

CARACTERIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA INDUSTRIA ELECTROCERÁMICA, COMO FUENTE DE EXTRACCIÓN DE ALÚMINA

Luis Fernando Henao Henao^{1}, María Esperanza López Gómez¹*

1: Departamento de Ingeniería Materiales y Grupo de Investigación en Materiales y Recubrimientos Cerámicos (GIMACYR), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

* E-mail: ferchogta@gmail.com

RESUMEN

Con el fin de hacer aportes a los problemas generados por el agotamiento de los recursos naturales no renovables y al manejo y disposición final de los desechos producidos, se realizó este estudio; en el cual se evaluó la posibilidad de tratar unos residuos cerámicos de electro porcelana (RCE), los cuales contienen cantidades significativas de alúmina; para este caso en específico 26.36% p/p, dispuesto en una materia prima que contiene dos estructuras diferentes, amorfa y cristalina. En la parte experimental, se investigó el efecto de los parámetros tales como la concentración de ácido (cantidad de agua), la cantidad de ácido y la concentración de sólidos, como factores que promueven la lixiviación de los RCE. De los resultados experimentales, se observó que al lixiviar a una concentración al 20% V/V de ácido sulfúrico a 90°C, durante 3 h y con velocidad de agitación de 250 rpm se encuentra la máxima de extracción de alúmina 23.57 % p/p. El producto obtenido, después de calcinar durante 6 h a 1100°C la muestra final extraída de los RCE, fue una α -alúmina del 97.9% de pureza.

Palabras Clave: Residuos cerámicos, alúmina, lixiviación con ácido sulfúrico, utilización de residuos.

CHARACTERIZATION AND UTILIZATION OF SOLID WASTE FROM THE ELECTRO-CERAMIC INDUSTRY, AS ALUMINA EXTRACTION SOURCE

ABSTRACT

In order to make contributions to the problems generated by the depletion of non-renewable natural resources and the management and final disposal of wastes, this study was conducted; in which evaluated the possibility of treating electro porcelain waste (RCE), ceramic waste that contains significant amounts of alumina, for this case in specific 26.36% w/w, arranged in a raw material that contains two different amorphous and crystalline structures. In the experimental, It has been investigated the effect of parameters such as the concentration of acid (amount of water), the amount of acid and the concentration of solids, as factors that promote leaching of the RCE. From the experimental results, it can note that it leaching with a concentration 20% V/V sulphuric acid at 90° C for 3 h and with agitation speed of 250 rpm has been found the maximum extraction alumina which was 23.57% w/w. The product obtained after calcining at 6 h at 1100 ° C the final sample extracted from RCE, was α -alumina of 97.9% pure.

Keywords: Insulator ceramic wastes, alumina, leaching with sulphuric acid, wastes utilization.

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos producidos por los materiales cerámicos provienen principalmente de dos fuentes. La primera es la industria cerámica, y la segunda se relaciona con la construcción y demolición. Los residuos se generan de diferentes formas, algunos de los cuales se producen durante y después del proceso de producción debido a errores asociados a actividades humanas y también a materias primas inadecuadas. Estos residuos causan contaminación del suelo, del aire y de las aguas subterráneas [1,2]. La reutilización de residuos provenientes de la industria cerámica podría ser traducida como una situación de ganancia tanto para el ambiente como para la industria. Por un lado, se resuelve el problema de los residuos de la industria cerámica, evitando así los problemas ambientales relacionados con rellenos sanitarios y, al mismo tiempo conduce hacia un nuevo recurso para extracción de alúmina [3].

La mayoría de los estudios realizados para la reutilización de residuos cerámicos han sido enfocados a su uso como agregado grueso en el concreto [4–13]. Otras investigaciones se han centrado en la utilización de los residuos cerámicos como agregado fino para el concreto [14–17]. Sin embargo, muy pocos estudios se han hecho para utilizar los residuos cerámicos como fuente para extracción de alúmina como posible alternativa al caolín y bauxita [18]. Hoy en día la alúmina tiene una alta demanda de producción, debido a la variedad de propiedades que contiene; pero su producción empieza a ser muy limitada, es por eso que la principal alternativa es la obtención de alúmina y bauxita desde países árabes, Australia, Jamaica, Brasil y Nueva Guinea donde hoy por hoy se conservan reservas de bauxita. Pero eso implica una dependencia internacional [19,20].

Este trabajo está enmarcado en la idea de atender la problemática ambiental que generan los residuos cerámicos provenientes de la industria cerámica, es por eso, que se ha propuesto estudiar el aprovechamiento de residuos cerámicos desperdiciados durante su producción industrial para la extracción de alúmina. Para lo anterior, los residuos triturados se caracterizaron completamente, para su análisis químico y de fases. A través de pruebas de laboratorio se buscaron las condiciones adecuadas para la extracción de alúmina, para eso se estudiaron las variables de lixiviación con el método ácido para la alúmina, titanio y hierro. Lo anterior se hizo mediante análisis gravimétrico por precipitación, el cual incluyó toma y preparación de la muestra (disolución), precipitación, filtrado, lavado del precipitado y finalmente un secado y calcinación [21, 22]. Los resultados de extracción de alúmina se investigaron para inspeccionar su pureza y la cristalografía.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Caracterización de los residuos de electro porcelana (RCE)

El material utilizado RCE a lo largo de este estudio fue proporcionado por una empresa de la ciudad de Medellín. El material RCE se recibió en forma de partículas finas, pasante malla 200 Tyler (75 μm) Este tamaño es óptimo para la lixiviación acida según los estudios hechos por algunos autores [18,23].

Para garantizar la identificación de las fases cristalinas y amorfas, todas las muestras de RCE estudiadas se mezclaron estequiométricamente de la siguiente forma: se mezcló 0.8 g (80% p/p) de material RCE con 0.2 g (20% p/p) de reactivo de laboratorio zincita (ZnO), la adición de esta cantidad conocida de estándar interno (ZnO) se hizo con el fin de determinar las concentraciones en peso de las fases presentes (amorfa y cristalina). Se recomienda utilizar zincita (ZnO) debido a

que el corindón, el cuarzo y el rutilo, que podrían usarse también, eran ya fases presentes en la muestra de RCE.

Para los análisis cristalográficos, se usó un difractómetro de rayos X EMPYREAN operado con radiación Cu-K α generada a 45 kV y 40 mA, un ángulo de barrido entre 5° - 90° (2 θ) con 0.02° por paso y un tiempo 38.9 s por paso. Los patrones del DRX fueron analizados utilizando el software Xpert High Score Plus V 3.0 por medio del método de Rietveld [24].

El análisis de la composición química se llevó a cabo usando espectrómetro de fluorescencia de rayos X, ARL OPTIM'X WDXRF Spectrometer marca Thermo Scientific.

2.2. Desarrollo experimental

Se plantea una experimentación en la cual se contempla la variación de la concentración y el volumen de ácido, para el primer grupo de ensayos. La concentración de sólidos y concentración de ácido para el segundo grupo. El rango de operación del ácido sulfúrico es 18 M, esta concentración es sugerida como una concentración óptima por los autores P. Numluk and A. Chaisena 2012 [25], A. Shemi, R. N. Mpana 2012 [26]. En las Tablas 1 y 2 se presentan las condiciones de trabajo de los experimentos desde sus condiciones de origen y partida. Lo anterior soportado por el software Minitab17. Para evaluar la importancia de los factores se empleó un análisis de resultados utilizando gráfico de barras.

En las Tabla 1 y 2 se muestran los factores definidos para el primer grupo y segundo grupo respectivamente y se presenta el orden de corridas para cada experimento.

Tabla 1. Niveles de cada factor para el primer grupo y orden de corridas.

Orden de corrida		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factores de control	Concentración de ácido % V/V	20	20	20	30	30	30	40	40	40
	Cantidad de ácido (mL)	200	300	400	200	300	400	200	300	400
Factores constantes	Muestra RCE(g)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Temperatura de reacción (°C)	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Tiempo de reacción (min)	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	Velocidad de agitación (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250

Tabla 2. Niveles de cada factor para el segundo grupo y orden de corridas.

Orden de corrida		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factores de control	Concentración de ácido % V/V	20	20	20	30	30	30	40	40	40
	Concentración de sólidos % p/p	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Factores constantes	Muestra RCE (g)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Temperatura de reacción (°C)	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Tiempo de reacción (min)	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	Velocidad de agitación (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250

2.3. Lixiviación ácida indirecta

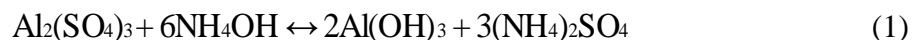
Las distintas corridas (ver Tablas 1 y 2) se llevaron a cabo, utilizando un Erlenmeyer aforado de 500 mL, un baño térmico con aceite, un refrigerante de serpentín para condensar, agitación y temperatura controlada. Mediante un embudo de filtración se adicionó una muestra RCE ponderada previamente, al Erlenmeyer volumétrico que contenía ácido sulfúrico y luego se agitó la mezcla resultante en un baño con temperatura constante. Las variables de la lixiviación fueron: concentración de ácido sulfúrico (% V/V) y volumen de ácido (mL) y concentración de sólidos (% p/p), con una velocidad, una temperatura y tiempo constante 250 rpm, 90°C y 3 h respectivamente. Después de la lixiviación, la fase sólida producto de la disolución se separó de la solución por filtración. Se utilizó agua destilada para eliminar todo el licor que fue absorbido por la fase sólida. Posteriormente, el licor de lixiviación y solución de lavado se combinaron para producir el licor de lixiviación final. La fase sólida se secó en una estufa a 100°C durante 1 h para luego registrar su peso final.

2.4. Precipitación iónica para el primer grupo

La precipitación iónica de los hidróxidos metálicos se hizo siguiendo los métodos planteados por C. K. Gupta [27], precipitando a un pH de 1.8 el hidróxido de titanio en caso de que se haya disuelto este elemento, este precipitado se retiró de la solución con ayuda del filtrado y continuo a esto se ajusta el pH a 2.5 para favorecer la precipitación del hidróxido de hierro en caso de que esté presente, este precipitado también se retiró de la solución por filtración y finalmente un licor rico en aluminio es enviado a análisis de metales pesados por la técnica de ICP-OES para determinar los gramos de aluminio en la solución. Los ajustes de pH se hicieron adicionando gota a gota en la solución usando una bureta NaOH y NH₄OH respectivamente.

Finalmente con una base débil (NH₄OH) se ajusta el pH hasta 5, donde se consigue precipitar los iones Al³⁺ como hidróxidos de aluminio. Los anteriores, disueltos en el licor tal como lo indica la reacción (1) [27]. En este punto se incluye una etapa de lavado con agua destilada a 60°C; propuesto

para eliminar productos residuales tales como óxidos ácidos (anhídridos de sulfuro) y aluminatos sódicos absorbidos por el precipitado metálico durante la precipitación. Los precipitados lavados se filtraron, y se secaron a 100 °C por 3h para eliminar el agua libre.



2.5. Calcinación del hidróxido de aluminio

La calcinación de la muestra final se hizo siguiendo el método documentado por C. K. Gupta [27]. Se preparó un ciclo térmico con una rampa de calentamiento a 9 °C/min para calcinar una muestra del precipitado a 1100 °C por 6 h para formar óxidos metálicos. Los porcentajes de los elementos presentes en el producto final se calcularon a partir de los resultados de FRX. El análisis de la composición química se llevó a cabo usando espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda, modelo PW 2400 PANALYTICAL. Una porción del producto final calcinado, se analizó mediante difracción de rayos X (DRX) para identificar las fases presentes en la muestra, en el mismo equipo que se usó para la caracterización de los RCE.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización química y de fases de los RCE

El análisis de DRX para una muestra representativa de RCE muestra que los RCE utilizados en este estudio contiene (ver Figura 1) especies, tales como corindón (Al_2O_3 : 9.5%), mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$: 2.2%) y cuarzo (SiO_2 : 31.9%) y una fase amorfa predominante (55.4%). Los resultados fueron similares a los reportados por algunos estudios anteriores [28,29]. El contenido de cuarzo (fase cristalina principal) fue el más abundante en los RCE.

El patrón de difracción de rayos X para la muestra de RCE, se presenta en la Figura 1. En este se aprecia la presencia de fase cristalina y fase amorfa, esta última se observa en la discontinuidad lineal y en la curvatura de la base del patrón de difracción.

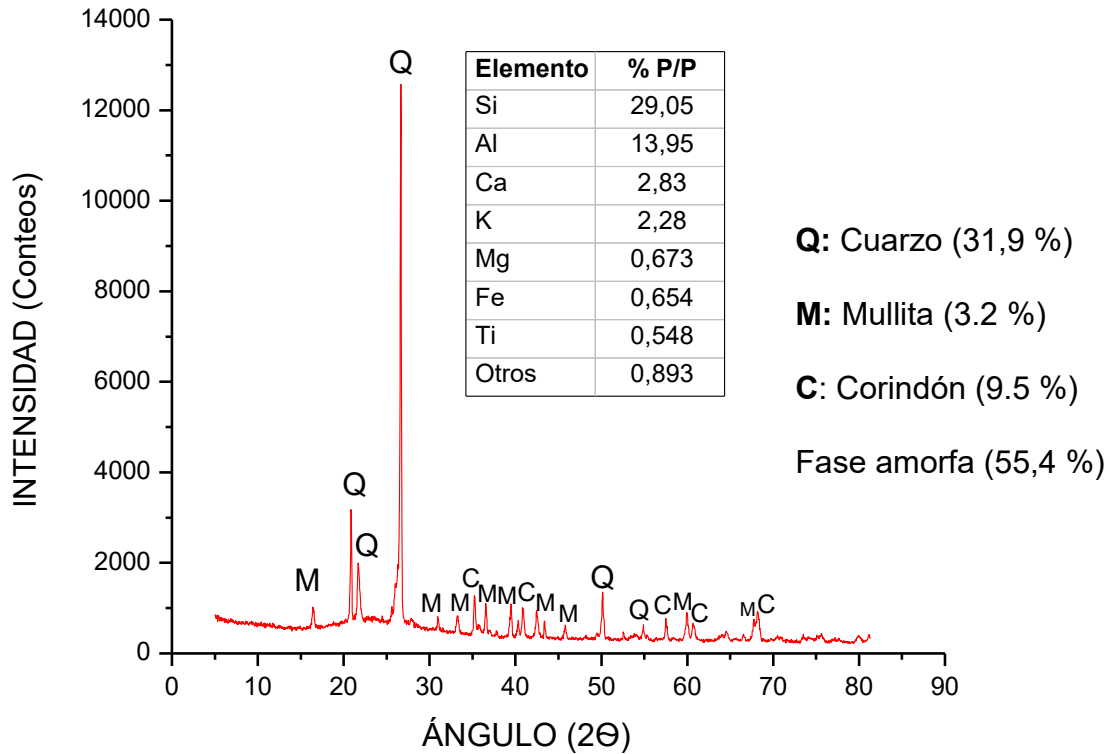


Figura 1. DRX y FRX para la muestra de RCE de partida.

Los resultados de la composición química de RCE se presentan en la Figura 1. El análisis de FRX muestra que el elemento principal en los RCE es el silicio siendo del 29.05% p/p. El contenido de Al y Si en la muestra de RCE representa el 43% p/p, calcio y potasio en un 2.83% p/p y 2.28% p/p respectivamente y el resto corresponde a otros elementos en menores proporciones como Fe, Ti, Ca, K, Mg. Se observa (ver Figura 1) que los RCE utilizados en este trabajo tienen un contenido particularmente alto de aluminio, lo cual sugiere una fuente aprovechable de alúmina.

Los sistemas cristalinos de cada una de las fases cristalográficas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los sistemas cristalinos mediante el método de Rietveld para la muestra de partida (RCE).

Fase cristalográfica	Corindón	Cuarzo	Mullita
Formula química	Al ₁₂ O ₁₈	Si ₃ O ₆	Al ₁₀ Si ₈ O ₁₄
Código de referencia	96-900-9680	96-900-9667	96-901-0161
Sistema cristalográfico	Hexagonal	Hexagonal	Ortorrómico
Parámetros de celda unitaria	a = b= 4.75917 Å	a = b= 4.91539 Å	a = 7.56343 Å
	c = 12.97707 Å	c = 5.40945 Å	b = 7.6794 Å
	$\alpha = \beta = 90^\circ$	$\alpha = \beta = 90^\circ$	c = 2.88545 Å
	$\gamma = 120^\circ$	$\gamma = 90^\circ$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

3.2. Resultados de las lixiviaciones

Los resultados obtenidos durante la lixiviación para el primer y segundo grupo, propuestos en las Tablas 1 y 2, se resumen en las Figuras 2 y 3 respectivamente.

3.2.1 Efecto del volumen del ácido y de su concentración en la disolución del aluminio.

El efecto del volumen de ácido H₂SO₄ y su concentración en función de la extracción de aluminio a partir de los RCE por lixiviación con ácido sulfúrico se muestra en la Figura 2. En la gráfica se observa que el 89.44% de la alúmina se disuelve cuando los RCE se lixivian con 200 mL de H₂SO₄ en la concentración de ácido 20% V/V, siendo ésta la mayor eficiencia. Al aumentar el volumen de ácido a 300 mL, la eficiencia disminuyó al 62.01%. Un aumento en la concentración de ácido al 30% V/V también produjo una tendencia similar en la extracción de aluminio. Cabe señalar que para todas las concentraciones de ácido, cuando se aumenta su volumen disminuye la eficiencia de la extracción de aluminio. Se ha encontrado, además, que inicialmente a la misma cantidad de ácido las extracciones son menores para concentraciones más altas de ácido. La baja extracción de aluminio con ácido concentrado (30% y 40% V/V) puede ser atribuida a un fenómeno similar al que han observado los autores A. Seidel, y Y. Zimmels (1998) [30], donde proponen que un incremento en la concentración de ácido produce dos efectos opuestos simultáneamente: Un incremento en el ion hidronio incrementa la disolución de la alúmina, mientras que el incremento en la concentración de sulfatos y de iones de calcio, magnesio y potasio disueltos intensifican la formación de sulfato de calcio, magnesio y potasio precipitado. Los precipitados disminuyen la transferencia de masa entre las partículas de RCE, en consecuencia impiden la disolución del aluminio.

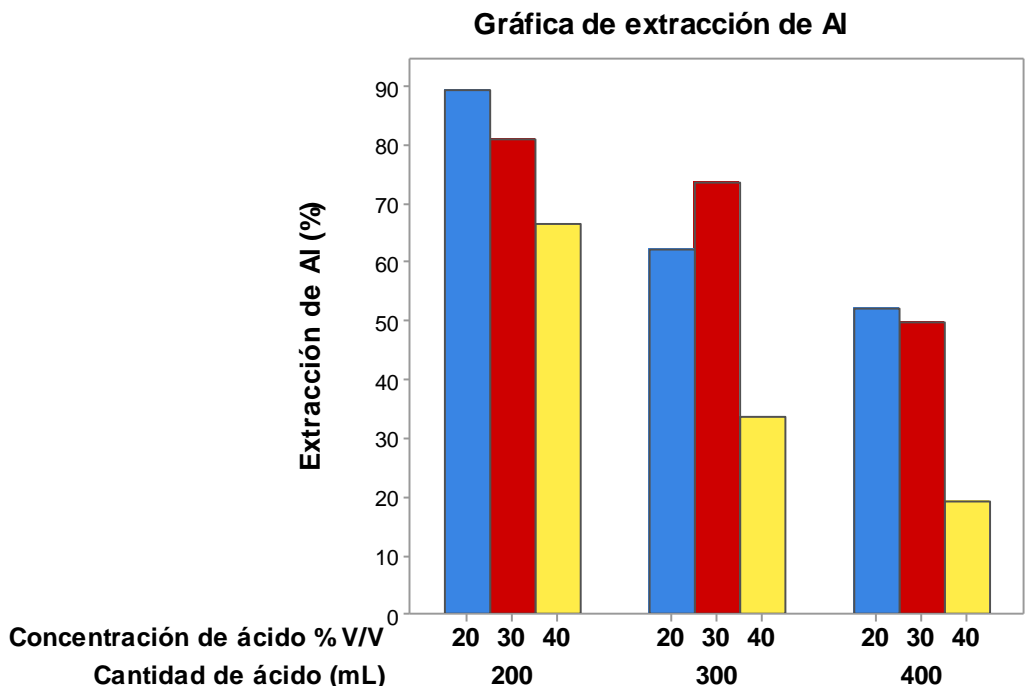


Figura 2. Disolución de alúmina en función del volumen de ácido H_2SO_4 y su concentración.

Así, se ha observado que para una concentración baja de H_2SO_4 , el aumento del volumen de ácido no tiene mucho impacto en la disolución, puesto que la extracción disminuye en todos los casos. Por lo tanto, en cada nivel de concentración de ácido la cantidad óptima de ácido y agua son importantes.

3.2.2 Efecto de la concentración de sólido a diferentes concentraciones de ácido

La Figura 3 representa gráficamente el porcentaje de extracción de aluminio como una función de la concentración de sólidos y de la concentración de H_2SO_4 (Concentración de ácido % V/V, eje X Figura 3). La máxima extracción de aluminio alcanzada fue de 53.41% p/p usando 5% en sólidos y una concentración de H_2SO_4 del 20% V/V. En los tres casos (ácido al 20, 30 y 40% V/V) la extracción de aluminio aumenta inicialmente y posteriormente cae. Se encontró que la concentración de H_2SO_4 al 20% mostró una recuperación máxima para todas las concentraciones de sólidos es decir: al 5, 10 y 15% p/p respectivamente.

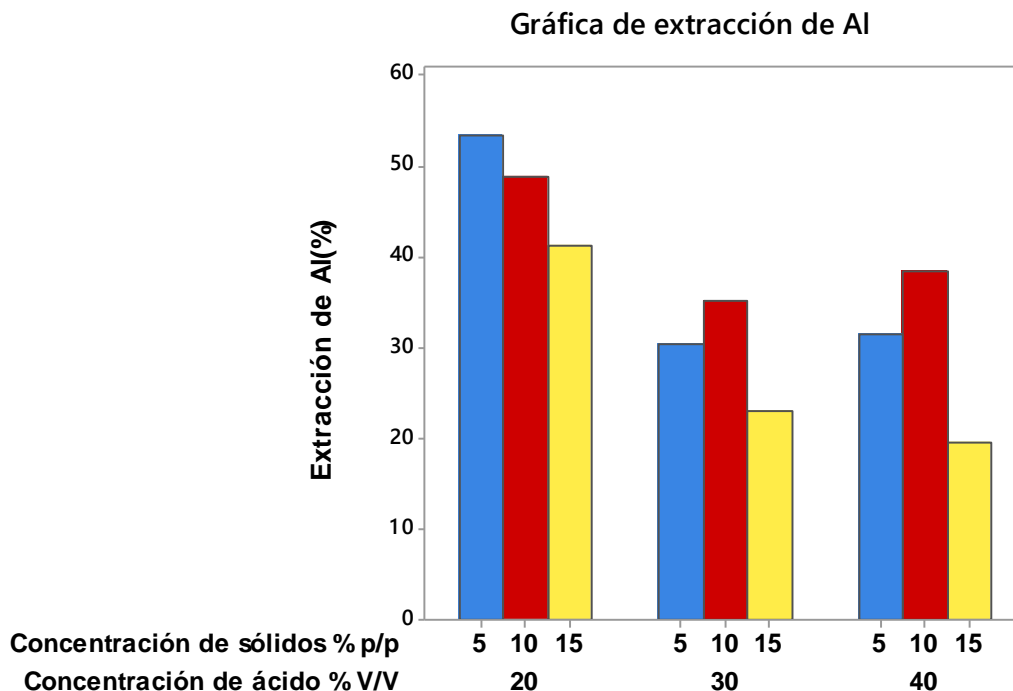


Figura 3. Eficiencia de la extracción de alúmina en función de la concentración de sólido en diversas concentraciones de ácido.

En general una suspensión menos densa libera partículas de los RCE y crea un área superficial disponible para el contacto entre los reactivos, eso explica por qué a una concentración de H_2SO_4 del 20% V/V se obtiene la mayor recuperación. La formación de sulfatos en ácidos concentrados obstruye la transferencia de masa a través de las partículas de RCE lo que retarda la reacción, disminuye la disolución y, en consecuencia provoca una mínima extracción de aluminio. La disminución en la extracción de aluminio para concentraciones mayores que 10% p/p son probablemente debido a las bajas tasas de transferencia de masa de los reactivos y productos, causados por el aumento de la concentración de sólidos. Esto puede haber causado que las partículas no hayan quedado suspendidas de manera eficiente en la solución, ya que la velocidad de agitación se mantuvo constante (250 rpm).

3.3. Resultados de la caracterización de la muestra final extraída de los RCE

Se analizó por DRX y FRX uno de los productos obtenidos de una de las pruebas (la de mejor resultado), a la cual se le aplicó un tratamiento térmico a $1100^{\circ}C$. El patrón de difracción de rayos X (DRX) y los resultados de la fluorescencia de rayos x se presenta en la Figura 4.

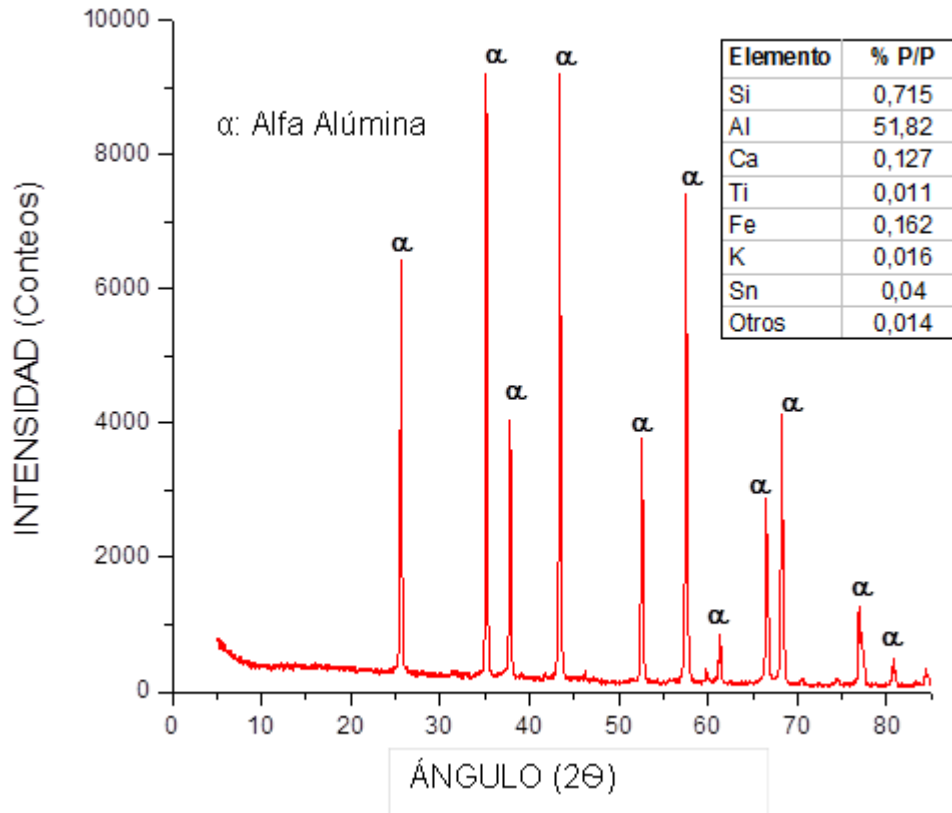


Figura 4. DRX y FRX de la muestra de alúmina proveniente de los RCE lixiviados con 200 mL de H₂SO₄ y con una concentración 20% V/V (α: Alfa- Alúmina).

El análisis de la DRX para la muestra final extraída de los RCE (ver Figura 4), muestra picos fuertes y agudos debido a la fase hexagonal de α-Al₂O₃ (COD No. 96-900-9679). El análisis de difracción de rayos X también indica que la reacción de Al₂O₃·3H₂O en α-Al₂O₃ ya ha ocurrido a 1100°C, este resultado es consistente con los resultados reportados previamente por los autores Mikk Vahtrus, Madis Umalas, Boris Polyakov, en el 2015 [31] y por S. Cava, S.M. Tebcherani, I.A. Souza, en el 2007 [32].

Los resultados de la composición química de RCE es presentada en la Figura 4. A partir de estos se puede ver que la composición del producto final consiste en Al 51.82% p. El resto corresponde a elementos (impurezas) en menores proporciones, éstos son: Si 0.715%, Fe 0.162%, Ti 0.011%, Ca 0.127% y K 0.016%. Los resultados dados anteriormente muestran que el producto final calcinado contiene óxidos metálicos en alta concentración tal como Al₂O₃ (Alúmina) correspondiente al 97.9% p/p en comparación con la muestra inicial de partida (ver Figura 1). Los siguientes elementos se derivan de los RCE iniciales: Si, Fe, Ti, Ca, y K (ver Figura 1), los cuales se han escapado al proceso de precipitación selectiva y separación respectivamente. Los resultados presentados anteriormente indican que el contenido de sulfuro y sodio del producto final extraído se redujo muy por debajo del 1% después de lavar con agua destilada. A partir de los resultados de la Figura 4 y comparados con los de la Figura 1 se puede observar que el proceso parece eficaz en la separación iones de Al³⁺, Ti⁴⁺ y K¹⁺ pero no de manera total para otras impurezas tales como, Si, Fe y Ca.

El sistema cristalino de la fase cristalográfica, se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultado del sistema cristalino mediante el método de Rietveld para la muestra final con tratamiento térmico a 1100°C.

Fase cristalográfica	Corindón
Formula química	Al ₁₂ O ₁₈
Código de referencia	96-900-9679
Sistema cristalográfico	Hexagonal
Densidad calculada	3.98 g/cm ³ ±0.13
Parámetros de celda unitaria	a = b = 4,7610 Å
	c = 12,9950 Å
	$\alpha = \beta = 90^\circ$
	$\gamma = 120^\circ$

4. CONCLUSIONES

Los RCE contienen cantidades significativas de alúmina de 26.36% p/p, que fue la cantidad de alúmina disponible para la disolución, tema de este trabajo.

Los resultados experimentales mostraron que la máxima extracción de aluminio fue de 89.44% (que corresponden a 23.57% p/p de alúmina) cuando se utilizó una cantidad de 200 mL al 20% V/V de ácido sulfúrico. Los resultados experimentales también mostraron que la máxima extracción de aluminio alcanzada fue de 54.41% p/p usando 5% p/p en sólidos y una concentración de H₂SO₄ del 20% V/V. También se encontró que la concentración de H₂SO₄ al 20% V/V mostró una recuperación máxima para todas las concentraciones de sólidos es decir: al 5, 10 y 15% p/p respectivamente. Por lo tanto, 20% V/V fue adoptado como la concentración de ácido apropiada. Se ha deducido que la disolución de alúmina en los RCE está influenciada por la concentración de ácido, y por la concentración de sólidos.

El análisis de difracción de rayos X y la fluorescencia de rayo X aplicado a la muestra final reveló α -alúmina del 97.9% p/p con un contenido Al de 51.82% p/p cuando ésta fue tratada a 1100°C por 6 h. Estos resultados demuestran que la α -alúmina es posible extraerse a partir de los RCE.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morán del Pozo, J. M., Juan Valdés, A., Aguado, P. J., *et al.*, “Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones”, *Inf. La Construcción*, vol. 63, no. 521, pp. 89–95, Mar. 2011.
- [2] Laner, D., Fellner, J., Brunner, P. H., “Flooding of municipal solid waste landfills--an environmental hazard?”, *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 12, pp. 3674–80, Jun. 2009.
- [3] Tabereaux, A. T., Peterson, R. D., *Treatise on process metallurgy*, Elsevier, 2014.
- [4] Senthamarai, R., Manoharan, P. D., Gobinath, D., “Concrete made from ceramic industry waste: durability properties”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2413–2419, May. 2011.
- [5] Medina, C., Sánchez de Rojas, M. I., Frías, M., “Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 1, pp. 48–54, Jan. 2012.
- [6] Netinger, I., Kesegic, I., Guljas, I., “The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates”, *Fire Saf. J.*, vol. 46, no. 7, pp.

425–430, Oct. 2011.

[7] Vijayalakshmi, M., Sekar, A. S. S., Ganesh prabhu, G., “Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 1–7, Sep. 2013.

[8] Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., *et al.*, “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 357–369, Feb. 2015.

[9] Guerra, I., Vivar, I., Llamas, B., *et al.*, “Eco-efficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete.”, *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 643–6, Feb. 2009.

[10] Halicka, A., Ogrodnik, P., Zegardlo, B., “Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 295–305, Nov. 2013.

[11] Medina, C., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., “Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 112–118, Jun. 2012.

[12] Xu, N., Li, S., Li, Y., *et al.*, “Preparation and properties of porous ceramic aggregates using electrical insulators waste”, *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 4, pp. 5807–5811, May. 2015.

[13] Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., *et al.*, “Re-use of ceramic wastes in construction,” In: *Recycl. Process. Costs Benefits*, Nova Science Publishers, Inc., 2011.

[14] Alves, A. V., Vieira, T. F., De Brito, J., *et al.*, “Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 103–113, Aug. 2014.

[15] Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M., “Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 618–626, Oct. 2014.

[16] Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., *et al.*, “Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 679–690, Mar. 2013.

[17] Torkittikul, P., Chaipanich, A., “Utilization of ceramic waste as fine aggregate within portland cement and fly ash concretes”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 6, pp. 440–449, Jul. 2010.

[18] Yao, Z. T., Xia, M. S., Sarker, P. K., *et al.*, “A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in china”, *Fuel*, vol. 120, pp. 74–85, Mar. 2014.

[19] Park, N.-K., Choi, H.-Y., Kim, D.-H., *et al.*, “Purification of Al(OH)₃ synthesized by bayer process for preparation of high purity alumina as sapphire raw material”, *J. Cryst. Growth*, vol. 373, pp. 88–91, Jun. 2013.

[20] Power, G., Loh, J. S. C., Wajon, J. E., *et al.*, “A review of the determination of organic compounds in bayer process liquors.”, *Anal. Chim. Acta*, vol. 689, no. 1, pp. 8–21, Mar. 2011.

[21] Vogel, A. I., *Química Analítica Cualitativa Incluyendo Semimicroanálisis Cualitativo*.

[22] Das, B. R., Dash, B., Tripathy, B. C., *et al.*, “Production of η-alumina from waste aluminium dross”, *Miner. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 252–258, Mar. 2007.

[23] WU, C., YU, H., ZHANG, H., “Extraction of aluminum by pressure acid-leaching method from coal fly ash”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 22, no. 9, pp. 2282–2288, Sep. 2012.

[24] Santini, T. C., “Application of the rietveld refinement method for quantification of mineral concentrations in bauxite residues (alumina refining tailings)”, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 139, pp. 1–10, Jun. 2015.

[25] Numluk, P., Chaisena, A., “Sulfuric acid and ammonium sulfate leaching of alumina from lampang clay”, *E-Journal Chem.*, vol. 9, no. 3, pp. 1364–1372, 2012.

[26] Shemi, A., Mpana, R. N., Ndlovu, S., *et al.*, “Alternative techniques for extracting alumina from coal fly ash”, *Miner. Eng.*, vol. 34, pp. 30–37, Jul. 2012.

- [27] Gupta, C. K., *Chemical Metallurgy; Principles And Practice*, 2003.
- [28] Kamseu, E., Leonelli, C., Boccaccini, D. N., *et al.*, “Characterisation of porcelain compositions using two china clays from cameroon”, *Ceram. Int.*, vol. 33, no. 5, pp. 851–857, Jul. 2007.
- [29] Meng, Y., Gong, G., Wu, Z., *et al.*, “Fabrication and microstructure investigation of ultra-high-strength porcelain insulator”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 32, no. 12, pp. 3043–3049, Sep. 2012.
- [30] Seidel, A., Zimmels, Y., “Mechanism and kinetics of aluminum and iron leaching from coal fly ash by sulfuric acid”, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 53, no. 22, pp. 3835–3852, 1998.
- [31] Vahtrus, M., Umallas, M., Polyakov, B., *et al.*, “Mechanical and structural characterizations of gamma- and alpha-alumina nanofibers”, *Mater. Charact.*, vol. 107, pp. 119–124, Sep. 2015.
- [32] Cava, S., Tebcherani, S. M., Souza, I. A., *et al.*, “Structural characterization of phase transition of Al_2O_3 nanopowders obtained by polymeric precursor method”, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 103, no. 2–3, pp. 394–399, Jun. 2007.