



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

## **Fundición de Precisión: Noyos Autofraguantes**

Kohl Rodolfo G., Oviedo Osvaldo E., Radevich Omar A., Varela Pablo 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**

El presente trabajo trata sobre la fabricación de noyos cerámicos para ser utilizados en fundición a la cera perdida mediante el uso de silicato de sodio como aglutinante de los materiales refractarios, tales como óxidos, silicatos, nitruros y carburos, con distintas granulometrías. Para obtener un comportamiento autofraguante de la mezcla, se agrega un éster que actúa como catalizador. Empleando la mezcla antes descrita los noyos se construyen mediante moldes, por el procedimiento de colada por gravedad. Después de que el molde ha sido llenado y la mezcla ha fraguado, se procede a desmoldar y secar en aire forzado para luego calcinarlas a 950 °C confiriendo a los noyos cerámicos estabilidad dimensional y térmica a altas temperaturas. La solubilidad de los noyos, necesaria para quitarlos de la pieza mediante lixiviación, se logra colocando las piezas en una solución de hidróxido de sodio en agua, a baja temperatura. Adicionalmente, se estudia la resistencia mecánica y la permeabilidad de los noyos obtenidos. Del análisis de los resultados se puede afirmar que las variables obtenidas indican que el proceso posee suficiente flexibilidad para ser adecuado a los diversos procedimientos empleados en la industria. El presente trabajo aporta a la industria de la fundición, una nueva técnica para la construcción de noyos cerámicos, que tiene la particularidad de emplear un aglutinante base agua, lo cual hace al proceso bastante menos contaminante que los métodos tradicionalmente empleados para dicho fin, que utilizan sistemas ligantes base alcohol.

**Palabras Claves:** Microfusión, Fundición a cera perdida, Noyos cerámicos, Noyos autofraguantes.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fundición a la cera perdida, conocido también como microfusión o fundición de precisión, se ha utilizado como un método para la obtención de objetos metálicos por solidificación, durante siglos. En este procedimiento se construye un molde refractario sobre un modelo de cera, luego se calienta el molde para fundir y desalojar dicha cera. El molde resultante se usa para colar el metal fundido y así obtener el objeto deseado [1] [2].

Generalmente, la fundición a la cera perdida involucra la inyección de cera en una matriz que tiene un volumen que define el objeto a ser fabricado, como por ejemplo las prótesis metálicas de cadera o rodilla, la cabeza de un palo de golf o una pieza de joyería. Seguidamente se retira de la matriz un duplicado en cera del objeto a fabricar. Los próximos pasos se dirigen a preparar una cáscara cerámica de material refractario sobre el modelo de cera. Este proceso, incluye la construcción de la cáscara cerámica, mediante capas sucesivas sobre el. Una vez que la cáscara alcanza el espesor deseado, se seca y se descera. La cera puede quitarse del molde utilizando: autoclaves con vapor, hornos de alta temperatura, hornos de micro ondas, etc. [3] [4] [5] [6].

En muchos casos la complejidad de la pieza es tal que el modelo de cera no se remueve fácilmente del molde. Por ejemplo, éste puede incluir regiones con cavidades, agujeros, contrasalidas u otras formas complejas que evitan su desmolde. En otros casos, se desea fabricar una pieza hueca o se puede necesitar moldear una rosca u otras formas con estas características. Para moldear formas complejas, generalmente son empleados los noyos. Estos noyos se construyen de un material adecuado y se usan para confinar el metal líquido en una forma particular. Por ejemplo, en la colada de una pieza hueca, se pondrá el noyo en un molde, dejando un espacio a ser llenado por el metal [7] [8].

Después que el proceso de fundición se ha completado es necesario quitar los noyos y con ese fin, estos se fabrican frecuentemente de un material fungible como por ejemplo un compuesto de arena y resinas orgánicas que puede quitarse rápidamente de la pieza colada. Los noyos de arena son relativamente baratos, pero no son capaces de proporcionar una superficie con acabado de alta calidad o mantener tolerancias dimensionales precisas. Tampoco son adecuados para colar formas complejas ni soportar temperaturas superiores a 300 °C [9] [10] [11] [12].

Una solución posible es proporcionar noyos fácilmente removibles, lo cual involucra el uso de un cerámico que cubra el noyo de espuma de polímeros sintéticos. En el proceso de fundición, la materia orgánica que comprende la espuma se quema fácilmente mientras el recubrimiento cerámico mantiene un acabado liso del metal. Este método proporciona piezas fundidas de calidad superior a la de un proceso de noyo de arena. Tales noyos son relativamente difíciles de fabricar, frágiles, caros, y no tienen buen desempeño en la fundición a la cera perdida. Por esta razón se han buscado alternativas capaces de proporcionar piezas de calidad como los noyos cerámicos.

Para los casos de emplear noyos, se inyecta la cera del modelo en una matriz que contiene al noyo cerámico que va a reproducir la parte del metal a ser fabricada.

El molde con el/los noyos cerámicos ubicados dentro se transfiere entonces a un horno y se calcina-precalienta a temperaturas de 900 °C a 1100 °C y a continuación es llenado con metal fundido. Después de la solidificación del metal, el molde cerámico se remueve fracturándolo. Las piezas obtenidas son entonces sometidas a chorros de arena o vapor para remover cualquier resto del molde que pudiese quedar adherido. El canal de colada es cortado de la porción útil de la pieza y la misma se sumerge en un baño de lixiviación

como el hidróxido de sodio para quitar el material del noyo cerámico de los pasajes interiores formados por éstos. El proceso de la lixiviación normalmente tiene lugar con temperatura y con agitación por un período de 2 a 24 horas. Los productos utilizados en la lixiviación, hidróxido de sodio diluido o fundido o ácido fluorhídrico deben quitar rápida y completamente el noyo cerámico sin atacar la aleación metálica colada.

Generalmente, la mayoría de los noyos cerámicos empleados en fundición de precisión se construyen con mezclas de sílice fundida, circonio, alúmina, silicato de aluminio, nitruro de silicio, etc., usando como aglutinante sílice coloidal o silicato de etilo. Los noyos se forman por compactado de una mezcla húmeda, por colada de un barro espeso o barbotina, o con moldeo por inyección o extrusión que, además, utiliza varios sistemas de resina y plastificadores aptos para tal fin. Los noyos obtenidos se calcinan para producir un elemento con dureza y resistencia suficientes.

El principal problema que se presenta es la rotura del noyo debido a su baja resistencia lo que contribuye significativamente al promedio de rechazo en las piezas terminadas. La resistencia de estos noyos no puede incrementarse sin reducir la solubilidad a niveles donde quitar el noyo es lento e incluso incompleto. La densidad del noyo se mantiene tan baja como sea factible para aumentar el área del reactante de la lixiviación y también para reducir la variación dimensional del noyo durante el último calentamiento.

Los defectos en las piezas coladas directamente asociados con los materiales del noyo incluyen:

- a. El material del noyo atrapado después de lixiviar debido a las masas localmente insolubles dentro del noyo o el acceso restringido para lixiviar.
- b. Las inclusiones de partículas de noyo expulsadas en la pared de la aleación.
- c. Las áreas vacías en la pared de la pieza que es el resultado del cambio dimensional del noyo, rotura o distorsión en el momento de moldear.
- d. La rotura o fisura del molde como resultado de la diferencia de la dilatación térmica entre la cáscara y el noyo.
- e. La porosidad en la pieza producida por la reacción de metal fundido con el material del noyo lo que produce gases.
- f. Los gases de los noyos atrapados en la colada del metal fundido.

En el presente trabajo se detalla la obtención de noyos cerámicos para ser utilizados en fundición a la cera perdida contruidos con mezclas de materiales refractarios aglutinados con silicato de sodio.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la construcción de noyos cerámicos, los materiales refractarios empleados fueron mezclas de sólidos tales como sílice fundida, sílice, alúmina, aluminio silicatos, nitruro de silicio, óxido de circonio, zirconia, oxido de magnesio, carburo de silicio y nitruro de silicio, etc., con granulometría comprendida entre 60 y 400 mallas según IRAM. Como aglutinante, silicato de sodio con módulo (relación  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ ), 2 a 3, preferentemente 2.2 a 2.6, al que se le agregó agua en cantidad suficiente para lograr una masa de moldeo semilíquida o barbotina. Para lograr una liga química y obtener un comportamiento autofraguante de la mezcla, se agregó un éster para que actúe como catalizador, en este caso diacetina o triacetina en cantidades de 2% al 12% del peso del silicato de sodio empleado, preferentemente del 5% al 8%.

Los noyos se construyeron mediante moldes o cajas de noyos, por el procedimiento de colada por gravedad, empleando la mezcla antes descrita. Después de que el molde ha sido llenado la mezcla fragua en un lapso de 5 a 120 minutos, dependiendo del tipo y cantidad de éster empleado. A continuación se procede a desmoldar y secar en aire forzado durante 72 horas para luego calcinarlas a 950 °C confiriendo a los noyos

cerámicos estabilidad dimensional y térmica a altas temperaturas.

A fin de determinar las propiedades mecánicas de los noyos, se utilizó el MOR (Modulus Of Rupture), el cual se determinó con muestras de cerámica rectangulares de 70x30x6 mm. Las muestras fueron evaluadas utilizando una Máquina Universal de Ensayos Digital para Masas de Moldeo, con montaje para flexión, apoyos flotantes y carga aplicada en tres puntos, siendo la luz entre apoyos de 50 mm, calculando el módulo de rotura mediante la Ecuación (1)

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

Donde:

P = carga de rotura

L = distancia entre apoyos

b = ancho de la muestra en el punto de rotura

h = espesor de la muestra en el punto de rotura

Para determinar la permeabilidad de los cerámicos se utilizaron las muestras circulares de 60 mm. de diámetro y 6 mm. de espesor, las que fueron construidas en forma simultánea a las de flexión empleando el mismo procedimiento. Estas muestras se montaron en un recipiente con tapa roscada la que posee un agujero de 50 mm. de diámetro y en su parte inferior la conexión al instrumento de medida. El sello entre la probeta y el dispositivo se construyó utilizando caucho de silicona. Los ensayos se realizaron con un Permeámetro Digital de Accionamiento Neumático. La permeabilidad se calculó mediante la Ecuación (2):

$$P = \frac{h \times v \times \nu}{p \times s \times t} \quad (2)$$

P = permeabilidad

v = volumen percolado en ml.

h = altura de la probeta en cm.

p = presión de aire en g/cm<sup>2</sup>

s = sección de la probeta en cm<sup>2</sup>

t = tiempo requerido en minutos

$\nu$  = viscosidad cinemática del aire en poises

La solubilidad de los noyos, necesaria para quitarlos de la pieza, se determinó mediante diferencia de pesos antes y después del ensayo, colocando muestras del cerámico en una solución de hidróxido de sodio al 50% en agua, en baño maría a 65°C, sin agitación, durante 48 horas.

A los efectos del presente trabajo, fueron elaborados tres tipos de noyos, a los cuales se les efectuó los correspondientes ensayos de resistencia mecánica (MOR) y de permeabilidad.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Ejemplo 1:

Para la evaluación de las propiedades de los cerámicos se emplearon mezclas de refractarios. En este ejemplo, la mezcla estuvo compuesta por 70% de harina de circonio malla IRAM 325 y 30% de arena de circonio, malla IRAM 60/200, porcentajes referidos al peso de los sólidos.

Tabla 1: Resultados obtenidos con el Ejemplo N° 1

% Silicato de Sodio	MOR [KPa]	Permeabilidad [cm <sup>2</sup> ]	Lixiviación [gr/h.]
3.0	2591	3.70 x 10 <sup>-10</sup>	1.72
3.5	4715	3.71 x 10 <sup>-10</sup>	1.46
4.0	4961	3.85 x 10 <sup>-10</sup>	1.07
5.0	8361	4.71 x 10 <sup>-10</sup>	0.01
6.0	11968	5.37 x 10 <sup>-10</sup>	0.00
7.0	14064	5.59 x 10 <sup>-10</sup>	0.00

Esta mezcla fue aglutinada con silicato de sodio, módulo 2.6, en distintas proporciones a saber: 3%; 3.5%; 4%; 5%; 6% 7%, referidos al peso de los sólidos, agregando agua destilada en cantidad suficiente para lograr una masa de moldeo semi-líquida o barbotina. El catalizador empleado fue diacetina en una proporción de 7.5% del peso del silicato de sodio. En todo el proceso se empleó una mezcladora vertical a paletas. Las muestras para ensayos, de forma rectangular y circular se construyeron empleando moldes con las formas antes citadas, mediante moldeo por colada, una vez que el material ha fraguado se procedió al secado y calcinación del mismo según el procedimiento descripto anteriormente.

En la tabla 1 se muestran los resultados.

### 3.2. Ejemplo 2:

En este ejemplo se empleó una mezcla de refractarios compuesta por 50% de harina de circonio y 50% de arena de circonio, porcentajes referidos al peso de los sólidos.

Esta mezcla fue aglutinada con silicato de sodio, agua y catalizador con las mismas proporciones utilizadas en el Ejemplo 1

Las muestras para ensayos, de forma rectangular y circular se construyeron también como en el caso anterior. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados obtenidos con el Ejemplo N° 2

% Silicato de Sodio	MOR [KPa]	Permeabilidad [cm <sup>2</sup> ]	Lixiviación [gr/h.]
3.0	2526	3.82 x 10 <sup>-10</sup>	1.28
3.5	3281	4.40 x 10 <sup>-10</sup>	1.01
4.0	3856	4.55 x 10 <sup>-10</sup>	0.99
5.0	7428	6.18 x 10 <sup>-10</sup>	0.69
6.0	11477	8.32 x 10 <sup>-10</sup>	0.00
7.0	12259	8.93 x 10 <sup>-10</sup>	0.00

### 3.3. Ejemplo 3:

En este ejemplo se empleó una mezcla de refractarios compuesta por 30% de harina de circonio y 70% de arena de circonio, porcentajes referidos al peso de los sólidos.

Esta mezcla fue aglutinada con silicato de sodio, agua y catalizador con las mismas proporciones utilizadas en el Ejemplo 1

Las muestras para ensayos, de forma rectangular y circular se construyeron también como en el caso anterior. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados obtenidos con el Ejemplo N° 3

% Silicato de Sodio	MOR [KPa]	Permeabilidad [cm <sup>2</sup> ]	Lixiviación [gr/h.]
3.0	2058	1.40 x 10 <sup>-9</sup>	0.31
3.5	1945	1.39 x 10 <sup>-9</sup>	0.30
4.0	2854	1.24 x 10 <sup>-9</sup>	0.07
5.0	4795	2.83 x 10 <sup>-9</sup>	0.00
6.0	6886	1.56 x 10 <sup>-9</sup>	0.00
7.0	11986	2.34 x 10 <sup>-9</sup>	0.00

En base a los resultados obtenidos podemos decir que en las muestras rectangulares, construidas para estos análisis, la resistencia se incrementa a medida que el porcentaje de silicato de sodio aumenta.

Vemos también que la resistencia de los noyos descende con el incremento de la granulometría de la mezcla de los refractarios. La variación en el tamaño de grano del refractario no representa una pérdida significativa de calidad superficial de los noyos.

A su vez, para evaluar la permeabilidad de estos cerámicos se determinó que para cada una de las mezclas el incremento del porcentaje de silicato de sodio no tiene influencia significativa.

La permeabilidad se incrementa con el aumento de la granulometría de los sólidos. Por lo tanto, para la construcción de los noyos, se deberá emplear la mezcla adecuada considerando la geometría y la masa del noyo.

Con referencia a la capacidad de disolver los noyo en una solución de hidróxido de sodio vemos que a medida que se incrementa el porcentaje de silicato de sodio la solubilidad disminuye hasta cero a partir de 5.00 % para mezclas 70/30 y 30/70, para mezclas 50/50 se alcanza este valor con 6.00 % de aglutinante. Además, la solubilidad decrece con el aumento del tamaño de las partículas de refractario.

Los valores obtenidos indican que los noyos pueden ser disueltos con relativa facilidad, empleando un procedimiento de bajo costo y minimizando los riesgos de operar con productos cáusticos diluidos a baja temperatura.

Del análisis de los resultados determinados en los ejemplos precedentes podemos decir que las variables obtenidas indican que el proceso posee suficiente flexibilidad para ser adecuado a los diversos procedimientos empleados. Para determinar la mejor combinación de refractarios y cantidad de aglutinante, se debe tener en cuenta las características del metal, presión de inyección del modelo y el procedimiento de lixiviación a aplicar.

#### 4. CONCLUSIONES

Ha sido desarrollada una técnica que consiste en el empleo de un aglutinante base agua para la construcción de noyos cerámicos para fundición a la cera perdida, que se caracteriza fundamentalmente, porque dicho aglutinante, en presencia de ésteres, se comporta como autofraguante.

Han sido ensayadas distintas combinaciones de materiales refractarios en estado semilíquido o barbotina; utilizándose silicato de sodio, agua, agentes catalizadores (distintos ésteres tales como diacetina y triaceti-

na) y polvos refractarios compuestos por: sílice fundida, sílice, alúmina, aluminosilicatos, silicato de circonio, óxido de circonio, óxido de magnesio, carburo de silicio y nitruro de silicio. Fueron realizadas determinaciones de resistencia mecánica y permeabilidad.

Del análisis de los resultados obtenidos, se puede afirmar que las variables obtenidas indican que el proceso posee suficiente flexibilidad para ser adecuado a los diversos procedimientos industriales empleados en la actualidad.

## 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, Pag. 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, 1997.
- [4] Varela P., Cotella N., González Oliver C., Kohl R., Actas de Congreso: CONAMET/SAM – Simposio Materia, Rol del Aglomerante de Sílice en Fundición de Precisión, Santiago, Chile, Pag. 79-84, 2002.
- [5] Kohl R, Alcoba M, Bruno M, Varela P, Cotella N, Radevich O., Actas de Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia, Fundición a La Cera Perdida: Materiales para Modelos, ISBN 987-20975-0-X, 2003.
- [6] Pannunzio Miner E., Varela P., Cotella N., Kohl R., Actas de Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia, Estudio de moldes para fundición de precisión: microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos x de polvos, ISBN 987-20975-0-X, 2003.
- [7] Kohl R., Oviedo O., Varela P., Radevich O., Actas de Jornadas CONAMET/SAM, Fundición a la Cera Perdida: Noyos Cerámicos, 2004.
- [8] Kohl R., Oviedo O., Radevich O., Sarutti J., Actas de Congreso Binacional SAM/CONAMET, Fundición de precisión: proceso para la fabricación de noyos cerámicos, Mar del Plata, ISBN 987-22443-0-8, 2005.
- [9] Kohl R., Oviedo O., Radevich O., Procedimiento destinado a fabricar noyos cerámicos para fundición a la cera perdida, Patente de Invención Solicitada por universidad Nacional de Río Cuarto, 2006.
- [10] Patente U.S. 6,045,745, 2000.
- [11] Patente U.S. 5,498,280, 1996.
- [12] Patente U.S. 5,207,964, 1993.