



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

## **Utilización de polímeros para mejorar las propiedades de moldes cerámicos para fundición a la cera perdida**

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 a la cera perdida se relaciona con la producción de piezas de ingeniería, utilizando un modelo fusible que se pierde durante el proceso. La técnica tiene la característica de la utilización de barros constituidos por material refractario, para conformar un molde cerámico multicapa tipo cáscara, con una superficie sumamente lisa. Estas características son transferidas a la pieza fundida.

Consideraciones de orden medioambiental y económico, han conducido a la industria a la mayor utilización de sistemas cáscaras elaborados con ligantes base agua, en lugar de los tradicionales y bien conocidos sistemas ligantes base alcohol, que son mayormente contaminantes. Con esta implementación se ha visto resentida la calidad de los moldes, en lo atinente a sus propiedades físicas, lo cual condujo a un mayor porcentaje de piezas con fallas.

La optimización de las propiedades físicas de los moldes cerámicos es fundamental para lograr mejorar lo anteriormente expuesto; siendo la construcción del molde cáscara, en consecuencia, la parte crucial del proceso completo.

El presente trabajo trata sobre la mejora de las propiedades físicas de los moldes elaborados con ligantes base agua, específicamente en lo atinente a la incorporación de polímeros en los barros.

Para lograr dichos objetivos se elaboraron distintos moldes, utilizando técnicas que emplean ligantes base agua, con el agregado de distinta cantidad de polímeros en los barros.

Se concluye que es posible obtener aumentos en la resistencia mecánica de los moldes, y también en la permeabilidad de los mismos, a los efectos de disminuir la cantidad de gases atrapados en el metal solidificado, todo lo cual conduce a mejorar la calidad de la pieza final obtenida.

**Palabras Claves:** -Microfundición, Cera perdida, Moldes cerámicos, Resistencia en verde, Polímeros.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fundición de metales líquidos para producir objetos sólidos es un proceso de manufactura que ha sido practicado por más de 5000 años, siendo la fundición de precisión uno de los métodos de conformado más antiguamente conocidos [1].

Los principios de la técnica se remontan a miles de años antes de Cristo, cuando hombres primitivos empleaban el método para elaborar rudimentarias herramientas. Ello siguió por centurias con la utilización de dicha técnica en joyería y la elaboración de productos artísticos, hasta el advenimiento de la segunda guerra mundial, con el desarrollo aeroespacial y consiguientemente, la necesidad de componentes de ingeniería de alta calidad.

La fundición de precisión 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].

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 no aprovechado en la pieza final es mínimo, disminuyendo costos y aumentando la velocidad de obtención. Como resultado, el proceso es ampliamente utilizado para una amplia variedad de componentes, con piezas elaboradas de muy dispares tamaños, desde muy pequeñas para componentes de armas y medicina, hasta grandes componentes mecánicos utilizados en hélices de barcos, componentes de reactores nucleares, y turbinas hidráulicas de represas hidroeléctricas; incluyendo piezas componentes de alta complejidad, como álabes de turbina de gas, constituídas por un solo cristal metálico.

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].

Los pasos básicos en la producción de piezas por fundición de precisión, utilizando moldes cerámicos tipo cáscara, es la siguiente: primeramente se preparan barros compuestos de una mezcla fina de refractarios de relleno y un sistema ligante tipo coloidal que contiene sílice. Un modelo de cera es sumergido en el barro, luego se rocía con estuco de material refractario, y posteriormente se procede al secado del mismo. El propósito del estuco es minimizar las tensiones mecánicas que se producen durante el secado de las capas, por la presencia de centros de concentración de tensiones que distribuyen las mismas, y así reducen la magnitud de las tensiones locales de secado. El segundo propósito del estuco es presentar una superficie rugosa, que facilita un enlace mecánico entre la capa primaria y los recubrimientos secundarios. Cuando la primera capa se ha endurecido (gelificación del ligante), el conjunto es sumergido en un barro secundario y estucado hasta el espesor de cáscara requerido. El tamaño de partícula del estuco se incrementa conforme aumenta el número de capa, a fin de obtener la máxima permeabilidad del molde, y proveer volumen al mismo. Cada capa es completamente endurecida entre inmersiones en barros.

En síntesis, un molde de fundición de precisión consiste de capas individuales de materiales refractarios finos y granulares, sostenidos conjuntamente por un ligante gelificado. La flexibilidad de este sistema, o sea

la posibilidad de adaptarse a distintos tipos y tamaños de piezas, se da ajustando la composición de cada capa y el número total de ellas.

La última etapa del proceso consiste en la remoción del modelo de cera, que se puede realizar por diferentes métodos: autoclave con vapor, o calentamiento rápido en horno; lo cual produce un molde cáscara vacío. Seguidamente se calienta el molde a alta temperatura para proceder a la sinterización o calcinación del mismo y así aumentar notablemente su resistencia mecánica. De esta manera el molde cáscara está listo para proceder al vertido del metal fundido dentro del mismo, que solidifica en dicho lugar. Por último, la cáscara cerámica es removida por medio de métodos mecánicos o químicos, para obtener los productos metálicos deseados.

Durante la década de 1990, con la introducción de leyes de protección medioambiental, que limitan los grados permitidos de emisiones producidos por procesos industriales, han aparecido problemas asociados con materiales de cáscara cerámica. Ello se debe a la mayor utilización de sistemas cáscaras elaborados con ligantes base agua, en lugar de los tradicionales y bien conocidos sistemas ligantes base alcohol, que son mayormente contaminantes. Un conjunto de procedimientos y técnicas para elaboración de moldes utilizando ligantes base agua, han sido desarrollados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto [6-11], así como por otros investigadores [12].

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.

Los requerimientos 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. Adecuadamente débil (colapsible) para prevenir fisuras por contracción durante la solidificación en aleaciones susceptibles
4. Alta resistencia al choque térmico para prevenir roturas durante la colada del metal
5. Alta estabilidad química
6. Baja reactividad con los metales para mejorar la terminación superficial.
7. Suficiente permeabilidad y conductividad térmica del molde para mantener una adecuada transferencia térmica entre la pared del molde y así permitir el enfriamiento del metal
8. Baja expansión térmica para limitar cambios dimensionales dentro del molde, y finalmente de la pieza.

Dicha lista no es exhaustiva. El rango de aleaciones, tamaño y complejidad de piezas fundidas, y requerimientos específicos de componentes fundidos, conducen a un conjunto de propiedades de molde y materiales, todos usados para propósitos específicos dentro de la industria de la fundición. El factor fundamental en todos los casos es el rango muy extenso de precisos requerimientos para elaborar una pieza exitosa.

Desafortunadamente, la producción de grandes moldes utilizando sistemas convencionales, resulta en elevadas tasas de falla. Dichas fallas se atribuyen a dos grandes causas: la modificación de la forma del molde por las tensiones mecánicas y las altas temperaturas, y la interacción metal-molde. La modificación de la forma se produce luego del vertido del metal fundido y antes de su solidificación. La interacción metal-molde es una reacción entre el metal y la pared del molde, lo cual produce una superficie rugosa, la cual contiene inclusiones de materiales refractarios.

El presente trabajo trata sobre la optimización de las propiedades físicas de los moldes elaborados con ligantes base agua, mediante la adición de polímeros durante el proceso de elaboración de las masas, lo cual conduce a lo siguiente:

Mejora la resistencia mecánica de los moldes en verde, lo cual disminuye la tasa de roturas de los mismos durante el proceso de elaboración.

Mejora la permeabilidad de los moldes, a los efectos de disminuir la cantidad de gases atrapados en el metal solidificado, y así mejorar su calidad.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

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.

### 2.1. Secuencia de operaciones para la construcción de las muestras

#### 2.1.1. Moldeo:

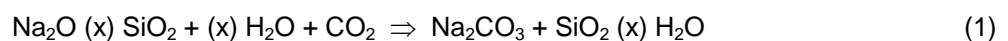
Se procedió en forma sucesiva a la inmersión de los modelos de cera o de polímero, en el barro refractario, seguido del correspondiente estucado con distintos materiales refractarios: ortosilicato de circonio y chamote sílico aluminoso. Fue repetido dicho proceso hasta completar seis capas de barro refractario y relleno. Se utilizó en todas las capas el Silicato de Sodio como aglomerante, variando el refractario del barro y del relleno de cada capa. En la Tabla 1 se detalla la construcción de los moldes tipo cáscara.

Tabla 1. Composición de las cáscaras

Refractario barro primario	Harina circonio # 320
Refractario relleno 1° capa	Arena circonio # 100
Refractario barro secundario	Harina circonio # 320
Refractario relleno 2° a 6° capas	Chamote # 30/70

#### 2.1.2. Gelificación:

Luego de estucar cada una de las capas aplicadas, se procedió a la gelificación de las mismas en forma secuencial, en una atmósfera de dióxido de carbono. El objeto de esta etapa es que el silicato de sodio realice la siguiente reacción química:



(Donde x es 3, 4, ó 5)

Este último producto de la reacción, durante esta gelificación y el posterior secado es el que forma la red de gel que mantiene las partículas unidas.

### 2.1.3. Secado:

Al completar el moldeo con su fraguado correspondiente, los grupos de probetas de distintos espesores, fueron sometidos al secado en aire forzado por espacio de 120 horas. En el caso de las probetas tipo barra para la determinación de resistencias mecánicas, al culminar el secado, se procedió a abrir las cáscaras elaboradas, a los efectos de retirar los modelos de cera sobre los cuales se confeccionaron las cáscaras cerámicas. En la figura 1 se pueden apreciar las distintas probetas, durante la operación de secado.

### 2.1.4. Calcinado:

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 polímero: el Polivinil Alcohol (PVA), en los barros, llegándose hasta el 6 % en masa, de adición de dicho polímero como valor máximo.

El procedimiento completo de moldeo fue realizado en una sala acondicionada a 20 / 21°C y 50 / 55 % de humedad relativa ambiente.



Figura 1. Muestras utilizadas, durante la operación de secado

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

A fin de determinar la resistencia mecánica de las distintas muestras, se utilizó una Máquina Universal de Varela P. et al / Utilización de polímeros para mejorar las propiedades de moldes cerámicos para fundición a la cera perdida

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:

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

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]

### 2.3. 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:

$$Pb = \frac{Vs \cdot Q \cdot D}{P \cdot A} \quad (3)$$

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

La figura 2 muestra gráficamente los resultados de resistencia mecánica, específicamente el módulo de ruptura (MOR) para distinto porcentaje de adición de polímero (PVA) en los barros. 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 26 % en la resistencia mecánica de los moldes sin calcinar, con una adición de PVA del 2% en masa, respecto a los mismos moldes sin agregado de polímero. Dicho aumento es muy importante, puesto que contribuye a disminuir la tasa de falla de los moldes, que se da principalmente durante el descerado de los moldes, 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 con la ocupación de poros por parte del polímero, lo cual disminuye la concentración de tensiones. Sin embargo, para agregados mayores de polímero, se puede producir otro fenómeno: la rotura parcial de la red de sílice, debido al mayor agregado de polímero.

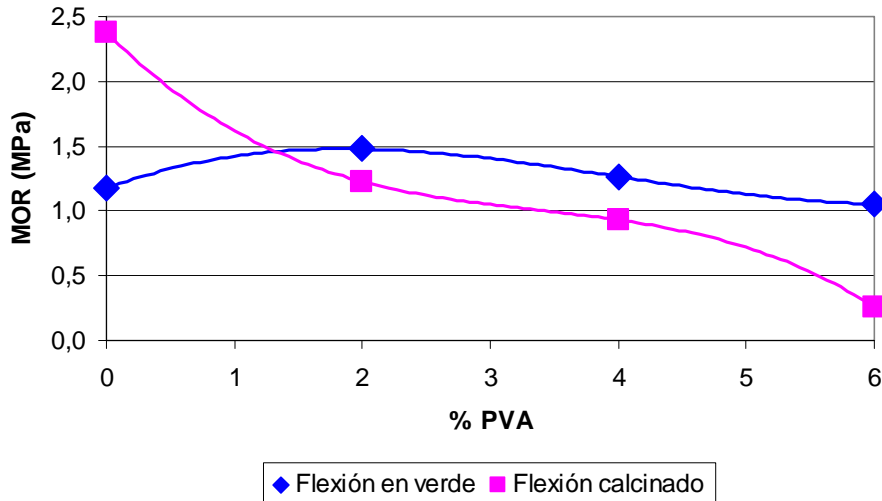


Figura 2. Resultados de resistencia mecánica

Sin embargo, también se aprecia una disminución del orden del 48% en la resistencia mecánica para dicho agregado del 2% de PVA, para los moldes calcinados, con respecto a los mismos moldes sin agregado de polímero. Dicho resultado puede tener dos aspectos: uno desfavorable, puesto que se ha reducido considerablemente 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 el polímero desaparece del molde, una vez que se ha calcinado éste, quedando una estructura más porosa que aquella obtenida al moldear sin polímero, lo cual redundaría en los resultados observados.

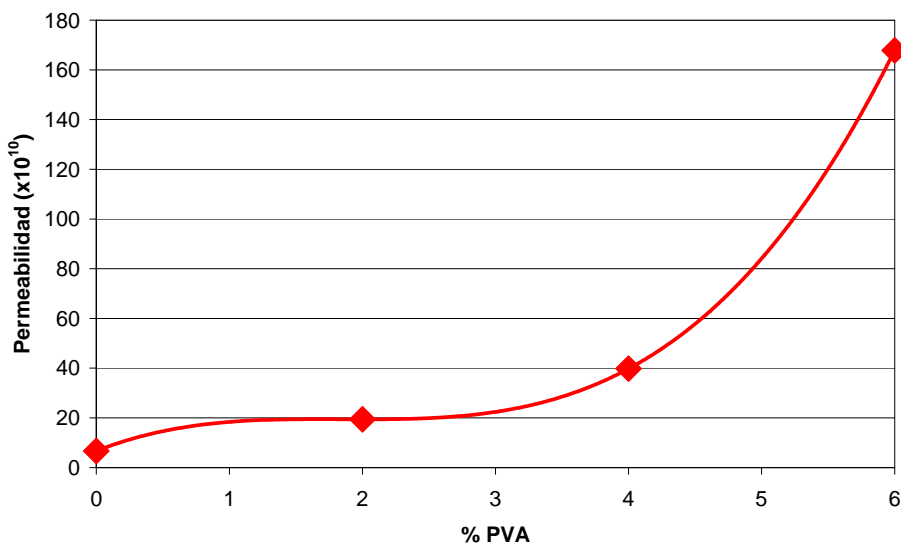


Figura 3. Resultados de Permeabilidad

Por otra parte, la figura 3 muestra gráficamente los resultados de permeabilidad de moldes calcinados, para distinto porcentaje de adición de polímero (PVA) en los barros. En dicha figura puede apreciarse un incremento significativo de la permeabilidad para cualquier adición de polímero en los barros. 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.

#### 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 un polímero, el polivinil alcohol.

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 polímero en los barros, del orden del 2% en masa, mejoran la resistencia mecánica de los moldes sin calcinar; incrementando significativamente la permeabilidad de los moldes. En contrapartida, este agregado empeora la resistencia mecánica de los moldes calcinados.

El procedimiento aquí expuesto puede utilizarse donde exista una importante tasa de rotura de moldes durante el proceso de descerado, por cuanto con dicho agregado de polímero se mejora la resistencia mecánica de los moldes en verde. En tales circunstancias deberá cuidarse el efecto que pueda ejercer esta adición en los moldes calcinados, es decir si la resistencia mecánica de los moldes calcinados, será suficiente para soportar las sollicitaciones requeridas.

#### 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 Microfusion", 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.