

# FABRICACIÓN DE CRISOLES CON CAOLINITA DE COMBITA - BOYACÁ PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MINERALES DE ORO

Sandra M. García Tocarruncho <sup>1</sup>, Ginna A. Jiménez Tovar <sup>2</sup>, Mario Parra Pinilla <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Metalúrgico. Grupo Metalurgia No Ferrosa, Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

<sup>2</sup> Magister Ingeniería Metalúrgica. Grupo Metalurgia No Ferrosa, Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Correo de correspondencia: [ginna.jimenez@uptc.edu.co](mailto:ginna.jimenez@uptc.edu.co)

## RESUMEN

La región boyacense cuenta con grandes riquezas minerales y una de ellas es la roca sedimentaria de arcilla caolinitica, con excelentes propiedades para la industria cerámica tradicional. Al realizar pruebas de caracterización a este material se definieron sus propiedades plásticas, de alta refractariedad, bajo punto de fusión, resistencia a los choques térmicos y resistencia a la rotura. Estas propiedades se deben a su composición caolinitica, silicatada aluminica y la presencia de magnesio en la arcilla. A partir de estos resultados se crearon crisoles resistentes a altas temperaturas por diferentes tipos de fabricación, adecuados para utilizarlos en ensayos de fusión a temperaturas de 1200°C, y especialmente en ensayos al fuego para la caracterización de mineral de oro.

**Palabras clave:** mineral de oro; prensado; caolinita; crisoles; material cerámico.

Recibido: 02 de febrero de 2021. Aceptado: 27 de abril de 2021

*Received: February 02, 2021. Accepted: April 27, 2021*

DOI: <http://dx.doi.org/10.33571/rpolitec.v17n33a8>

## MANUFACTURE OF CRUCIBLES WITH COMBITE KAOLINITE - BUOY FOR THE CHARACTERIZATION OF GOLD MINERALS

### ABSTRACT

*The Boyacá region has great mineral wealth and one of them is the sedimentary rock of kaolinitic clay, with excellent properties for the traditional ceramic industry. When performing characterization tests on this material, its plastic properties, high refractoriness, low melting point, resistance to thermal shocks and resistance to breakage were defined. These properties are due to its kaolinitic composition, aluminum silicate and the presence of magnesium in the clay. From these results, crucibles resistant to high temperatures were created by different types of manufacture, suitable for use in fusion tests at temperatures of 1200 ° C, and especially in fire tests for the characterization of gold ore.*

**Keywords:** *gold ore; pressed; kaolinite; crucibles; ceramic material.*

*Cómo citar este artículo:* S. M. García-Tocarruncho, G. A. Jiménez-Tovar, M. Parra-Pinilla. "Fabricación de crisoles con caolinita de Combite - Boyacá para la caracterización de minerales de oro", *Revista Politécnica*, vol.17, no.33 pp.100-108, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33571/rpolitec.v17n33a8>

## 1. INTRODUCCIÓN

La explotación de oro en Colombia es una actividad que se realiza desde tiempos remotos hasta en la actualidad, lo cual la está convirtiendo en una alternativa económica importante para el desarrollo del país. [1-3] Los minerales de oro requieren de un proceso extractivo muy exhaustivo para la obtención del metal y se inicia con la determinación total de la cantidad de oro. [4,5] El ensayo de fusión al fuego es una de las técnicas utilizadas para su caracterización por ser de los más exactos y para lo que se necesita, entre otros materiales, el uso de crisoles [6].

La arcilla proviene de las rocas sedimentarias y es utilizada para la producción de materiales cerámicos tradicionales lo cual se realiza por medio de una serie de etapas de beneficio de la arcilla, conformado de la pieza y cocción con un secado previo del material para evitar deformaciones [7]. El proceso de producción de crisoles se realiza para aprovechar la potencialidad económica de la región boyacense en términos de arcillas, las cuales solo han sido utilizadas en la producción de tejas, ladrillos, macetas, vajillas, entre otros [8].

El proceso de formado de los crisoles que se usa depende de las proporciones óptimas entre el material y el líquido. En los procesos de formado se requiere de alta fluidez en algunos, otros operan sobre una composición con aproximadamente 50 % de agua. Por tanto, los procesos de formado pueden dividirse con base en la consistencia de la mezcla: vaciado deslizante y prensado semiseco [9-11].

El objetivo general de este proyecto es fabricar crisoles con arcilla caolinitica procedente del municipio de Combita Boyacá para la caracterización de oro. Con los resultados alcanzados se desea obtener una alternativa para este tipo de materiales cerámicos suministrando productos de alta calidad acorde a la necesidad de los consumidores.

## 2. MATERIALES Y METODO

### 2.1 Materiales

Se extrajeron 100 Kg de arcilla blanca de la vereda de San Isidro en el municipio de Cómbita. Este material es proveniente de un yacimiento perteneciente a la empresa Tejesan, la cual explota arcilla y arena y se dedica a la fabricación de materiales para la construcción y otros elementos cerámicos.

Luego de un proceso de secado y por el método de cuarteo se obtuvieron muestras de aproximadamente 5 kg. Para la elaboración de crisoles por prensado semiseco, se fabricó una matriz en acero de herramientas y para la técnica de vaciado deslizante, se construyó un molde de yeso.

### 2.2 Procedimiento experimental

#### 2.2.1. Procesamiento de materia prima

Se realizó el tamizaje a una muestra de arcilla caolinitica en una serie de tamices, figura 1. De acuerdo al análisis granulométrico, se tomó como tamaño de partícula malla - 100 + 140 por ser el más conveniente para el formado de piezas cerámicas según la teoría consultada [12]. Con la muestra seleccionada se realizó la caracterización por medio de las técnicas de difracción de Rayos X, Fluorescencia de rayos X, microscopia electrónica de barrido y termogravimetría.

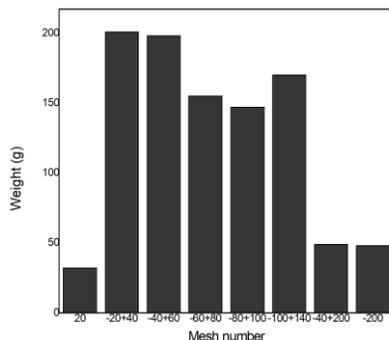


Figura 1. Distribución de granos por número de malla

### 2.2.2 Elaboración de crisoles

Este proceso se llevó a cabo a través de dos técnicas: prensado semiseco y vaciado deslizante. Para el primero se realizó una mezcla de arcilla con un 15% de agua que se introdujo en el interior de la matriz. En el vaciado deslizante se preparó el material con 50% de agua, respecto a la cantidad de arcilla y seguidamente se vació la suspensión en un molde de yeso, una vez se formó la capa semisólida se abrió el molde para remover el crisol, figura 2.

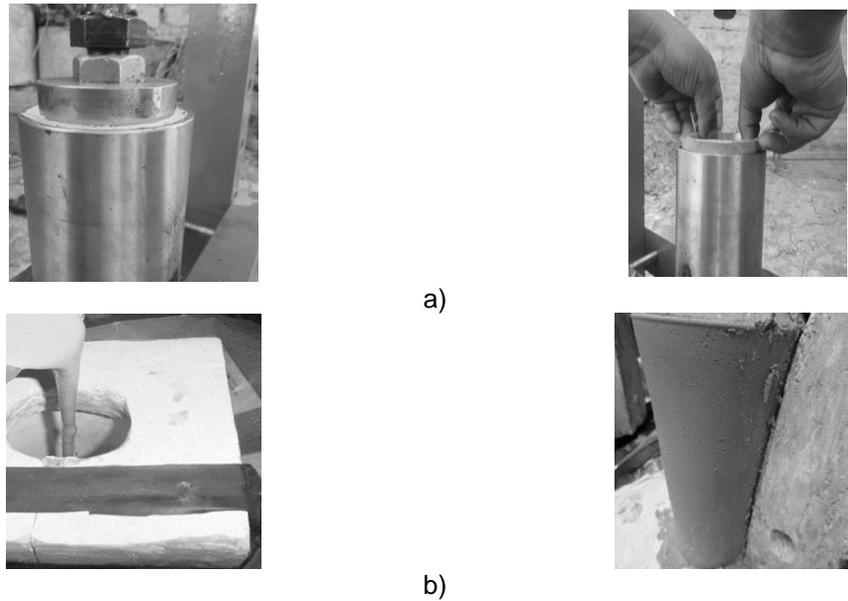


Figura 2. Fotos de proceso de elaboración de crisol. (a) Prensado semiseco: Compactación de la mezcla: se procedió a descender y ascender el pistón superior por medio de la prensa manual hasta alcanzar la compactación del material, Extracción del crisol: se levantó el pistón superior y se sacó el crisol hacia el exterior de la matriz por medio del tornillo de la base. (b) Vaciado deslizante: Compactación: En la mezcla el agua fue absorbida por el yeso y se formó una capa de arcilla en la superficie del molde de yeso, luego se quitó el exceso de suspensión. Extracción del crisol: una vez se formó la capa semisólida se abrió el molde para remover el crisol.

### 2.2.3. Cocción de crisoles

La cocción de los crisoles se realizó a tres rampas de temperatura. Para 800°C y 900°C el proceso se llevó a cabo en una mufla eléctrica de laboratorio por un tiempo de máximo de 22 horas. En la tercera temperatura de 1000 °C se utilizó un horno colmena perteneciente a la fábrica Tejesan ubicado en el municipio de Cómbita.

### 2.2.4 Ensayos de calidad

Se realizó un ensayo de porosidad y densidad aparente según Norma ASTM C20-00 para el material de arcilla. También se realizó un ensayo de compresión en la máquina universal Shimadzu, bajo Norma NTC 4017 para hallar la resistencia a la cocción de la arcilla cocida [13] Figura 3.



Figura 3. Ensayos de calidad: a) Balanza para ensayo de porosidad y densidad aparente: luego de dejar secar los crisoles en una mufla a una temperatura de 150 °C durante una hora, inmediatamente se pesaron y se colocaron en un recipiente con agua a hervir por un tiempo de 2 horas, luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Seguidamente se determinó el peso de cada crisol en suspensión y se dejaron secar para determinar la masa saturada. b) Máquina universal para ensayo de compresión: se elaboraron dos probetas m1 y m2, para cada proceso de fabricación (m1: vaciado deslizante, m2: prensado semiseco), luego se realizó el pesado y medida de las probetas y se colocaron en la maquina universal de ensayos; se aplicó una carga axial máxima de 253 Kg y por último se registró la deformación con las diferentes cargas aplicadas.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de caracterización

##### 3.1.1. Difracción de rayos X

El difractograma, figura 4, señala que el material de estudio muestra sílice ( $\text{SiO}_2$ ), seguido de caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y ( $\text{MgO}$ ). La presencia de la caolinita indica que la arcilla tiene propiedades plásticas y alta refractariedad, la sílice actúa como desengrasante evitando contracciones y deformaciones de volumen del cuerpo cerámico. Por lo cual la arcilla de estudio es adecuada para ser utilizada en cerámicos refractarios. [14]

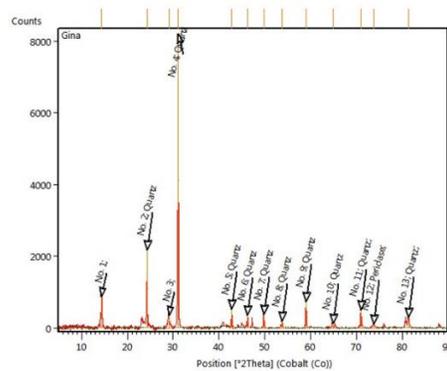
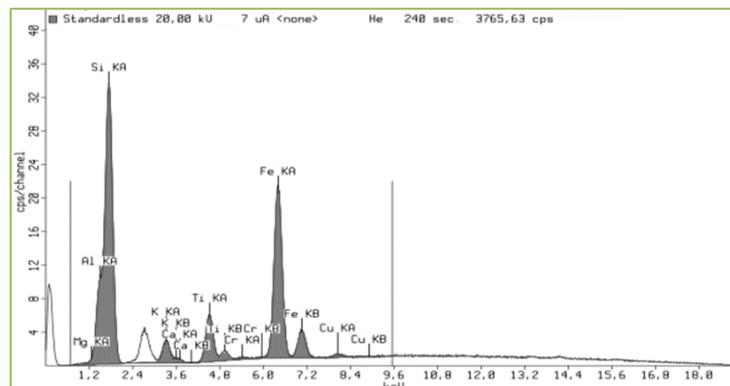


Figura 4. Difractograma de arcilla caolinitica. Para el análisis se tuvieron en consideración las posiciones características de los componentes de mayor importancia

##### 3.1.2. Fluorescencia de Rayos X

En el espectro se detectó silicio siendo el componente mayoritario, el cual pertenece a las fases silicatadas, figura 5. Los cationes presentes fueron: aluminio, hierro, potasio, titanio, magnesio, cromo y cobre. La composición química de la arcilla demostró la naturaleza de las rocas de composición silicatada aluminica con los siguientes elementos: silicio, aluminio, y magnesio. La aparición de magnesio indica que permite bajar el punto de fusión de la arcilla. Los elementos Fe, Cu, y Cr se consideran impurezas. [15]



a)

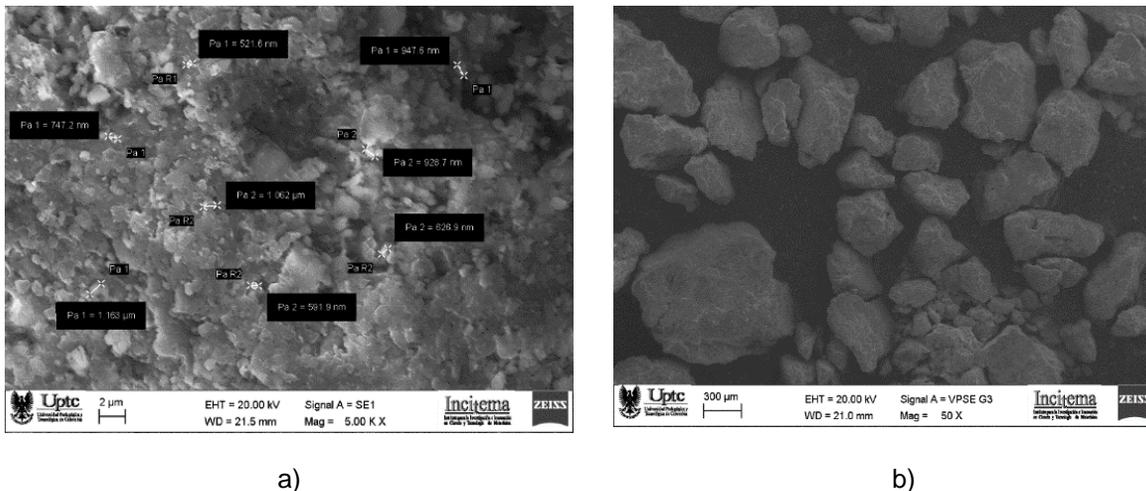
Elemento	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Cu
Cantidad %	1.8	22.8	67.4	2.0	0.097	1.96	0.064	3.79	0.03

b)

Figura 5. Análisis de FRX de arcilla caolinita de Combita Boyacá. a) Espectro de energía dispersiva. b) Datos cuantificados

### 3.1.3 Microscopia Electrónica Barrido

En las imágenes obtenidas por MEB de la arcilla de estudio se observa un tamaño de partícula entre 0,521 μm y 1.163 μm, en promedio 0.823 μm. Se determinó que la morfología superficial de las partículas es de tipo granular anguloso con una conformación fibrosa, característica de los aluminosilicatos [16] Figura 6.



a)

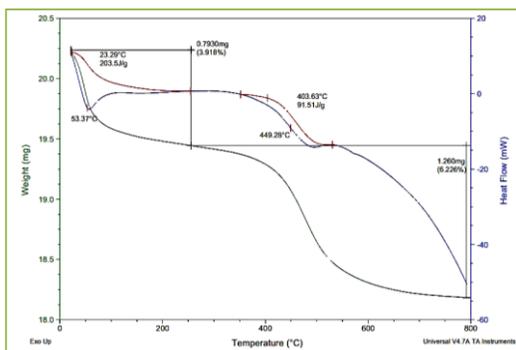
b)

Figura 6. Microfotografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido. (a) micrografía a 5000 X. (b) micrografía a 500 X

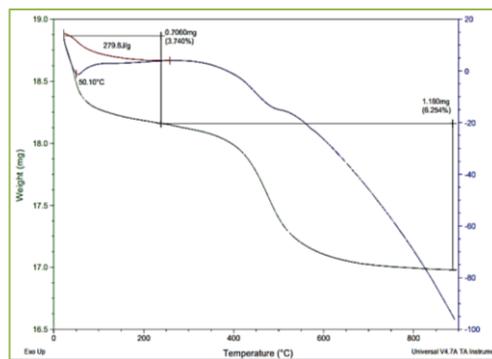
### 3.1.4. Termogravimetría

Los análisis del TGA, figura 7, presentan una primera pérdida de peso muy leve entre temperatura ambiente y 60 °C común en todas las arcillas. La siguiente sucede a partir de los 100 °C por de la pérdida de agua higroscópica, no constitucional o libre [17].

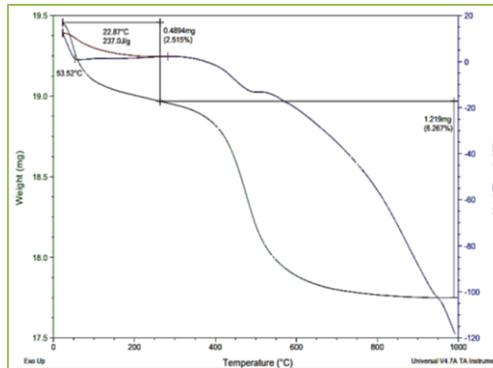
Entre 450°C y 550 °C se muestra una disminución de peso, causados por los iones OH<sup>-</sup> que son liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua, generando la ruptura de la estructura cristalina para dar lugar a la fase amorfa, metacaolín (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>).<sup>5</sup> A 550°C ocurre la transición de fase de cuarzo α a β; teóricamente esto sucede a los 573°C. Aproximadamente a 980°C, en el metacaolín se produce la fase cristalina denominada mullita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO) [18]. Esto sucede por medio de una reacción exotérmica, ecuación (1)



a)



b)



c)

Figura 7. Termogramas de la arcilla caolinítica de Combita Boyacá. (a) Curva de TGA de 0-800 °C. (b) Curva de TGA de 0-900 °C (c) Curva de TGA de 0-1000 °C

Cuando un material cerámico es sometido al calor, tienen lugar una serie de procesos de absorción y desprendimiento de calor y gases, dilataciones y contracciones. Durante la cocción el metacaolin se transforma en la fase cristalina mullita por el tipo de reacción de oxidación que experimenta.

### 3.1. Fabricación de crisoles

Se realizaron dos procesos de fabricación de crisoles para comparar los factores de formado que inciden en las características finales y en el desempeño de las piezas cerámicas. En la técnica de vaciado deslizante se utilizó una mezcla de arcilla y agua, en una relación S: L 1:1, empleando un molde de yeso. Para el prensado semiseco se preparó una relación S: L de 1:0.15, usando una matriz adaptada a una prensa hidráulica [4,18,19].

En los crisoles fabricados por prensado semiseco se evidenció menor porcentaje de porosidad a los elaborados por la técnica de vaciado deslizante, debido a que la presión aplicada por la prensa compacta la mezcla obligando a los granos a ubicarse entre los intersticios disminuyendo la porosidad. Una de las causas que puede afectar la porosidad en la técnica de vaciado deslizante es el elevado consumo de agua que genera burbujas durante el proceso de colada. La morfología de los granos es determinante para la fabricación de objetos cerámicos, ya que durante el conformado los granos se ubican entre los espacios que quedan entre ellos minimizando la porosidad, evitando grietas y confiriendo mayor resistencia al crisol [20].

Los resultados obtenidos en la prueba de compresión muestran que no existe ninguna diferencia de resistencia entre las dos probetas; lo cual comprueba que esta propiedad depende del tipo de arcilla, no de la técnica de formado.

### 3.2. Proceso de cocción

Se utilizaron tres temperaturas 800°C, 900°C y 1000°C. Fueron seleccionadas para garantizar la formación de mullita la cual sucede en el rango de 900°C a 1000°C la cual es considerada una de las fases importantes en los materiales cerámicos por que proporciona a la arcilla resistencia a choques térmicos, rotura y deformación. Luego del proceso de cocción de los crisoles se realizó el control de calidad por inspección visual y al observarlos se aprecia fragilidad y desmoronamiento en el crisol a 800°C. Por tal motivo se seleccionaron los crisoles cocidos a 900° y 1000°C, comprobando una vez más que la formación de mullita en la arcilla caolinítica otorga las mejores propiedades para los materiales cerámicos.

### 3.3. Ensayo al fuego

Para evaluar la resistencia de los crisoles, se realizó una fusión en un ensayo al fuego para la caracterización de un mineral de oro de Marmato Caldas. Se utilizaron los crisoles fabricados con arcilla caolinítica de Combita-Boyacá y de acuerdo a los resultados obtenidos en los procesos de fabricación y cocción se emplearon los crisoles realizados por prensado semiseco y los cocidos a 900°C y 1000°C, figura 8.



Figura 8. Ensayo al fuego con mineral de oro de Marmato-Caldas. a) Colada en coquillas. b) crisoles después del proceso de fusión del ensayo al fuego

Durante la fusión del mineral aurífero y al realizar la colada en las coquillas no se observó ningún tipo de rotura o grietas en los crisoles. Se comprobó que los crisoles seleccionados tienen baja porosidad y por tal motivo son aptos para resistir reactivos tan agresivos como el litargirio, el cual al ser absorbido y retenido entre los poros del crisol puede causar la generación de grietas. Otra ventaja que presentaron los crisoles fabricados con arcilla caolinitica es que no fue necesario realizarle una rampa de calentamiento para utilizarlos en el proceso de fusión, lo que ahorra mayor tiempo en el proceso de caracterización de minerales de oro.

Estos resultados se consideran satisfactorios para el desarrollo de una empresa alternativa de crisoles en arcilla que sean utilizados en la fusión de minerales de oro en la industria extractiva, debido a que en Colombia se encuentran muy pocas. Actualmente muchas investigaciones referentes a la extracción de oro utilizan el ensayo al fuego como método de caracterización del mineral, apoyando técnicas complementarias más especializadas. El ensayo al fuego es una técnica de caracterización que podría ser utilizada en minería a pequeña escala por ser un proceso económico y factible para realizarse en cualquier lugar; además siempre será elegido por ser el más exacto al hacer determinaciones de metales preciosos que, en algunas ocasiones, son difíciles de caracterizar por su bajo contenido en el mineral, como sucede en los minerales refractarios. [21-23]

#### 4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en este estudio se demuestra el potencial de la arcilla caolinitica procedente de la vereda de San Isidro del municipio de Combita, para su utilización como materia prima en la fabricación de crisoles usados en la caracterización de minerales de oro.

Los análisis fisicoquímicos indicaron que la arcilla caolinitica contiene 67 % de Si, 22.8 % de Al, 3.79 de Cu, 1.96 % de Ti, 1.8 % Mg y en menores proporciones Cr y Cu considerados como impurezas, lo cual indica que se puede emplear en la manufactura de refractarios.

Durante el desarrollo de este estudio se estableció que la temperatura de cocción adecuada para los crisoles de arcilla caolinitica es de 1000 °C, debido a que se garantiza la formación de mullita, fase importante que le confiere propiedades a las piezas cerámicas, como; resistencia al choque térmico, alta resistencia al desgaste y a la deformación.

Mediante el ensayo de porosidad se determinó que los crisoles elaborados por el método de prensado semi-seco, son idóneos para ser empleados en la fusión de mineral de oro, debido a su bajo porcentaje de poros del 3.09 %. Mientras que los crisoles fabricados por el método de vaciado deslizante, no son aptos para ser usados en este proceso porque poseen 7.09 % de porosidad, que puede ocasionar rotura durante la fusión.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- 
- [1] El tiempo. (13 abril 2021). Independencia, técnicas y minería del oro en Colombia. El desarrollo de la minería científica moderna no puede explicarse sin la apertura al mundo. <https://www.eltiempo.com/opinion/columnistas/la-columna-bicentenario/independencia-tecnicas-y-mineria-del-oro-en-colombia-la-columna-bicentenario-449634>
- [2] Freddy H., Pantoja T., Sebastián P. B.(2016). Problemas y desafíos de la minería de oro artesanal y en pequeña escala en Colombia.V, 24, 147-160. <http://dx.doi.org/10.18359/rfce.2217>
- [3]Leonardo G. (2013). Small scale mining in Colombia: not such a small activity.V. 80, 109-117. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/35819/45320>
- [4] Qiang W., Ting L., Yunlong C., Shuliang C., Xuecong Q., Yanhe N., Futing Z.(2020). Eco-friendly and economical extraction of gold from a refractory gold ore in iodide solution using persulfate as the oxidant. V. 198. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105502>
- [5] Robinson T., Gretchen T. L. (2020) Base metal citrate pretreatment of complex ores to improve gold and silver leaching with thiourea. V. 197. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105461>
- [6] Marcelo, A. B., Paolo Jesús, G. J., Gianmarco, G. F., Luis Andrés, L. (2014). Elaboración del crisol refractario. [Tesis Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Huacho, Perú.
- [7] Martha Leonor C., Fabio Enrique B. (1993). Caracterización química y mineralógica de una arcilla procedente del municipio de Arcabuco. [Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Tunja, Boyacá.
- [8] Kern, MD. (1994). Lead poisoning in precious metals refinery assayers: a failure to notify workers at high risk. American Journal of Industrial Medicine. V. 25, 759-767. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700250515>
- [9] Groover, M. P. (1997) Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas, Prentice Hall, Inc., A Simon y Schuster Company.
- [10] Méndez L., Delvasto, P., Quintero, O. (2007). Diseño y fabricación de moldes para solidificación unidireccional en aleaciones de aluminio. Revista Latinoamérica de Metalurgia y Materiales. V. 27. [https:// www.poli-meros.labb.usb.ve/RLMM/home.html](https://www.poli-meros.labb.usb.ve/RLMM/home.html)
- [11] Yenni Maricela, O. V. (2014). Diseño de una planta piloto para la producción de crisoles semirefractarios a partir de desechos refractarios industriales y arcillas ecuatorianas. [Trabajo de grado Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional]. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial Quito Ecuador.
- [12] Gabriela Mabel, G. M. (2015). Diseño y construcción de un horno de minerales auríferos. [Trabajo de titulación de ingeniera química, Universidad Técnica de Machala]. Machala.
- [13] Brayam José, A. H., Melani Carolina R. P. (2017). Ensayo de Compresión Axial y Compresión Diagonal de especímenes de albañilería de bloques de arcilla (Hércules I) fabricados en la Ciudad de Tacna. [Tesis de grado, Universidad privada de Tacna]. Escuela profesional de ingeniería civil, Perú.
- [14] Carrado, K. Decarreau, A. Petit, S. Bergaya, F. Lagaly, G. (2006). Synthetic clay minerals and purification of natural clays. Handbook of Clay Science. 115-139. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01004-4](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01004-4)
- [15] Carriazo, J. Molina, R., Moreno, S. (2007). Caracterización estructural y textural de una bentonita colombiana. Revista Colombiana de Química. V. 36, pp 213-225. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/879>.
- [16] Gil, A. Korili, S., Vicente, M. A. (2008). Recent advances in the control and characterization of the porous structure of pillared clay catalysts. Catalysis Review. Science and Engineering. pp 153-221. <https://doi.org/10.1080/01614940802019383>
- [17] Mahmoudi, S., Srasra, E. Zargouni, F. (2008). The use of Tunisian Barremian clay in the traditional ceramic industry: Optimization of ceramic properties, Applied Clay Science. V. 42, pp. 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.12.008>

[18] Darío G., Luis Orlando C. (2005). Estudio de las arcillas del municipio de Chinavita para la posible fabricación de refractarios. [Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de ingeniería, Escuela de Metalurgia, Tunja.

[19] Marcos Ramón L., Jorge Humberto H. (1982). Estudio a nivel de laboratorio para la fabricación de ladrillos refractarios para revestimiento de cucharas. [Trabajo de grado de especialización en metalurgia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Facultad de ingeniería, Escuela de Metalurgia, Tunja.

[20] Roy W. R. (1998). Porosity of Ceramics. En Marcel Dekker, Inc (Ed.), New York.

[21] Ana G., Jorge G., Hermes M.(2005). Using microwaves in auriferous refractory menas and their effect in the extraction of gold. V. 73, 29-37. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/831>

[22] Nestor R., Luver E., Jesús C. (2017). Caracterización por QEMSCAN y FE-SEM de yacimientos de oro tratados artesanalmente con mercurio en Antioquia, Colombia. V. 15, 107-116. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.1199>

[23]Luver E., Eugenia A., Nestor R. (2016). Caracterización mineralógica de yacimientos auríferos rudimentariamente extraídos con mercurio en Antioquia, Colombia.V.8, 26-33. <https://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/92/135>