velocidad de obtención de las piezas.

El proceso consiste básicamente en la elaboración de un modelo de cera, el cual se recubre sucesivamente de diversas capas de mezclas de distinto tipo de materiales refractarios en forma de barro. Seguidamente se procede al secado del molde, a la eliminación de la cera, y a la calcinación del molde, quedando éste último listo para vertir el metal fundido en el mismo.

Los moldes deben ser porosos, para permitir la evacuación de los gases que estaban disueltos en el metal fundido, y que son liberados conforme progresa la solidificación. Una mayor permeabilidad de los moldes se traduce por lo general, en una disminución de la resistencia mecánica de los mismos, lo cual redundaría en el aumento de posibilidad de la rotura de los moldes.

El presente trabajo trata sobre la mejora de las propiedades físicas de los moldes elaborados con ligantes base agua, mediante la incorporación de fibras orgánicas en los barros. Los moldes fueron elaborados utilizando técnicas que ya han sido muy estudiadas en los últimos años.

Se concluye que con el agregado de fibras orgánicas en los barros, es posible obtener mejoras en la permeabilidad de los moldes, sin afectar negativamente la resistencia mecánica de los mismos, lo cual redundaría en mejorar la calidad de la pieza final obtenida.

**Palabras Claves:** Microfundición, Cera perdida, Moldes cerámicos, Resistencia en verde, Fibras orgánicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La técnica de fundición de precisión o fundición a la cera perdida provee gran cantidad de piezas a la industria, la cual a su vez requiere de dicha técnica una adecuada terminación superficial y estrechas tolerancias dimensionales. Dicha técnica es un proceso de manufactura que ha sido practicado por más de 5000 años [1].

La mencionada técnica se relaciona con la producción de piezas de ingeniería, utilizando un modelo fusible que se pierde durante el proceso. El proceso tiene la característica de la utilización de barros cerámicos, para conformar un molde cerámico multicapa tipo cáscara, con una superficie sumamente lisa. Estas características son transferidas a la pieza fundida [2].

Básicamente, el proceso consiste en recubrir un modelo fusible con materiales cerámicos, luego extraer el modelo por fusión del mismo y llenar el espacio dejado por éste con metal fundido, posteriormente a su solidificación se elimina el molde y se obtienen las piezas terminadas.

En consecuencia, el molde sin calcinar deberá soportar la presión del material del modelo al extraerlo. Una vez calcinado, el molde tiene que contrarrestar la presión del metal fundido y el choque térmico. En virtud de ello es fundamental el control de la resistencia mecánica del molde sin calcinar y una vez calcinado, a fin de lograr valores adecuados de resistencia mecánica, para que no se vea comprometida su integridad y sus dimensiones.

Durante el proceso de llenado de los moldes es necesario desalojar el aire contenido en él; y además, los gases que desprenden los metales durante el proceso de solidificación. Dichos gases estaban disueltos en el metal líquido, y son desprendidos durante la solidificación porque la solubilidad de los mismos en el metal baja con la disminución de la temperatura. Es fundamental realizar la eliminación de dichos gases del molde, puesto que de podrían quedar ocluidos en el interior del metal, malogrando la pieza elaborada. Para todo ello es muy importante la presencia de porosidad en el molde.- El molde debe ser permeable, y el control de este parámetro caracteriza la bondad del mismo y hace a la calidad de las piezas obtenidas.

Consideraciones de orden medioambiental y económico, han conducido a la industria a mejorar la calidad actual de las piezas producidas, reduciendo los costos de manufactura y explorando nuevos mercados para el proceso. La optimización de las propiedades físicas de los moldes cerámicos es fundamental para lograr estos objetivos; siendo la construcción del molde cáscara, en consecuencia, la parte crucial del proceso completo [3-5]. Específicamente relacionado con ello, está el desarrollo del proceso de fundición de precisión empleando ligantes base agua [6-12], en lugar de los tradicionales (y contaminantes) ligantes base alcohol.

Debido a lo expuesto, se hace imperativo que la industria mejore la calidad actual de las piezas obtenidas por fundición, que reduzca costos de manufactura y explore nuevos mercados para el proceso. La optimización de las propiedades mecánicas y físicas de la cáscara cerámica será fundamental para alcanzar dichos objetivos.

En resumen, se puede mencionar que los requerimientos más importantes de un molde de fundición de precisión son [13]:

1. Adecuada resistencia mecánica en verde (sin calcinar) para resistir el descerado del molde
2. Suficiente resistencia mecánica una vez calcinado, para resistir la presión del metal fundido
3. Suficiente permeabilidad, para permitir la evacuación de gases.

El presente trabajo trata sobre la mejora de las propiedades físicas de los moldes elaborados con ligantes base agua, mediante la incorporación en los barros, de fibras orgánicas específicamente de polietileno. Dicha mejora en las propiedades físicas, consiste básicamente en abordar los tres aspectos precedentemente relacionados.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Elaboración de los moldes

Fueron elaboradas distintas muestras de molde para su análisis, en todos los casos siguiendo el procedimiento descrito por Varela et al. [3].

Las muestras constaron de 2 formas diferentes: i) para la confección de las probetas destinadas a los ensayos con el objeto de determinar la resistencia mecánica (MOR, Modulus of Rupture), se utilizaron modelos de cera [14] de 70 mm x 30 mm x 10 mm, fabricados por inyección en matriz metálica, sobre los cuales se elaboraron los moldes tipo cáscara cerámica. De cada uno de los modelos, se obtenían dos probetas cerámicas. ii) para la confección de probetas destinadas a la determinación de la permeabilidad, se emplearon pelotas de tenis de mesa de material polimérico, adosadas a tubos cerámicos, sobre los cuales se construyó la cáscara cerámica.

La secuencia completa de operaciones utilizada para la construcción de las muestras se describe a continuación.

El moldeo se realizó en forma sucesiva a la inmersión de los modelos de cera o de polímero, en el barro refractario, seguido del correspondiente estucado con distintos materiales refractarios: ortosilicato de circonio y chamote sílico aluminoso. Fue repetido dicho proceso hasta completar seis capas de barro refractario y relleno. Se utilizó en todas las capas el Silicato de Sodio como aglomerante con agente humectante y antiespumante, variando el refractario del barro y del relleno de cada capa.

Se utilizaron como materiales refractarios harina de circonio #325, arena de circonio con índice de fineza según American Foundrymen's Society (AFS) 110 y chamote de distintos tamaños de partícula.

Para la construcción de los barros se empleó una mezcladora rotativa a paletas y el estucado se aplicó en todos los casos por lluvia de refractario.

Todos los ensayos fueron realizados en una sala de moldeo acondicionada a 20/21°C y 50/55 % de HR.

Al conjunto de piezas y sistema de llenado en cera, se le aplicó el barro refractario por inmersión y se lo estucó con arena de circonio, procediéndose a continuación al fraguado del mismo en una atmósfera de dióxido de carbono durante cuatro minutos. Este procedimiento se repitió en las sucesivas capas aplicadas. La capa primaria, que influye en la terminación superficial de la pieza, fue construida con un barro compuesto por ligante y harina de circonio, viscosidad 60/70 seg. Copa Ford N°4.

Para los sucesivos revestimientos o capas secundarias, que determinan la resistencia a la flexión, se empleó un barro con viscosidad 20/25 seg. Copa Ford N° 4, estucándose la primera, segunda y tercera capa con chamote # 50/70 y las capas cuarta a sexta con chamote # 12/30.

Fraguada la última capa se dejó secar el molde en aire tranquilo y en aire forzado.

Seguidamente de completada la operación de secado se separaron las muestras que serían ensayadas sin calcinar (en verde), de aquellas que se ensayarían calcinadas. La operación de calcinación fue realizada a 900°C por espacio de 20 minutos en un horno eléctrico tipo mufla. Luego de alcanzar la temperatura establecida las probetas fueron enfriadas en el propio horno en forma lenta para evitar la creación de tensiones

internas que pudieran alterar los resultados.

Los parámetros de los moldes se evaluaron mediante: a) la determinación de la resistencia mecánica a la flexión, para muestras sin calcinar (en verde), y muestras calcinadas; y b) la determinación de la permeabilidad, para muestras calcinadas.

Fueron elaboradas cuatro series de diez muestras cada una de ellas, con distinto porcentaje de adición de un fibras orgánicas, en los barro, llegándose hasta el 4 % en masa, de adición de dichas fibras como valor máximo.

## 2.2. Determinación de propiedades mecánicas

### 2.2.1. Determinación de la resistencia mecánica (MOR)

A fin de determinar la resistencia mecánica de las distintas muestras, se utilizó una Máquina Universal de Ensayos Digital para masas de moldeo según AFS (American Foundry Society) con montaje para flexión, apoyos flotantes y carga aplicada en tres puntos, siendo la luz entre apoyos de 50 mm. Los valores de Resistencia a la Flexión (MOR) fueron obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura [Pa]  
P = Carga de rotura [N]  
L = Distancia entre soportes de apoyo [m]  
b = Largo de la muestra [m]  
d = Espesor de la muestra [m]

### 2.2.2. Determinación de la permeabilidad de las probetas

La permeabilidad de las muestras calcinadas, se determinó a temperatura ambiente, utilizando la técnica definida por AFS para masas de moldeo. Dichas determinaciones se realizaron mediante un Permeámetro Digital. Los valores fueron obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

$$Pb = \frac{Vs \cdot Q \cdot D}{P \cdot A} \quad (2)$$

Donde:

Pb = Permeabilidad  
Vs = Viscosidad del aire [N seg m<sup>-2</sup>]  
Q = Caudal aire [m<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>]  
D = Espesor de probeta [m]  
P = Presión diferencial [N m<sup>-2</sup>]  
A = Área de probeta [m<sup>2</sup>].

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos, de Módulo de ruptura en verde, Módulo de ruptura en estado calcinado, y permeabilidad.

Tabla 1. Promedio de resultados obtenidos

	Cantidad de fibra en el barro		
	0 %	2 %	4 %
MOR en verde (MPa)	1,17	3,21	2,89
MOR calcinado (MPa)	2,38	2,42	1,48
Permeabilidad ( $\times 10^{10}$ )	6,68	12,0	15,8

### 3.1. Resistencia Mecánica.

La figura 1 muestra gráficamente los resultados de resistencia mecánica, específicamente el módulo de ruptura (MOR) para distinto porcentaje de adición de fibras orgánicas en los barroes. Cada punto del gráfico es el promedio de los valores obtenidos con 10 muestras ensayadas, con una desviación estándar de 0,1. En dicha figura puede apreciarse un incremento del orden del 173 % en la resistencia mecánica de los moldes sin calcinar, con una adición de fibras en los barroes del 2% en masa, respecto a los mismos moldes sin agregado de fibras. Dicho aumento es muy importante, puesto que contribuye a disminuir la tasa de falla de los moldes, que se da principalmente durante el descerado, debido a la dilatación de la cera, lo que produce importantes tensiones en los moldes que están sin calcinar. Puede afirmarse que tal mejora en la resistencia mecánica se puede relacionar por el aporte resistivo de las fibras. Sin embargo, para agregados mayores de fibras, se produce una disminución en los valores de resistencia, debido probablemente a la rotura parcial de la red de sílice, debido a la mayor cantidad de las primeras.

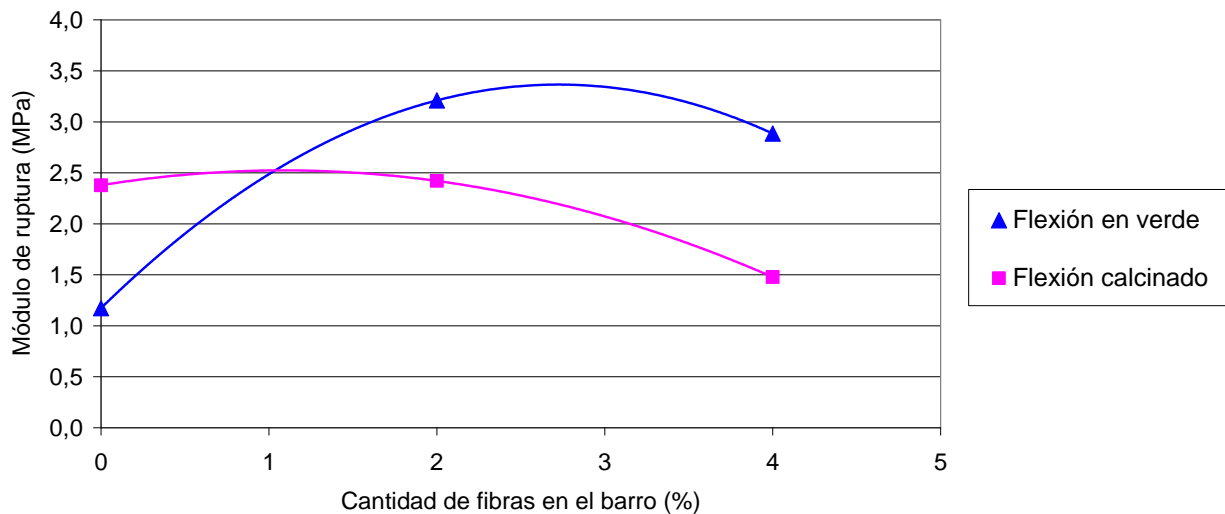


Figura 1. Resultados de resistencia mecánica

En lo que respecta a la resistencia mecánica para moldes calcinados, se observa que la misma prácticamente no varía para agregados de fibras del orden del 2 %, y que dicha resistencia disminuye en un 37 % para agregados de fibra del 4 % en los barroes. Con respecto a éste último resultado, se pueden realizar dos consideraciones: una desfavorable, puesto que se ha reducido la resistencia de los moldes, que ahora pueden no resistir la presión metalostática del metal fundido; y por otra parte, dicha disminución de resistencia puede facilitar la tarea de remoción del molde, una vez solidificado el metal. Dicha disminución en la resistencia mecánica, puede deberse a que las fibras desaparecen del molde, una vez que se ha calcinado éste, quedando una estructura más porosa que aquella obtenida al moldear sin fibras, lo cual redonda en los resultados observados.

### 3.2. Permeabilidad.

La figura 2 muestra gráficamente los resultados de permeabilidad de moldes calcinados, para distinto porcentaje de adición de fibras de polietileno en los barro. En dicha figura puede apreciarse un incremento significativo de la permeabilidad para cualquier adición de fibras. Ello se debe a que el espacio ocupado por el polímero, queda vacío luego de la calcinación, lo que conduce al aumento en la capacidad de los moldes de permitir el paso de gases, y consecuentemente, contribuir a mejorar la calidad de la pieza final obtenida, por reducir la posibilidad de que queden gases atrapados en el metal solidificado.

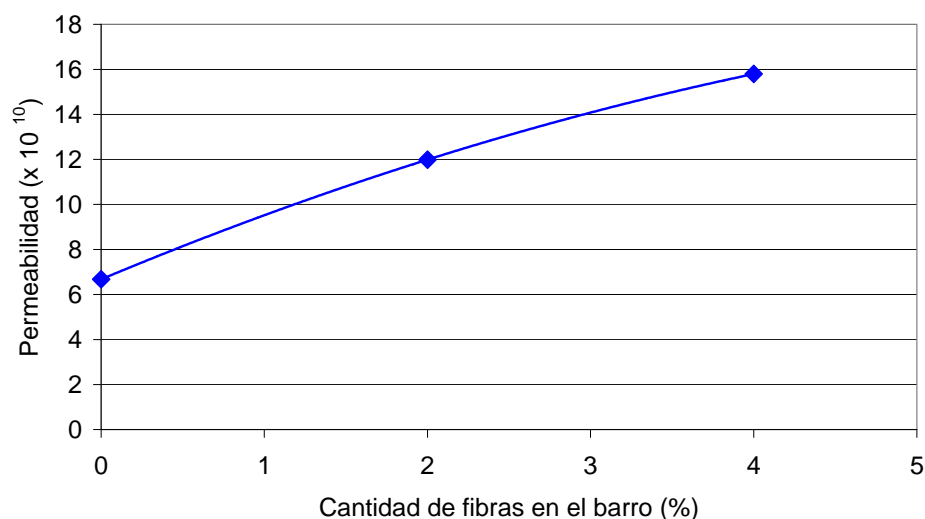


Figura 2. Resultados de Permeabilidad

### 4. CONCLUSIONES

Ha sido probada una variante de la técnica de elaboración de moldes para fundición de precisión, para moldes aglutinados con ligantes base agua, mediante la adición de fibras orgánicas (polietileno) en los barro.

Se han ensayado dichos moldes, en lo atinente a los valores de resistencia mecánica, para muestras sin calcinar y calcinadas; y además se determinaron valores de permeabilidad, para éste último tipo de muestras. Se ha demostrado que pequeños agregados de fibra en los barro, del orden del 2% en masa, mejoran la resistencia mecánica de los moldes sin calcinar y de los moldes calcinados; incrementando significativamente la permeabilidad de los moldes. Mayores agregados de fibra mejoran la resistencia de los moldes sin calcinar y la permeabilidad, pero disminuyen la resistencia mecánica de los moldes calcinados.

Queda demostrada la conveniencia del empleo de fibras orgánicas para mejorar propiedades físicas de los moldes, lo cual redundará en disminuir la tasa de falla de los mismos.

### 5. REFERENCIAS

- [1] Young R. D., Fennell R. A., "Method for Modern Sculptors", Ed. Sculpt-Nouveau, 1980.
- [2] Investment Casting, "Metals Handbook"; 8º Ed., Vol. 5, pp. 237/261, 1970.
- [3] Varela Pablo, Cotella Nelson, Oviedo Osvaldo, Kohl Rodolfo, Actas de III Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, "Nuevo Procedimiento para la Construcción de Moldes Cerámicos de Microfusión", Morelia Michoacán México, pp. 82-87, 1997.
- [4] S. Jones, P.M. Marquis, "Role of silica binders in investment casting", Brit. Ceram. Trans. Vol. 94 - Número 2, pp. 68-73, 1995.

- [5] J. Vandermeer, Proceedings of the 10th World Conference on Investment Casting, "A unique silica binder for investment shell systems", Monte Carlo, Monaco, paper 3, May 14-17, 2000.
- [6] Varela P., Cotella N., González Oliver C., Kohl R., Congreso: CONAMET/SAM – Simposio Materia, "Rol del Aglomerante de Sílice en Fundición de Precisión", pp. 79-84, 2002.
- [7] Kohl R., Alcoba M., Bruno M., Varela P., Cotella N., Radevich O., Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia, "Fundición a La Cera Perdida: Materiales para Modelos", ISBN 987-20975-0-X, 2003.
- [8] Pannunzio Miner E., Varela P., Cotella N., Kohl R., Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia, "Estudio de moldes para fundición de precisión: microscopia electronica de barrido y difraccion de rayos x de polvos", ISBN 987-20975-0-X, 2003.
- [9] Oviedo O., Varela P., Radevich O. Kohl R., Jornadas CONAMET/SAM, "Fundición a la Cera Perdida: Noyos Cerámicos", pp. 467 - 470, 2004.
- [10] Kohl R., Oviedo O., Radevich O., Sarutti J., ongreso Binacional SAM/CONAMET 2005, "Fundición de precisión: proceso para la fabricación de noyos cerámicos", Mar del Plata – Argentina, ISBN 987-22443-0-8, 2005.
- [11] Kohl R., Oviedo O., Radevich O., "Procedimiento destinado a fabricar noyos cerámicos para fundición a la cera perdida". Patente de Invención Solicitada por la Universidad Nacional de Río Cuarto, Octubre 2006.
- [12] D. Duffey, Proceedings of the 25th BICTA Conference, "Wexcoat-a totally new concept in water-based binders", Cheltenham, UK, June 10-12, 2001.
- [13] S. Jones, C. Yuan, "Advances In Shell Moulding For Investment Casting", Journal of Materials Processing Technology, Número 135, pp. 258-265, 2003.
- [14] Kohl R., Alcoba M., Bruno M., Varela P., Cotella N., Radevich O., Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia, "Fundición a La Cera Perdida: Materiales para Modelos", ISBN 987-20975-0-X, 2003.