

Recibido: 25 / 11 / 2007, aceptado en versión final: 19 / 12 / 2007

## Permeabilidad y resistencia mecánica de cáscaras cerámicas empleadas en el proceso de microfundición

PERMEABILITY AND MECHANICAL RESISTANCE OF SHELLS CERAMICS USED IN THE PROCESS OF PRECISION INVESTMENT CASTING

María del Pilar Torres Sanabria<sup>1\*</sup>, Luis Fernando Lozano Gómez<sup>2\*\*</sup>

### RESUMEN

El proceso de fundición a la cera perdida provee gran cantidad de piezas a la industria, con una excelente terminación superficial, estrechas tolerancias dimensionales y formas bastante complejas. Una de las etapas más importantes del proceso es la construcción de las cáscaras o moldes cerámicos, ya que cuando éstas no cumplen con los requerimientos necesarios revelan índices de falla relativamente altos, que influyen directamente en la calidad de las piezas, proporcionando así un gran número de productos no conformes. El presente estudio muestra la caracterización de los moldes cerámicos a base de sílice aglomerados con silicato de etilo, partiendo de un diseño experimental de 2<sup>2</sup>, en donde se evalúa la permeabilidad y resistencia mecánica de la cáscara (resistencia a la flexión MOR), variando el espesor y el tiempo de secado. A continuación se identifica la microestructura del molde en verde, calcinado y sinterizado, empleando la técnica de microscopía electrónica de barrido y, por último, se relaciona la microestructura obtenida con las dos propiedades mencionadas.

**Palabras clave:** Microfundición, permeabilidad, resistencia a la flexión (MOR), cáscaras cerámicas.

### ABSTRACT

The process of smelting to the lost wax provides great amount of pieces to the industry, with an excellent superficial completion, reduce dimensional tolerances and quite complex forms. One of the most important stages of the process is the construction of the shells or ceramic molds, since when these do not fulfill the necessary requirements they reveal relatively high indices of failure, that influence directly in the quality of the pieces, thus providing, a great number of products not conform. The present study shows the characterization of the ceramics molds silica-based agglomerates with ethyl silicate, starting off of a experimental design of 2<sup>2</sup>, where is evaluates the permeability and mechanical resistance of the shell (Resistance to flexion MOR), varying the thickness and the drying time. Next identifies the microstructure of green mold, calcined and sintered, using the technique of scanning electron microscopy and finally relates the microstructure obtained with the two properties mentioned.

**Keywords:** Precision investment casting, permeability, resistance to flexion (MOR), shells ceramics.

<sup>1\*</sup> Estudiante de Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

<sup>2\*\*</sup> Escuela de Postgrado - Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

E-mail: [mapitos35@yahoo.es](mailto:mapitos35@yahoo.es) / [fernandolozanouptc@hotmail.com](mailto:fernandolozanouptc@hotmail.com)

## I. INTRODUCCIÓN

La técnica de fundición a la cera perdida, o también llamado microfusión consiste en revestir un modelo de cera, con varias capas constituidas por una mezcla de elementos cerámicos refractarios y un aglomerante, aplicado de manera alterna con material de relleno de diferente granulometría (aumentando el tamaño de grano a medida que se incrementan el número de capas aplicadas para garantizar la permeabilidad del molde) hasta lograr un molde de espesor adecuado (MÜLLERS, 1992). El aglomerante reacciona químicamente durante el secado para formar una red de gel, que sostiene el material cerámico. Posteriormente, el modelo es removido y la cerámica calcinada para formar una estructura rígida en donde se vierte el metal fundido, conformando así una réplica exacta del modelo original.

El baño refractario está constituido por una fase sólida y otra líquida. La fase líquida está compuesta de aglutinantes, tensoactivos y antiespumantes. Como aglutinante es tradicional la utilización industrial de la sílice coloidal o el silicato de etilo (B.I.C.T.A., 1984).

Con el propósito de buscar alternativas que propicien mejores resultados en el proceso de microfusión que se lleva a cabo en la industria militar, la Fábrica Santa Bárbara, ubicada en Sogamoso (Colombia), el presente trabajo estudia la influencia de las propiedades de permeabilidad y resistencia mecánica de los moldes cerámicos obtenidos por microfusión.

## II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Diseño experimental

Se trabajó un diseño experimental factorial de 2<sup>2</sup> con tres repeticiones (ver tabla 1), en donde las variables respuesta son la resistencia mecánica y la permeabilidad del molde cerámico y las constantes son la granulometría de la arena, las condiciones del cuarto de secado (temperatura de 20+/-3 °C, humedad relativa 55-65%) y la viscosidad del baño cerámico.

Las variables independientes son:

- Número de capas aplicadas:

$$C_1 = 6 + \text{sellante } 7$$

$$C_2 = 7 + \text{sellante } 8.$$

- Tiempo de secado de la cáscara:

$$t_1 = 41 \text{ horas.}$$

$$t_2 = 64 \text{ horas.}$$

Tabla N.º 1. Diseño experimental factorial 2<sup>2</sup>

Tratamientos	1	a	b	ab
Repeticiones				
I	C <sub>1</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> t <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>2</sub>
II	C <sub>1</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> t <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>2</sub>
III	C <sub>1</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> t <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> t <sub>2</sub>

### Materiales

Los materiales requeridos para la fabricación de la cáscara cerámica son: Arena sílice # 200, 70, 30 y 16, humectante, antiespumante y como aglutinante, silicato de etilo hidrolizado (INDUMIL, 2004).

### Resistencia mecánica (módulo de ruptura MOR)

Para la realización de las pruebas de resistencia mecánica de los moldes aglutinados con silicato de etilo, se emplea el ensayo de flexión, donde se hace necesario hallar el módulo de ruptura (MOR), el cual se determinó a partir de probetas ilustradas en la figura N.º 1, fabricadas por inyección de cera en matriz metálica.

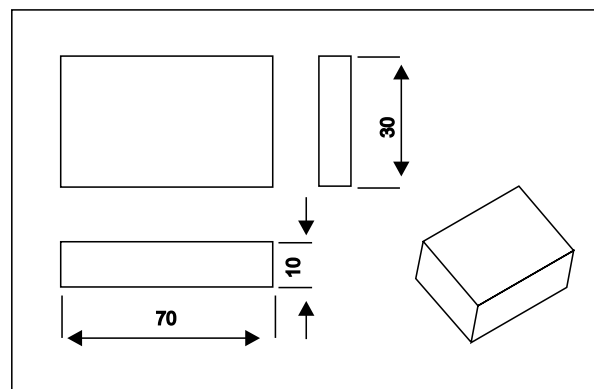


Figura N.º 1. Probeta en cera para ensayo de flexión (MOR).

Los modelos en cera se montan en racimos, tal como se observa en la foto 1 y se va construyendo la cáscara cerámica, aplicando una mezcla de elementos cerámicos refractarios y el aglutinante, alternada con material de relleno hasta lograr una cáscara con un espesor que varía de acuerdo al número de capas aplicadas.



Foto 1. Montaje de probetas para ensayos de flexión MOR (rectangulares) y de permeabilidad (esféricas).

El racimo obtenido es llevado al proceso de descerado en una autoclave que trabaja a una presión de 90 PSI y a una temperatura de 160 °C, luego es sometido a calcinado en un horno que maneja la curva de calentamiento ilustrada en la figura N.º 2.

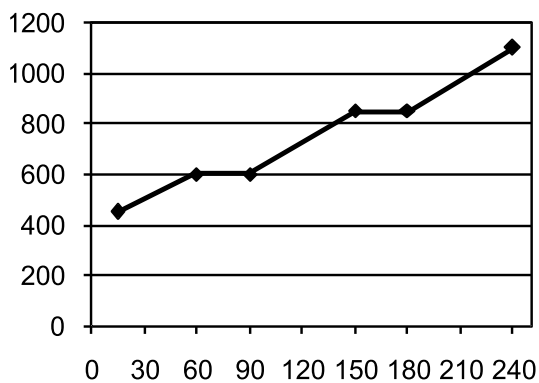


Figura 2. Curva de calcinado cáscaras cerámicas.

Por último se deja enfriar el racimo dentro del horno hasta temperatura ambiente y se desprenden las probetas del racimo. Cada una de ellas se cortan transversalmente para obtener dos probetas en cáscara cerámica (ver foto 2).

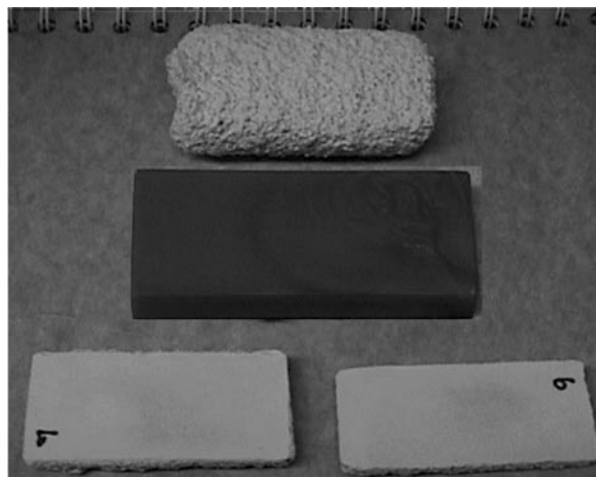


Foto 2. Probetas en cáscara cerámica para ensayos de flexión MOR.

Los ensayos de flexión se aplican a las cáscaras en verde, ya que tienen que soportar la presión del material del modelo en cera al extraerlo y a las cáscaras calcinadas que deben contrarrestar el choque térmico, la presión metalostática y la masa del metal fundido (HENDRICKS, 1990).

Para determinar la resistencia a la flexión de las probetas, se utilizó una máquina universal de ensayos de tipo digital, con el dispositivo para flexión, apoyos flotantes y carga aplicada en tres puntos, siendo la luz entre apoyos de 50 mm y la velocidad de carga de 1.5 mm/min (ver foto 3). (VARELA P.G. *et al*, 2000).

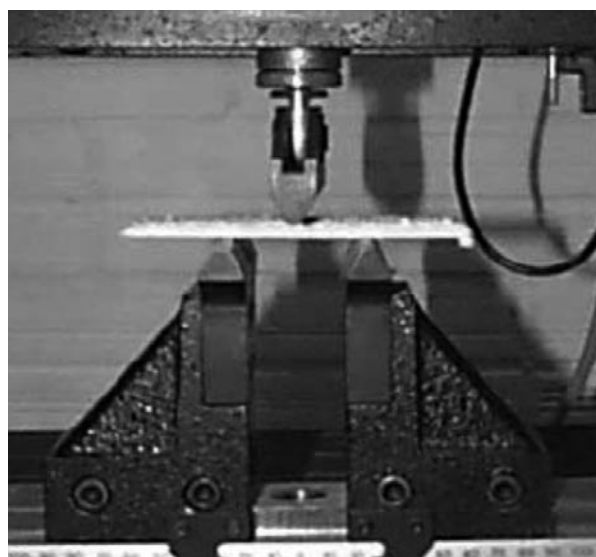


Foto 3: Máquina universal de ensayos para obtener el MOR.

Los valores de resistencia a la flexión (MOR), para las muestras en verde y calcinadas son obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

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

Donde:

M = Módulo de ruptura en [Pa].

P = Carga de rotura en [N].

L = Distancia entre soportes de apoyo en [m].

b = Ancho de la muestra en el punto de rotura [m].

d = Espesor de la muestra en el punto de rotura [m].

### Permeabilidad

Al colar las piezas metálicas es importante tener en cuenta que durante el llenado de los moldes cerámicos se requiere desalojar el aire contenido en ellos y evacuar los gases que se desprenden del metal a fin de evitar defectos en la pieza al quedar ocluidos dichos gases en la misma. Por tal razón, es necesario controlar la variación de la porosidad en el molde. La porosidad evacuada mediante la permeabilidad, contribuye a definir la calidad de las piezas obtenidas (OVIEDO O. *et al*, 2000).

Para la determinación de la permeabilidad de la cáscara cerámica, se emplean como modelos para la confección de las probetas, pelotas de tenis de mesa adosadas a tubos cerámicos (KOHL, R. *et al*, 1993). Las dimensiones se especifican en la figura 3.

Los modelos obtenidos se montan en racimos (ver foto 1) y se va construyendo la cáscara cerámica, de la misma forma que para las probetas de resistencia a la flexión.

La permeabilidad se halla sobre las muestras sintetizadas (ver foto 4) y se determina a temperatura

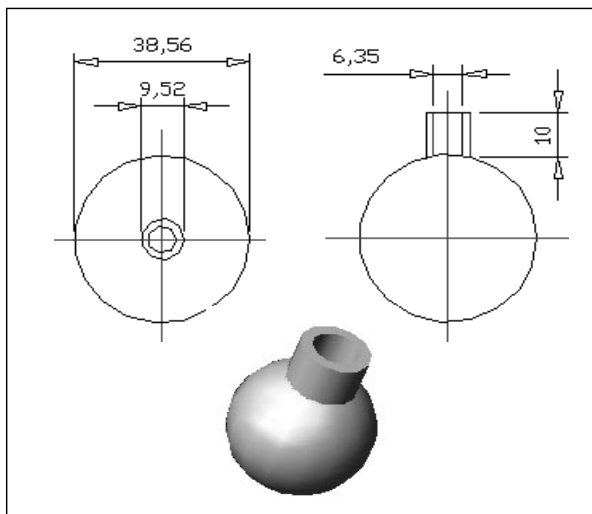


Figura 3. Probeta para ensayo de permeabilidad de la cáscara cerámica.

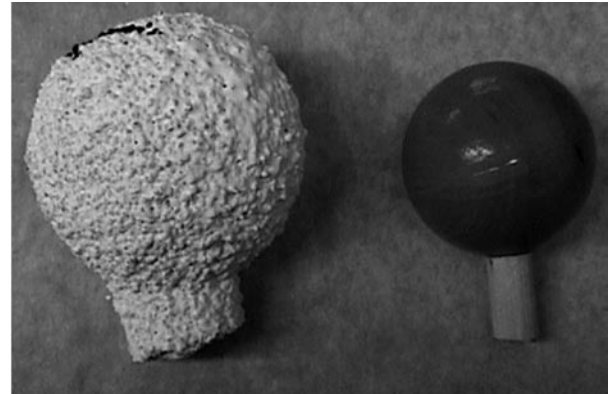


Foto 4. Probeta para el ensayo de permeabilidad.

ambiente, utilizando la técnica definida por la American Foundrymen's Society (AFS) para masas de moldeo.

Los ensayos se realizaron en un permeámetro digital (ver foto 5).

La permeabilidad se determina midiendo el tiempo necesario para que un cierto volumen de aire, a una presión constante, pase a través de la probeta esférica, la cual está definida por la ecuación 2.

$$P = \frac{h' \cdot v \cdot \nu}{p \cdot s'} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

h': Espesor de la cáscara [cm].

v: Volumen de aire [cm<sup>3</sup>].

ν: Viscosidad cinemática del aire [dynas\*s/cm<sup>2</sup>].

p: Presión de trabajo [dynas/cm<sup>2</sup>].

s': Superficie interna de la cáscara [cm<sup>2</sup>].

t: Tiempo [s].

p: Permeabilidad métrica [cm<sup>4</sup>/g.min].



Foto 5. Permeámetro digital para pruebas de cáscaras cerámicas.

### III. RESULTADOS

#### Ensayos de resistencia a la flexión

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión a partir del diseño experimental aplicado, se llevan a una gráfica de espesor contra módulo de ruptura MOR.

Se aplicaron 6 y 7 capas con un tiempo de secado del molde de 41 y 64 horas. Cada tratamiento se repite tres veces.

Para la cáscara en verde, la figura N.º 4 muestra los resultados de los tratamientos 1 y a, con un tiempo de secado del molde de 41 horas. En la figura N.º 5 se ilustran los resultados de los tratamientos b y ab, con un tiempo de secado de 64 horas.

Para la cáscara calcinada, la figura N.º 6 presenta los resultados de los tratamientos 1 y a, con un tiempo de secado de 41 horas. En la figura N.º 7 se observan los resultados de los tratamientos b y ab, con un tiempo de secado de 64 horas.

Comparando las figuras N.º 4, 5, 6 y 7 se observa que la resistencia a la flexión de la cáscara en verde y

calcinada presenta un comportamiento directamente proporcional al espesor.

Los datos obtenidos en las figuras N.º 4 y 5 son muy similares; igualmente para las figuras N.º 6 y 7, lo que permite concluir que el tiempo de secado seleccionado (41 y 64 horas) no afecta de forma significativa la resistencia del molde y que se pueden utilizar indistintamente.

De acuerdo a los resultados, la resistencia de la cáscara en verde es mucho mayor que la del molde calcinado; esto se debe a que el ensayo MOR se realizó a temperatura ambiente y al enfriar el molde calcinado por debajo de 210 °C, la transformación de la sílice, de cristobalita de forma alta a baja, causa que la cáscara se fragilice (Fused Silica Solutions Corporate Headquarters, 2006).

#### Ensayos de permeabilidad

Los resultados obtenidos a partir del diseño experimental aplicado, se llevan a una gráfica de espesor contra permeabilidad.

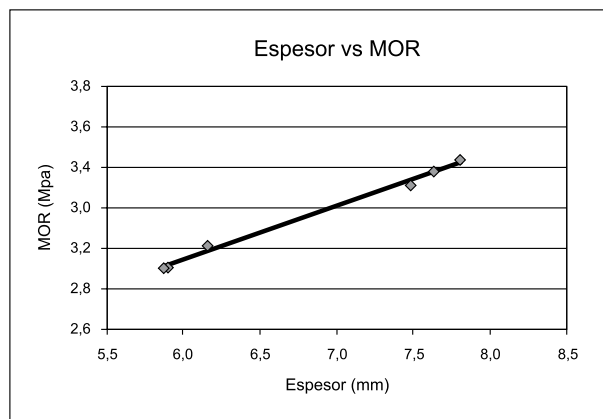


Figura N.º 4. Variación de la resistencia MOR de probetas en verde en función del espesor con un tiempo de secado de 41 horas.

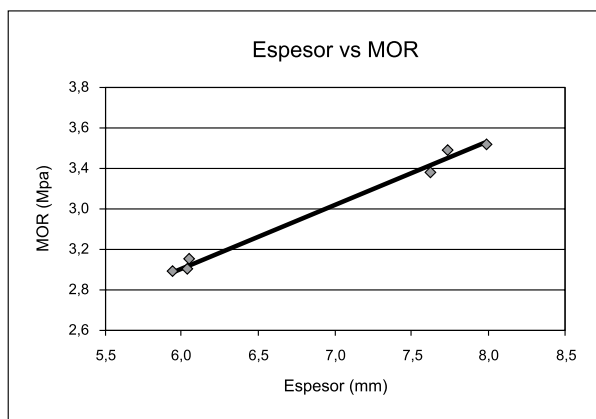


Figura N.º 5. Variación de la resistencia MOR de probetas en verde en función del espesor con un tiempo de secado de 64 horas.

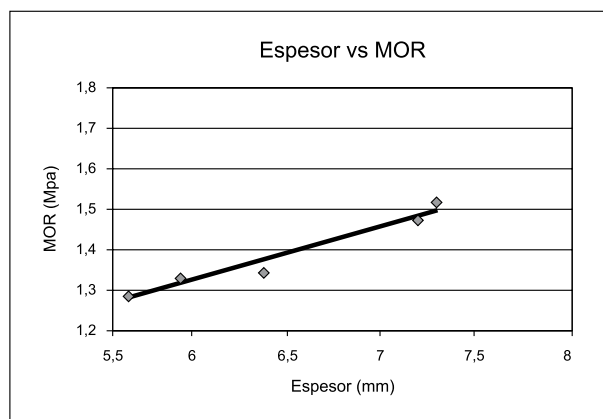


Figura N.º 6. Variación de la resistencia MOR de probetas calcinadas en función del espesor con un tiempo de secado de 41 horas.

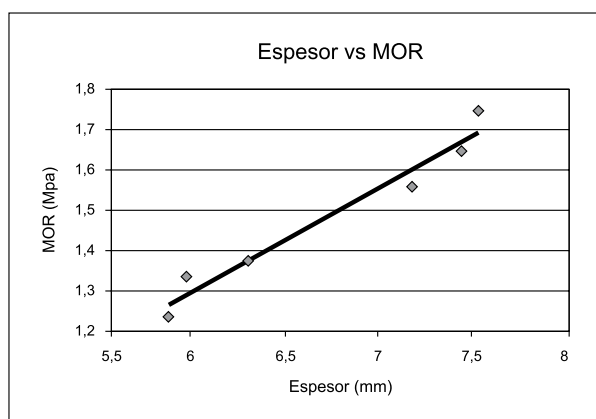
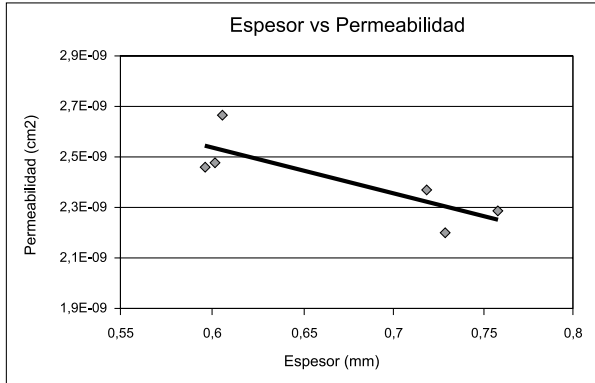
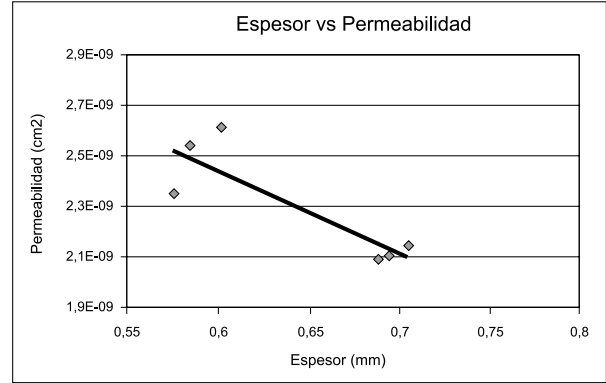


Figura N.º 7. Variación de la resistencia MOR de probetas calcinadas en función del espesor con un tiempo de secado de 64 horas.



**Figura N.º 9.** Variación de la permeabilidad en función del espesor obtenido con un tiempo de secado de 64 horas.



**Figura N.º 8.** Variación de la permeabilidad en función del espesor obtenido con un tiempo de secado de 41 horas.

Los ensayos se realizan a la cáscara calcinada. La figura N.º 8 muestra los resultados de los tratamientos 1 y a, con un tiempo de secado del molde de 41 horas. En la figura N.º 9 se ilustran los resultados de los tratamientos b y ab, con un tiempo de secado de 64 horas.

Al comparar las figuras N.º 8 y 9 se observa que la permeabilidad de la cáscara presenta un comportamiento inversamente proporcional al espesor; al aumentar el número de capas aplicadas el espesor se hace mayor, mientras que la permeabilidad disminuye.

Igual que para la resistencia mecánica, los datos obtenidos en las dos figuras son muy similares, por lo tanto el tiempo de secado seleccionado (41 y 64 horas) no tiene mayor influencia en la permeabilidad del molde.

**Análisis por microscopía electrónica de barrido**

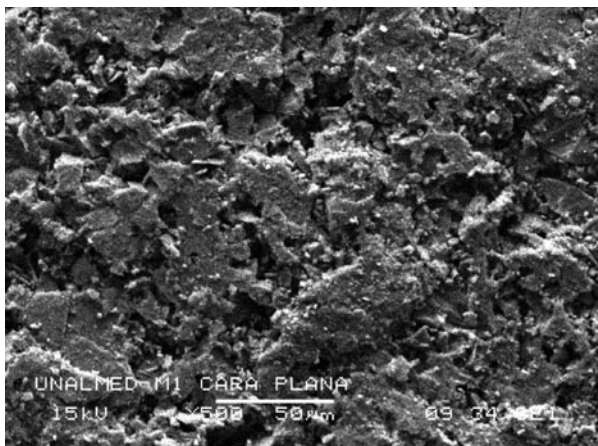
Los moldes cerámicos en verde, calcinados y después de colar el metal, se analizaron utilizando un microscopio electrónico de barrido con el fin de observar la morfo-

logía de la microestructura obtenida en cada una de las etapas de fabricación de la cáscara. Las micrografías fueron tomadas a la superficie plana de las probetas, la cual constituye la interfase con el metal.

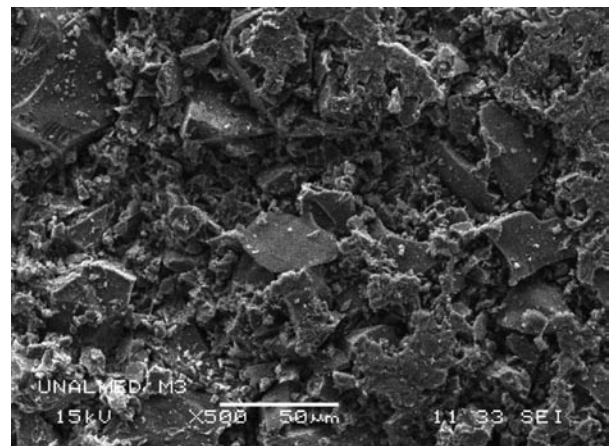
En la foto 5 se ilustra la microestructura de la cáscara en verde, en donde se observan los granos de sílice enlazados por el aglutinante, formando espacios que corresponden a los poros (zonas oscuras) responsables de la permeabilidad del molde.

La foto 6 muestra la microestructura de la cáscara calcinada a 1100°C. Se aprecia la variación en la geometría del grano. Los granos de sílice se encuentran libres, esto indica que no se presenta el fenómeno de sinterización. Existe mayor cantidad de espacios (poros) debido a que el aglutinante a esta temperatura se ha evaporado.

La microestructura del molde después de colar el metal se indica en la foto 7. Se observa la formación de cuellos de sinterizado y poros bien definidos. Se aprecia una grieta que se extiende a lo largo de la cáscara, la cual aparece en la etapa de enfriamiento del sistema.



**Foto 5.** Micrografía de la cáscara cerámica en verde a 500 X.



**Foto 7.** Micrografía de la cáscara cerámica después de colar el metal a 500 X.

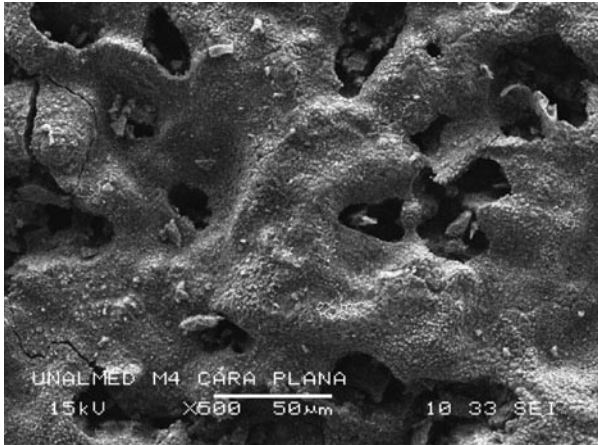


Foto 6. Micrografía de la cáscara cerámica calcinada a 1100 °C a 500 X.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha establecido que la resistencia a la flexión y la permeabilidad permiten conocer el comportamiento de los moldes cerámicos durante el proceso de microfusión; por tal razón es importante determinar estas dos propiedades para el sistema de cáscara utilizado.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que al aumentar el espesor de la cáscara se incrementa la resistencia mecánica (MOR) y se disminuye la permeabilidad de la misma.

El tiempo de secado seleccionado (41 y 64 horas) no presenta relevancia en el proceso de microfusión para el sistema de cáscara utilizado. En este caso se puede escoger el tratamiento más favorable económicamente.

La resistencia de la cáscara en verde es mayor que la del molde calcinado (ensayos realizados a temperatura ambiente). En el proceso real de microfusión al colar el metal, la cáscara alcanza altas temperaturas, lo que hace que se sinterice, en este momento la resistencia mecánica se incrementa y la permeabilidad se disminuye debido a la formación de los cuellos de sinterizado (ver foto 7). Al enfriar el sistema a temperatura ambiente, la sílice se fragiliza, permitiendo así un fácil desprendimiento del molde.

La utilización de la técnica de microscopía electrónica de barrido contribuye a identificar la estructura de la cáscara en cada una de las etapas de su fabricación. Las micrografías obtenidas permiten concluir que con la variación de la temperatura se presentó la transformación de fases características de la sílice: cuarzo, tridimita y cristobalita.

Al realizar las pruebas de permeabilidad y resistencia a la flexión de los moldes, se dificulta la medición del espesor, ya que no es uniforme; por tal razón se

requieren gran cantidad de probetas, a fin de incrementar la sensibilidad de los ensayos. Adicionalmente, por el comportamiento típico de los cerámicos es recomendable manejar los resultados utilizando técnicas estadísticas.

#### V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A.S.M. (1988), *Metals Handbook*. 9th edition, tomo 15.
2. B.I.C.T.A. (1984). *Shell Technology*, The British Investment Casters Technical Association.
3. DOLES, Ronald S. (1996). *A New Approach to the Characterization and Optimization of Investment Casting Shell Systems*: 9th World Conference on Investment Casting: San Francisco, California, USA. Paper N° 8
4. Fused Silica Solutions Corporate Headquarters: 510 Midway Circle. (2006) Midway, Tennessee 37809:USA HENDRICKS, M.J. Michael. (1990). *Ceramic Shell Permeability*, 38th Annual Meeting of the Investment Casting Institute, 1990.
5. INDUMIL (2004) Planta de Microfundición, Instructivo Baños cerámicos.
6. KOHL, R. OVIEDO, O., N. COTELLA, P. VARELA, V. MISKOVSKI, O. RADEVICH. (1993). *Construcción de Moldes para Fundición a la Cera Perdida Aglomerados con Silicato de Sodio*. I Workshop Brasileiro de Fundição de Precisão: Porto Alegre, Brasil, p. 40-43.
7. MÜLLERS, Tagle, (1992). *Fundición de precisión en cáscara cerámica*, Universidad Católica de Valparaíso.
8. OVIEDO, O.E., N.G. COTELLA, P.G. VARELA, O.A. RADEVICH y R.G. Col. (2000). *Caracterización de moldes cerámicos aglomerados con silicato de sodio para distintos espesores de cáscaras*. Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería, Río Cuarto Argentina. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, p 109-114.
9. VARELA P. G., COTELLA N. G., OVIEDO O. E., KOHL R. G. (1999). *Utilización del Índice de Fractura para la caracterización de sistemas cáscara aglomerados con silicato de sodi*. Jornadas Sam 99, Rafaela: Argentina.
10. THOMAS, Colin. (1996). A Review of Some of the Analytical Tools Used to Characterize Shell and Core Materials for High Temperature Alloy Investment Casting: 9th World Conference on Investment Casting: San Francisco, California, USA. Paper N° 9

11. VARELA P.G., COTELLA N.G., OVIEDO O. E., RADEVICH O. A., KOHL R. G. (2000). *Influencia de la velocidad de ensayo sobre el modulo de ruptura en moldes para fundición de precisión*: Jornadas Sam 2000, Neuquén: Argentina.
12. VARELA P.G., COTELLA N.G., OVIEDO O. E., RADEVICH O. A., KOHL R. G. (2003). *Utilización del ensayo de compresión para la caracterización del barro utilizado en fundición de precisión*. Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de ingeniería, Río Cuarto Argentina. Jornada SAM/CONAMET/ Simposio Materia: Argentina.