

# CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DEL CASCARÓN CERÁMICO DESECHO DEL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN EN FASAB SOGAMOSO

(Morphological and structural characterization of ceramic shell waste in the investment casting process in FASAB Sogamoso)

Isnardo Antonio Grandas Rincón<sup>1</sup>, Luis Ángel Lara González<sup>2</sup>, Ricardo Alfonso Paredes Roa<sup>2</sup>, Karol Lizeth Roa Bohórquez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Industrial, Uptc. Grupo inv. Observatorio, isnardo.grandas@uptc.edu.co

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería de Minas, Uptc. Grupo inv. GEAM, luisangel.lara@uptc.edu.co, ricardo.paredes@uptc.edu.co, karol.roa@uptc.edu.co

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

(Recibido julio 8 de 2015 y aceptado septiembre 12 de 2015)

## Resumen

Se reportan las características estructurales y los parámetros cristalinos del material de desecho del proceso de microfundición en la Industria Militar (INDUMIL) Fábrica Santa Bárbara. Mediante la realización de pruebas normalizadas de laboratorio, tales como microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX), se identifican la distribución granulométrica, la porosidad y las fracturas presentes. Además, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de las fases mineralógicas, determinando la fase mayoritaria y comparándola con las fases presentes en la materia prima original. Finalmente, con base en la información obtenida, se proponen posibles usos que pueda tener el material en estudio.

**Palabras clave:** arenas silíceas, microfundición, microestructura, cristalinidad, estructura amorfa.

## Abstract

The structural characteristics and the crystalline parameters of the waste material in the process of investment casting in the Military Industry (INDUMIL for its acronym in Spanish) Factory Santa Barbara are reported. By performing standard laboratory tests such as Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD), particle size distribution, porosity and fractures present are identified. In addition, a qualitative and quantitative analysis of mineral phases is performed by determining the major phase and comparing the phases present in the original feedstock. Finally, based on information obtained, possible uses that may have the material under study are proposed.

**Keywords:** silica sands, investment casting process, microstructure, crystallinity, amorphous structure.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de microfundición ha recibido gran atención por parte de investigadores en los últimos años, debido a la creciente demanda de microcomponentes en

diversas áreas. Por tal razón, se ha convertido en un proceso competitivo para la producción en masa de piezas metálicas (Jain, 2012).

La fabricación de piezas metalmecánicas microfundidas tanto en aceros al carbono como en hierros grises y no ferrosos, es una de las principales líneas de producción en INDUMIL Colombia, Fábrica Santa Bárbara. Las características más importantes de los productos fabricados por el proceso de fundición a la cera perdida, son la alta calidad superficial que el producto adquiere y la exactitud en las dimensiones de piezas de gran complejidad (Pattnaik, Karunakar, & Jha, 2012), lo cual otorga una máxima libertad en el diseño y configuración de diversos productos.

Para determinar cuáles pueden ser los usos potenciales de un material, es necesario caracterizarlo (Morales, 2005). De ahí que en el presente trabajo se identifiquen las características estructurales y morfológicas de los desechos del cascarón cerámico, con el fin de precisar el manejo que se le puede dar a este material.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de microfundición consiste en recubrir un molde de cera con varias capas de arena de granulometrías mallas n.º 20, 30, 70 y 200 ASTM, siendo la arena 200 la matriz aglomerante. La técnica se lleva a cabo en un ambiente bajo ciertas condiciones específicas de temperatura y humedad. Los baños cerámicos están divididos por capas húmedas y capas secas. La capa aplicada al racimo depende del baño que se le esté dando y para cada capa se busca crear una porosidad suficiente para la evacuación de gases (Londoño, Baquero & Córdoba, 2014).

Al mismo tiempo, se espera una superficie lisa en el área de contacto del material con el metal fundido. Esta superficie se logra con un sinterizado del cascarón a 800 °C en promedio. En esta parte del proceso hay un cambio de fase de cuarzo alfa a beta. Después se realiza una preparación para el colado en donde se trabajan temperaturas cercanas a los 1200 °C (Becker & Wentworth, 1977) evitando un choque térmico del material con el metal en estado líquido, a esta temperatura se alcanza la fase tridimita. El desmolde del cascarón final se lleva a cabo por medio de un martillo neumático.

Al final del proceso productivo, los racimos cerámicos no son reutilizados y por tanto pasan a ser un desecho en la empresa.

Para caracterizar morfológica y estructuralmente el material, INDUMIL Fábrica Santa Bárbara proporcionó las muestras de cascarones cerámicos desecho y de arena malla n.º 200 ASTM (0,08 mm), la cual se tomó como referencia para comparar con el desecho cerámico.

Para analizar la distribución granulométrica del cascarón sinterizado y cascarón desecho, se seleccionaron dos muestras con corte transversal. Las características estructurales se estudiaron a través del difractor de rayos X, PANalytical X'Pert PRO PW500. Para el estudio de la morfología del desecho de cascarón se utilizó un microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido MEB ZEISS LSM 800.

La distribución granulométrica fue determinada a través del *software* ImageTool versión 3.0, en el cual se encontró el tamaño de grano observado en cada capa del cascarón. La estructura del material se modeló con el *software* CrystalMaker, y para el análisis cualitativo y cuantitativo de las fases mineralógicas se utilizó el *software* OriginPro 2016.

El cálculo del índice de cristalinidad se hizo con el método reportado por Merino y Morales (2008), el cual requiere medir la altura del pico más alto desde su punto máximo hasta el valor del valle de separación con el pico siguiente. La fórmula utilizada es:

$$\%IC = (\alpha) * 100/h$$

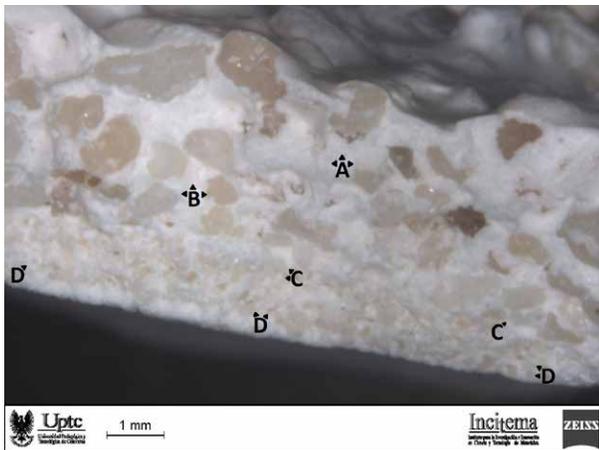
Para calcular el factor de empaquetamiento atómico (FEA) se utilizó la fórmula reportada en Callister (1996):

$$FEA = \frac{N^{\circ} \text{ átomos} * Vol. \text{ átomo}}{Vol. \text{ celda unidad}}$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

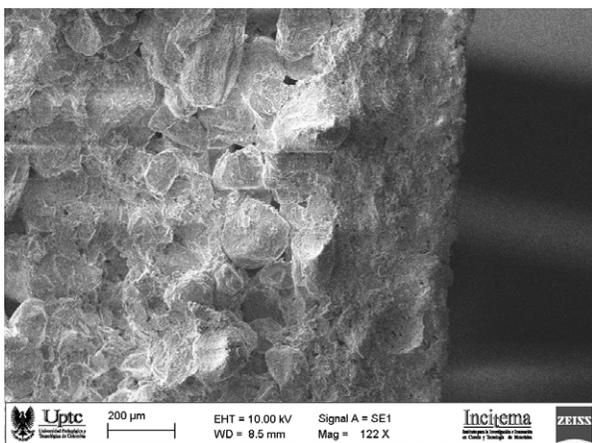
La distribución entre el aglomerante y las arenas ordenadas descendientemente según su granulometría, se muestra en la Figura 1. Allí se presenta una microfotografía de microscopía óptica a 70x, en la cual podemos apreciar granos con diámetros entre: 0.86 y 0.84mm, que corresponden a la arena malla n.º 20 ASTM (A), 0.63 y 0.59mm pertenecientes a la arena malla n.º 30 ASTM (B), entre 0.20 y 0.19mm de la arena malla n.º

70 ASTM (C) y los diámetros referentes a la arena malla n.º 200 ASTM ubicados en la región (D).



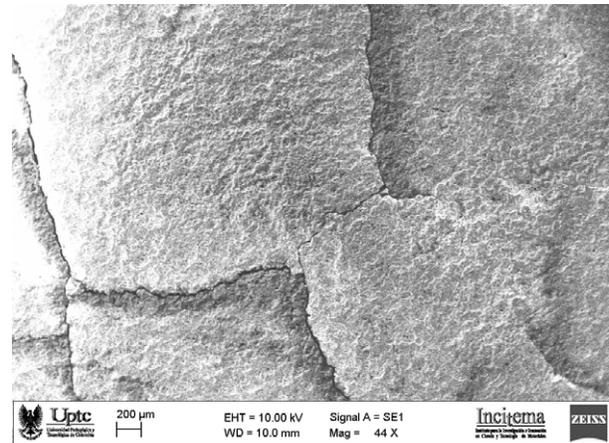
**Figura 1.** Microscopía óptica corte transversal a 70x del cascarón cerámico inicial desencerado.

Para observar el tránsito de aglomerante hacia la superficie en contacto con la pieza, se presenta la Figura 2, correspondiente a la microfotografía del cascarón cerámico después del sinterizado. La circulación del aglomerante elimina los poros generados por las granulometrías más grandes (arenas n.º 20 y 30). De esta forma, se puede mejorar el acabado superficial de la pieza fundida disminuyendo la permeabilidad del cascarón, lo que ocasiona un aumento de las temperaturas de preparación al precolado del molde y colado de la pieza, previniendo defectos de fundición característicos de moldes con baja permeabilidad (Carter, 2004).



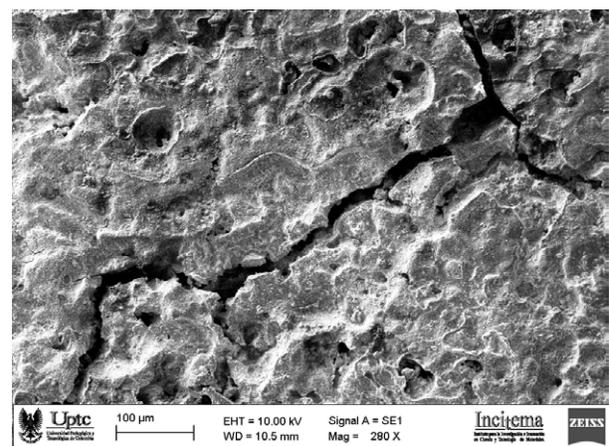
**Figura 2.** Microscopía electrónica de barrido a 122X, corte transversal del cascarón cerámico sinterizado.

Se presentan grietas en el cascarón por acción del desmolde y la dilatación térmica durante el colado, como podemos observar en la Figura 3. Microscópicamente, estas fracturas son consecuencia del cambio en la separación media entre sus átomos o moléculas, según el coeficiente promedio de dilatación lineal (Wilson & Buffa, 2003).



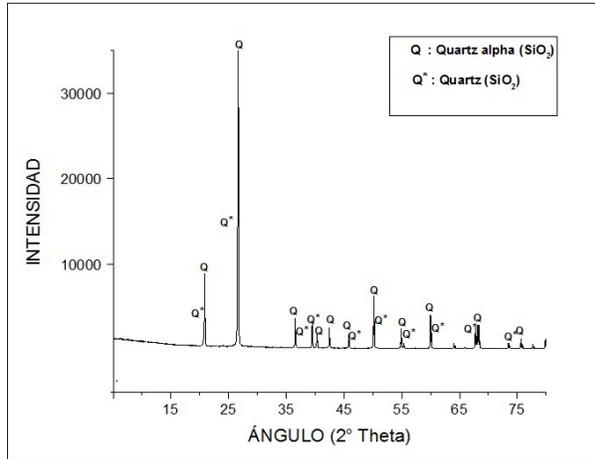
**Figura 3.** Microscopía electrónica de barrido a 44X del cascarón cerámico desecho superficie de contacto con la pieza.

De igual forma, en la Figura 4 podemos identificar la presencia de pequeños poros causados por la evacuación de gases (Londoño, Baquero & Córdoba, 2014). Esta superficie del cascarón es la más afectada por los drásticos cambios de temperatura que suceden durante el proceso de microfundición, los cuales pueden llegar a superar los 1200 °C.

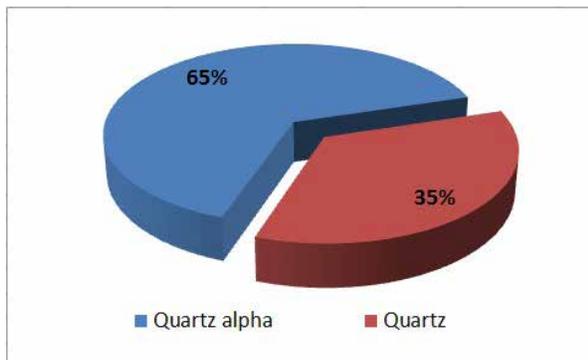


**Figura 4.** Microscopía electrónica de barrido a 280X del cascarón cerámico en contacto con la pieza fundida.

Como punto de comparación con el desecho de cascarón cerámico, se presenta a continuación en la Figura 5 el difractograma de la arena malla n.º 200 ASTM (0,08 mm). Esta arena fue seleccionada por estar en contacto directo con el metal fundido y ser la matriz estructural del aglomerante. Los picos observados en el diagrama simbolizan la presencia de dos fases: cuarzo alfa con un 65 % en peso, y cuarzo representada con un 35 %.

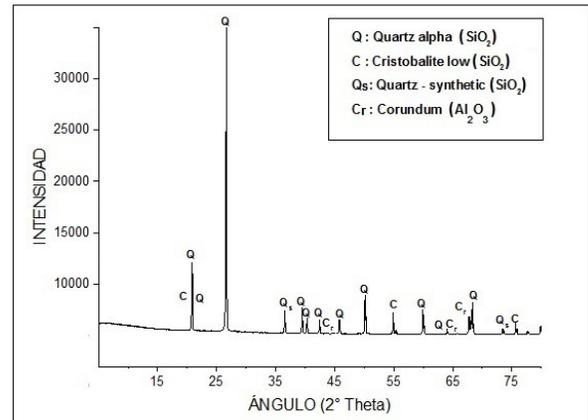


**Figura 5.** Difractograma de rayos X (DRX) de arena malla n.º 200 ASTM (0,08 mm).



**Figura 6.** Porcentaje en peso de las fases mineralógicas halladas en la muestra de arena malla n.º 200 ASTM (0,08 mm).

Con el fin de determinar las fases presentes en el cascarón desecho se muestra en la Figura 7 el difractograma del material. En esta figura, podemos identificar la presencia de fases como el cuarzo alfa, cuarzo sintético, cristobalita baja y corindón, siendo esta última fase un óxido originado por la reacción del oxígeno con el aluminio (Perea, 2001).



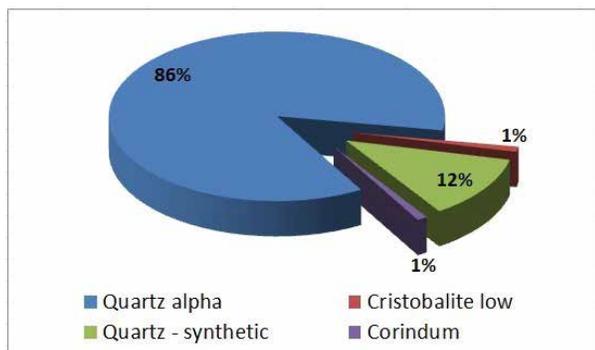
**Figura 7.** Difractograma de rayos X (DRX) del desecho de cascarón cerámico de la Industria Militar FASAB.

Los parámetros cristalográficos de la fase mayoritaria cuarzo alfa hallada con el patrón de referencia n.º 01-078-1253, tiene las siguientes medidas de celda unitaria:  $a = b = 4.9120 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.4020 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ , densidad calculada de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  y un volumen de celda de  $112.8 \times 10^6 \text{ pm}^3$ .

La anterior información confirma lo reportado en la literatura, en donde se describe dicha fase como una estructura correspondiente a una serie de tetraedros con el Si en el centro y los oxígenos en los vértices, de tal forma que cada oxígeno está asociado a dos átomos de silicio (Bilurbina & Liesa, 2000). A su vez, al presentar una densidad baja de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  se comprueba que su estructura es relativamente compleja (Callister, 2007), con un factor de empaquetamiento de 0.60 podemos evidenciar que sus átomos no están empaquetados al máximo.

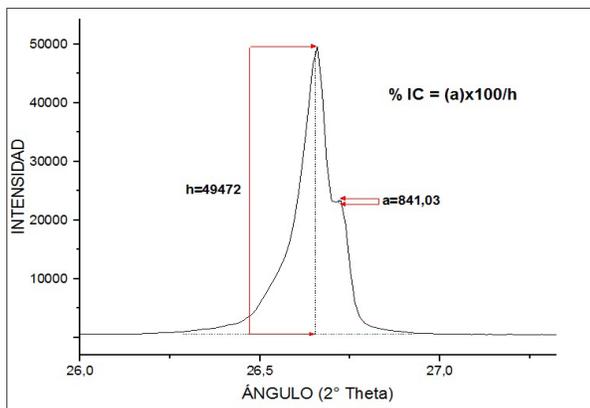
Con base en la información obtenida en el difractograma podemos verificar que las fases presentes se encuentran dentro de las 22 conocidas: cuarzo alfa y cristobalita baja (Bilurbina & Liesa, 2000).

El análisis semicuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia en la Figura 8. En este caso, el cuarzo alfa es la fase más representativa del material con un 86%, seguida del cuarzo sintético con un 12 % en peso. Finalmente, la cristobalita baja y la fase corindón se encuentran en una mínima concentración del 1 % cada una, por lo tanto, se consideran trazas.



**Figura 8.** Porcentaje en peso de las fases mineralógicas halladas en la muestra de cascarón cerámico desecho.

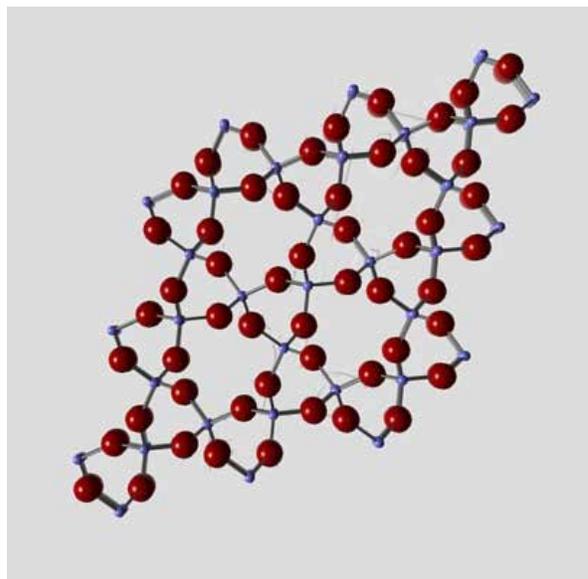
Para determinar el índice de cristalinidad podemos detallar en la Figura 9 una ampliación del difractograma en los ángulos 26 y 27°, rango en el cual se encuentra el pico más alto con una intensidad de 49472 (u.a) seguida de un pico de menor intensidad con 841.03 (u.a).



**Figura 9.** Ampliación del pico con mayor intensidad del difractograma de rayos X (DRX) de desecho de cascarón cerámico de la Industria Militar FASAB.

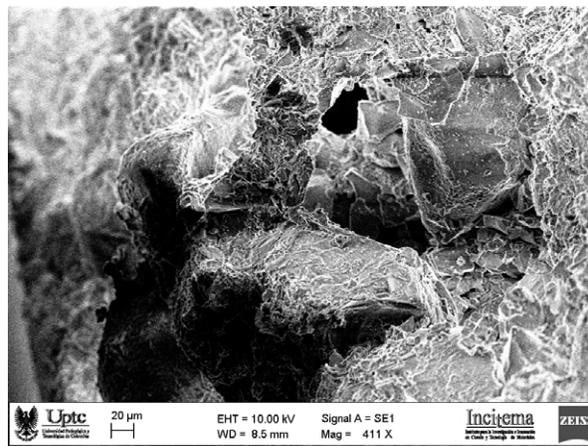
Mediante el programa OriginPro 2016 se encontró un índice de cristalinidad (IC) de 1,7 %, el cual indica que la muestra es polimórfica formada por una fase cristalina de 1.7 % y un 98.3 % de fase amorfa. El alto porcentaje de fase amorfa también se puede concluir al observar el difractograma de la Figura 7, donde se puede ver la precaria formación de picos bien definidos, los cuales no son representativos.

Los parámetros cristalográficos y las medidas de celda unitaria, al ser modelados en el *software* CrystalMaker, proyectaron la estructura representada en la Figura 10.



**Figura 10.** Estructura de la fase cuarzo alfa modelada en el *software* CrystalMaker.

Como podemos observar, la estructura es amorfa, lo que corrobora un índice de cristalinidad (IC) bajo. Y se puede afirmar que existe una carencia de estructura cristalina ordenada, lo que conduce a la ausencia de contornos de grano, dislocaciones y fracturamiento (Medina, 2010), como podemos ver en la microfotografía de la Figura 11.



**Figura 11.** Microscopía electrónica de barrido a 411X de los granos con recubrimiento de aglomerante.

#### 4. APLICACIONES Y USOS

Los métodos típicos de microfundición tienen como principales ingredientes cristobalita alfa y cuarzo alfa

con un aglomerante. Dichas fases tienen las propiedades para generar las mejores características superficiales a las piezas microfundidas, gracias a la refractariedad dada por los altos puntos de fusión del cuarzo y la cristobalita (Mckeer, 2004).

Con base en lo anterior, se puede plantear el uso del cascarón cerámico desecho como materia prima para el proceso de microfundición, ya que este se encuentra compuesto por un 86 % de cuarzo alfa y esta fase tiene propiedades similares a las de la fase cristobalita alfa.

Por su alto contenido en sílice, el desecho se puede utilizar como desgrasante en la fabricación de ladrillos de mampostería (Vian, 2012).

Por otra parte, la fase dominante cuarzo ordinario o cuarzo alfa tiene modificaciones piezoeléctricas, es decir, este cuarzo genera un potencial eléctrico cuando es sometido a una compresión determinada (Rochow, 2007), por lo que puede ser utilizado para la fabricación de diversos elementos electrónicos como encendedores y transformadores.

## 5. CONCLUSIONES

Se observó que el cascarón cerámico desecho posee un tránsito de aglomerante hacia la superficie en contacto con la pieza, lo cual elimina los poros generados por las granulometrías más grandes (n.º 20 y 30 ASTM).

El IC del cascarón indica un 1,7 % de fase cristalina y un 98,3 % de fase amorfa. Un factor de empaquetamiento de 0,60, el cual indica que sus átomos no se encuentran empaquetados al máximo y posee una carencia de estructura cristalina ordenada.

Se reporta la presencia de cuatro fases mineralógicas en el desecho: cuarzo alfa con 86 % en peso, cuarzo sintético con 12 %, cristobalita baja y corindón con 1 %. Estas dos últimas fases han sido consideradas trazas.

Se plantea el uso del cascarón cerámico desecho como materia prima para el proceso de microfundición, ya que este se encuentra compuesto por un 86 % de cuarzo alfa, además, en comparación con la arena inicial, el cascarón cerámico desecho presenta también fase amorfa.

El material desecho también puede ser utilizado en la fabricación de mampostería, porque tiene un alto contenido en sílice y sirve como desgrasante de la mezcla cerámica.

Debido a que el cuarzo alfa genera un potencial eléctrico, este puede ser utilizado para la fabricación de diversos elementos electrónicos como encendedores y transformadores.

## 6. AGRADECIMIENTOS

A la Industria Militar de Colombia (INDUMIL) Fábrica Santa Bárbara, por facilitar las materias primas para el desarrollo de la caracterización. Al Instituto de Recursos Minero-Energéticos (IRME), por toda la asesoría prestada durante el proceso de investigación. A la Dirección de Investigaciones de la UPTC (DIN), por el apoyo económico brindado mediante el proyecto DIN n.º 1574. Al Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA), por los servicios de laboratorios.

## 7. REFERENCIAS

- Pattnaik, S., Karunakar, D. B., & Jha, P. K. (2012). Developments in investment casting process—A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11), 2332–2348.
- Becker, R. & Wentworth, W. (1977). *Química general*. Barcelona: Reverté.
- Bilurbina, L. & Liesa, F. (2000). *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. Barcelona: Marcombo.
- Callister, W. (1996). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
- Callister, W. (2007). *Materials science and engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Carter, R. (2004). *¿Does investment permeability impact jewelry castings? Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry*. New México-USA: Eddie Bell.

Jain, V. (2012). *Micromanufacturing processes*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Londoño, C., Baquero, A. & Córdoba, E. (2014). 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. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 238-243.

Mckeer, I. (2004). *Stone-in-place casting: the investment perspective. Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry*. New México-USA: Eddie Bell.

Medina, J. (2010). *Estudio de las fases amorfas y nanocristalinas del sistema Fe<sub>2</sub>Zr obtenidas por técnicas de mecanosíntesis*. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Merino, L. & Morales, J. (2008). Relación del índice de cristalinidad (IC) con la edad y el contenido de iones F y CO<sub>3</sub> en muestras de vertebrados fósiles. *Estudios Geológicos*, 64(1), 75-87.

Morales, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Madrid: Díaz de Santos.

Perea, A. (2001). *El tesoro visigodo de Guarrazar*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Rochow, E. (2007). *An introduction chemistry of the Silicones*, S.I.: Macnutt Press.

Vian, A. (2012). *Introducción a la química industrial* (2a. ed.). Barcelona: Reverté.

Wilson, J. & Buffa, A. (2003). *Física*. (5 ed.). México: Pearson.