

## EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE POROS SOBRE LA PERMEABILIDAD Y LA TEXTURA DE MOLDES CERÁMICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN

*Carlina Londoño<sup>1</sup>, Arnaldo Alonso Baquero<sup>2</sup>, Elcy María Córdoba<sup>3\*</sup>*

1: Ing. Estudiante de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

2: Profesor Titular, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

3: Profesora Asociada, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

\* Contacto: ecordova@uis.edu.co

### RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la posibilidad de controlar la porosidad de un revestimiento refractario utilizado en el proceso de microfundición con la adición de tres agentes formadores de poros, Lauril sulfato de sodio, Polietilenglicol (PEG) y almidón de yuca. El control de la porosidad se evaluó con dos parámetros: tamaño de poro y su distribución en la matriz cerámica, encontrando que con la adición de PEG y almidón se obtiene mayor uniformidad en la matriz. Se encontró que cuanto mayor es la cantidad de agente utilizado se obtenían moldes más permeables y con resistencia mecánica adecuada, pero en el caso del Lauril Sulfato de Sodio y el almidón grueso, el acabado superficial del molde no se ajustaba a los requerimientos del proceso de microfundición. No se observaron diferencias importantes en la resistencia mecánica del molde cuando la temperatura de tratamiento térmico se disminuye de 595 a 400 °C.

**Palabras Clave:** *Permeabilidad, Agente formador de poros, Moldes cerámicos*

### ABSTRACT

The aim of this work has been study the possibility to control the porosity of a refractory mold used in the investment casting process with the addition of three pore forming agents: Sodium lauryl sulfate, Polyethylene glycol (PEG) and cassava starch. The porosity control was evaluated from two parameters: pore size and distribution into ceramic matrix. It was found that the addition of PEG and starch allows a greater uniformity on the matrix. According to the results, higher amount of agent increased permeability and adequate mechanical strength of the molds. Nevertheless, the addition of sodium lauryl sulfate and coarse starch affects surface of the mold and does not fit with the requirements for investment casting process. No significant differences was found into the mold strength as consequence of diminution of thermal treatment temperature from 595 to 400°C.

**Keywords:** *Permeability, Pore forming agent, Ceramic molds*

## **1 INTRODUCCIÓN**

El método tradicional de microfundición de joyería utiliza mezclas cerámicas compuestas por yeso, cristobalita- $\alpha$  y cuarzo- $\alpha$ , las cuales confieren a los revestimientos una excelente capacidad de copiar los detalles de los modelos de cera y la refractariedad necesaria para el proceso, dada la finura y forma acicular de los granos de yeso y la resistencia a elevadas temperaturas del cuarzo y la cristobalita [1]. No obstante, tales moldes se caracterizan por su baja permeabilidad, lo que obliga a realizar la colada del metal a temperaturas elevadas para favorecer el llenado del molde y la evacuación de los gases. De esta forma, se limita la aplicación de esta técnica al método de gemas preengastadas, dado el deterioro que estas sufren al exponerse a temperaturas elevadas.

La estructura del molde cerámico utilizado en el proceso de microfundición, en especial lo referente a su porosidad, influye sobre sus propiedades térmicas y mecánicas. Esto se debe a que la porosidad está relacionada con tres propiedades fundamentales de los revestimientos: conductividad térmica, permeabilidad y acabado superficial [2]. Se ha encontrado que el tamaño y distribución del tamaño de partícula de los materiales que componen el revestimiento ejercen una fuerte influencia sobre el tamaño de los poros, teniendo que a menor tamaño de partícula, menor diámetro de los poros [3]. De esta forma se puede mejorar el acabado superficial de la pieza fundida, pero se disminuye la permeabilidad del revestimiento, obligando a aumentar las temperaturas de precalentamiento del molde y de colado del metal con el fin de evitar defectos de fundición característicos de moldes con baja permeabilidad [4].

En la búsqueda por mejorar las propiedades de los revestimientos refractarios se han encontrado materiales de diferente naturaleza que actúan como formadores de poros y su aplicabilidad al proceso particular estará determinada por la naturaleza del agente y los requerimientos del proceso. En este sentido, en microfundición el aumento de la permeabilidad puede afectar la calidad superficial del molde y por ende de la pieza fundida colada en este, así que sería deseable la formación de microporos. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se fabricaron probetas refractarias variando el tipo y cantidad de agente formador de poro. Se determinó la relación entre la permeabilidad del cerámico y la cantidad de agente añadido, evaluando la influencia del agente sobre el tamaño y distribución de poros en la matriz cerámica y el efecto de estos sobre la rugosidad del molde. Se estableció el límite de permeabilidad en el que el molde conserva su resistencia mecánica. También se discute el efecto de la temperatura de calcinación sobre las propiedades finales del molde.

## **2 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.1 Materias primas**

Se trabajó con material refractario comercial *Diamante Kerr* compuesto de cuarzo- $\alpha$  (32%), cristobalita- $\alpha$  (43%) y yeso (25%), con granulometría menor a 200 mallas; y como agentes formadores de poros se utilizó: espumante lauril sulfato de sodio, Polietilenglicol con peso molecular de 6000 g/mol (PEG 6000) y dos tipos de almidón de yuca: granulometría gruesa (-150 mallas +200mallas) y fina (pasante la malla 200).

## 2.2 Obtención y caracterización de los revestimientos

Se fabricaron probetas cilíndricas de 2 pulgadas de altura por 2 pulgadas de diámetro (norma AFS [5] para probetas de arenas de moldeo). Se mantuvo constante la relación de agua en 40 mL por cada 100 g de mezcla *Diamante Kerr*, variando el tipo y cantidad de agente formador de poro adicionado. Se trabajó con lauril sulfato de sodio entre 0,3 y 0,5% en peso, PEG 6000 entre 0,5 y 5%, y almidón de yuca entre 0,4 y 2 %. Todas las probetas se calcinaron a 400°C y 595°C durante 3 h, previo sostenimiento a 148°C durante 2 h para la eliminación del agua.

La permeabilidad se evaluó en el permeámetro eléctrico de lectura directa, Dietert Detroit 338, utilizando la norma AFS [5] empleada para el ensayo de arenas en fundición, así como la medición de la resistencia mecánica en la maquina universal de ensayos también bajo norma AFS. La textura de las probetas cerámicas se evaluó por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y observación macroscópica de las mismas.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Efecto de los agentes formadores de poros sobre la microestructura del revestimiento

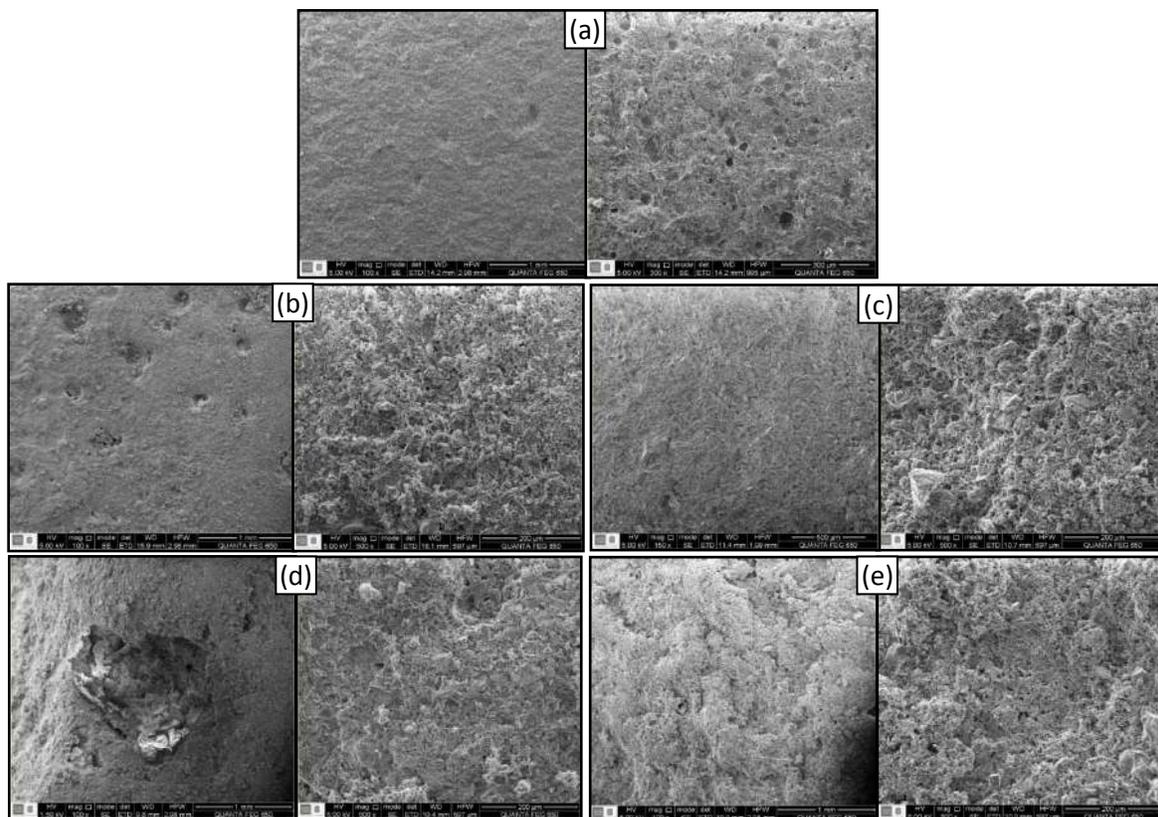
En la Figura 1 se observa la microestructura de los revestimientos obtenida con cada uno de los aditivos utilizados; en tal figura se comparan las micrografías SEM a bajos (100X) y altos aumentos (500X) para cada revestimiento.

Es evidente que la textura relativamente lisa del revestimiento sin aditivos (Figura 1(a)) se pierde por efecto de los diferentes formadores de poros, lo cual está directamente relacionado con la formación de micro y macro-porosidades y la menor cohesión de las partículas. Para el uso de estos cerámicos, como moldes para microfundición, las macroporosidades no son deseables, dado que afectan su capacidad de copiado de los modelos de cera. Además tales poros son cerrados y no favorecen la permeabilidad en el revestimiento. En este sentido, se puede afirmar que entre todos los aditivos estudiados, el almidón de yuca de granulometría gruesa es el menos conveniente, dado que promueve la formación de poros con tamaños de hasta 1.5 mm (ver Figura 1(d)). A tal aditivo le sigue el Lauril sulfato de sodio, con el cual se obtienen poros con tamaños de hasta 300  $\mu\text{m}$ , aproximadamente (Figura 1(b)). Tanto para el lauril sulfato de sodio, como para el almidón de yuca grueso, la superficie de las probetas exhibía una textura rugosa a simple vista, que se acentuaba con el aumento del contenido de aditivo. Tal rugosidad superficial generó dificultades en el desmoldeo de los cerámicos desde la matriz metálica, esto mismo podría ocurrir luego del proceso de colado del metal líquido en el proceso de microfundición. Por lo tanto, es fácil prever que las piezas fundidas obtenidas con el uso de estos revestimientos presenten un acabado superficial deficiente.

En cuanto a los otros dos aditivos, almidón de yuca fino y polietilenglicol (PEG), generaron un cerámico con acabado regular, suave y sin desprendimiento de material, lo que indica adecuada cohesión entre las partículas; por lo mismo, el desmoldeo de las probetas fue fácil. Las micrografías a 500X de estos cerámicos (figuras 1(c) y 1(e)) evidencian el alto grado de microporosidad generada y la conexión entre tales poros, por lo que se puede inferir un

importante aumento de la permeabilidad en estos revestimientos comparados con el obtenido sin la adición de agentes formadores de poros.

Por lo anterior y desde el punto de vista de la microestructura del revestimiento, se seleccionan como los aditivos más adecuados para la fabricación de los moldes al almidón de yuca con granulometría fina y al polietilenglicol 6000.



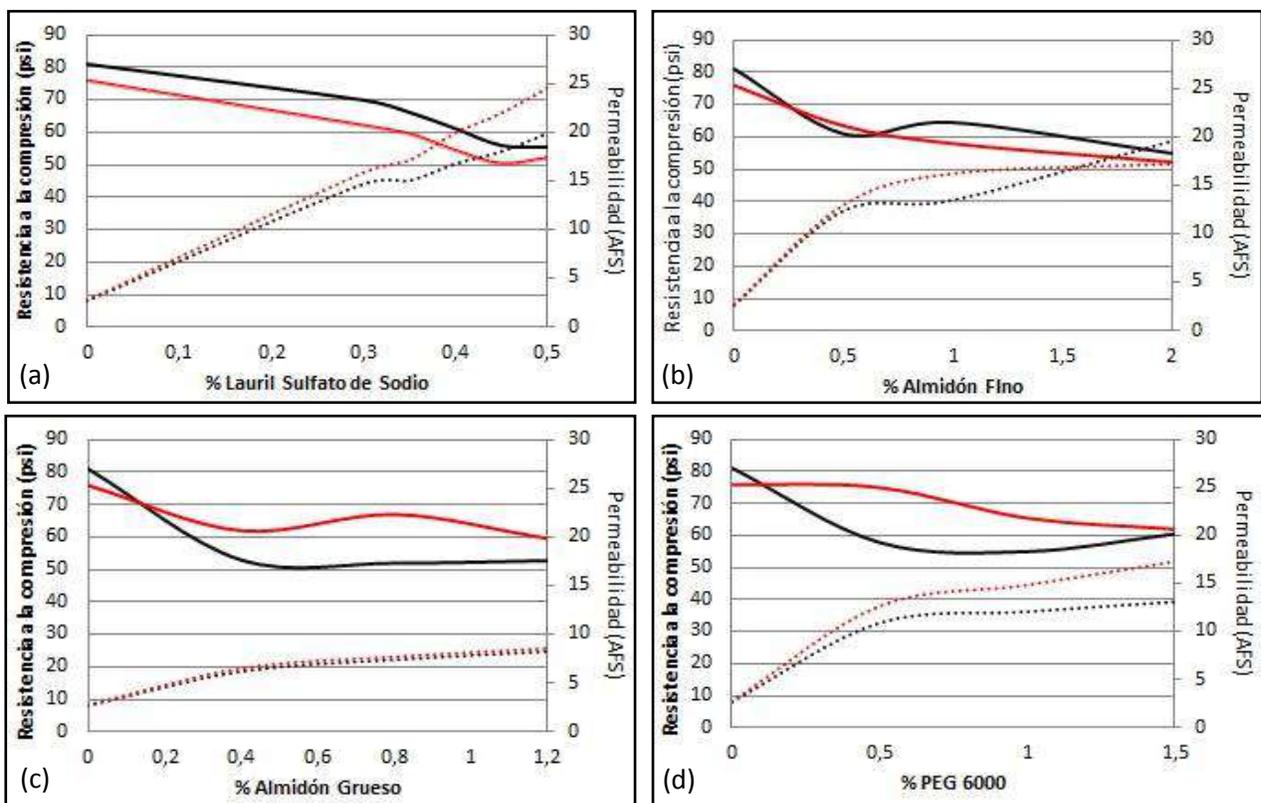
**Figura 1.** Micrografías SEM a 100X y 500X del revestimiento: a) sin aditivos, b) con 0,4% de lauril sulfato de sodio, c) con 2% de almidón fino, d) con 1,2% de almidón grueso y e) con 2% de PEG 6000

### **3.2 Efecto de la concentración del agente formador de poros y de la temperatura de calcinación sobre las propiedades del revestimiento**

En la Figura 2 se presentan las curvas de variación de la resistencia a la compresión y de la permeabilidad de las probetas, con el aumento de la concentración de los diferentes agentes formadores de poros. Se observa que para los cuatro aditivos (Lauril sulfato de sodio, almidón de yuca con granulometrías fina y gruesa y PEG), la permeabilidad del molde aumenta con el contenido de aditivo, mientras que la resistencia mecánica disminuye. Esta tendencia es la esperada, teniendo en cuenta que la formación de poros abiertos en la matriz cerámica permite el

mayor flujo de gases a través de ésta, así mismo, la porosidad disminuye el área efectiva de la sección transversal de la probeta lo que hace que sea menos resistente [6].

No obstante que para todos los aditivos se encontró el efecto antes descrito, existen diferencias relacionadas con qué tanto se modifican las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos. En cuanto a la permeabilidad, se observa que el lauril sulfato de sodio (Figura 2(a)) genera el mayor aumento de esta propiedad (casi 10 veces), pasando de 2,5 a 24 [unidades AFS] con la adición de 0,5% del aditivo. Por su parte, las adiciones de 2% de almidón de yuca fino (Figura 2(b)) y de 1,5% de PEG (Figura 2(d)) conllevan a aumentos de la permeabilidad de 8 y 7 veces, respectivamente. Finalmente, el menor aumento de la permeabilidad (3,5 veces) se obtuvo con la adición del almidón de yuca con granulometría gruesa (Figura 2(c)); lo cual concuerda con la microestructura observada para este revestimiento (Figura 1(d)), en el sentido de que se generaron macro-porosidades cerradas que no contribuyen a la permeabilidad del material. En cuanto a la resistencia a la compresión, su disminución, por efecto de la adición de los agentes generadores de poros, estuvo alrededor del 30%, a excepción de las probetas modificadas con PEG en cuyo caso la disminución de esta propiedad fue sólo del 18% y 26% para los cerámicos sinterizados a 595 y 400°C. Esto último podría estar relacionado con el hecho de que el PEG genera poros muy pequeños, incluso nanométricos, y bien distribuidos.



**Figura 2.** Efecto de la temperatura de calcinación (negra: 400°C y roja: 595 °C) y del contenido de aditivo sobre la permeabilidad (línea punteada) y la resistencia del molde (línea continua) para: a) lauril sulfato de sodio; b) almidón de yuca fino; c) almidón de yuca grueso; d) PEG 6000

En cuanto a la temperatura del tratamiento térmico del revestimiento, los resultados demuestran que no hay un efecto importante de dicha variable, en los niveles estudiados, sobre su

permeabilidad y resistencia. No obstante, las probetas tratadas a la mayor temperatura (595°C) se desmoldaron más fácilmente que las calcinadas a 400°C y generaron menor desprendimiento de material superficial, lo cual puede indicar mayor cohesión de las partículas en los cerámicos sinterizados a 595°C.

#### **4 CONCLUSIONES**

La adición de agentes formadores de poros permite mejorar la permeabilidad de la matriz cerámica de los revestimientos utilizados en el proceso de microfundición sin comprometer su resistencia mecánica; el uso de PEG 6000 y almidón de yuca fino permite obtener esta combinación de propiedades sin afectar la calidad superficial de la pieza fundida en estos moldes modificados. La temperatura de calcinación de los moldes afecta principalmente las condiciones de su proceso de desmoldeo y puede llegar a ser relevante durante la colada del metal. Es importante realizar pruebas con mayores contenidos de almidón fino y PEG con el fin de establecer la relación óptima entre la distribución y el tamaño de los poros con la dupla permeabilidad/acabado superficial y viabilizar el proceso de microfundición.

#### **5 AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS por la financiación de esta investigación, a través del proyecto titulado “Innovación de método de gemas pre-engastadas en el proceso de microfundición, para su implementación en la joyería con esmeraldas colombianas”, Código Colciencias: 1102-521-28875 y Código UIS: 9418.

#### **6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. McKeer, Ian., “Stone-in-place casting: the investment perspective”, Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry, Editado por Eddie Bell, New Mexico-USA, 2004.
2. García-Ten, J., Orts, M.J., Saburit, A., Silva, G., “Thermal conductivity of traditional ceramics Part II: Influence of mineralogical composition”, Ceramics International, Vol. 36, pp. 2017–2024, 2010.
3. Yaman, B., Cigdem, M., “Effect of particle size variations of gypsum bonded investment powders on metallurgical quality of investment castings”, International Journal of Cast Metals Research, Vol. 23, pp. 60-65, 2010.
4. Carter, R., “¿Does investment permeability impact jewelry castings?”, Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry, Editado por Eddie Bell, New Mexico-USA, 2004.
5. “Manual de Arenas para Fundición”, North Penny Lane Schaumburg, Illinois-USA, American Foundrymen’s Society, 1967.



6. Tolosa, R.A., “Influencia de la porosidad sobre la resistencia del aluminio sinterizado”, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 25, No 1, pp. 67-73, 2004.