



Arena de construcción: Material potencial en la elaboración de cerámicas Construction sand: Potential material for ceramic production

L.E. Ibarra-Cruz ^{a,*}, F. Legorreta-García ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Se realizó un estudio sobre el manejo y tratamiento de una arena de construcción proveniente del estado de Hidalgo, con el objetivo de evaluar su potencial en la elaboración de cerámica de alta temperatura. El proceso consistió en una reducción de tamaño, seguida de una separación magnética. Al material no magnético se le aplicó una lixiviación ácida en un reactor a 140 °C bajo presión autógena. Para caracterizar física y químicamente la arena antes y después del tratamiento, se llevaron a cabo análisis por difracción de rayos-x (DRX), fluorescencia de rayos-x (FRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y la determinación del índice de blancura mediante espectroscopía UV-Vis. Los resultados mostraron un material con un contenido del 90 % en masa de SiO₂ y Al₂O₃, así como un índice de blancura de 77.3 %. El polvo obtenido, fue tratado mediante dos rutas: en la primera ruta se sometió a un tratamiento térmico a 1400 °C y en la segunda ruta se mezcló con polvo de Al(OH)₃/SiO₂, obtenido de lata de aluminio reciclada y también se sometió a un tratamiento térmico 1400 °C. Si bien la arena de la primera ruta muestra una fusión incipiente, la adición de polvo de Al(OH)₃/SiO₂ permitió obtener un material vítreo cuya fase cristalina predominante es la andalucita, este último material tiene un alto potencial como precursor para la fabricación de vidrios y materiales refractarios.

Palabras Clave: Arena, Agregados Pétreos, Lixiviación, Aluminosilicato, Separación Magnética.

Abstract

A study was conducted on the handling and treatment of construction sand from the state of Hidalgo, with the aim of evaluating its potential for high-temperature ceramic production. The process involved particle size reduction followed by magnetic separation. The non-magnetic fraction was subjected to acid leaching in a reactor at 140 °C under autogenous pressure. To determine the physical and chemical characteristics of the sand before and after treatment, analyses were performed using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), and whiteness index determination by UV-Vis spectroscopy. The results showed a material containing 90 wt.% of SiO₂ and Al₂O₃, along with a whiteness index of 77.3%. The obtained material was processed through two different routes. In the first route, it was subjected to a thermal treatment at 1400 °C. In the second route, it was mixed with Al(OH)₃/SiO₂ powder derived from recycled aluminum cans and also heat-treated at 1400 °C. While the material from the first route exhibited incipient melting, the addition of Al(OH)₃/SiO₂ powder enabled the formation of a glassy material whose predominant crystalline phase is andalusite. This latter material shows high potential as a precursor for the production of glass and refractory materials.

Keywords: Sand, Stone aggregates, Leaching, Aluminosilicate, Magnetic Separation.

1. Introducción

La arena es un material de construcción muy común y ampliamente utilizado debido a su disponibilidad, bajo costo y facilidad de transporte. Se encuentra en depósitos naturales de ríos, lagos, océanos y canteras, y está compuesta por partículas de roca de entre 0.063 y 2 mm, lo que la hace idónea para aplicaciones como morteros, hormigones, rellenos y

lechos de tuberías (Smith et al., 2001; Alexander et al., 2005). Dentro de los agregados pétreos, que incluyen grava, arena y filler, su clasificación depende del tamaño, densidad, origen y aplicación en la industria de la construcción (Ferreira-Cuéllar et al., 2014). Además de los naturales, existen agregados artificiales producidos a partir de residuos de construcción o de la industria cerámica (Ray et al., 2021; Bommisetty et al., 2019).

*Autor para la correspondencia: felegorreta@hotmail.com

Correo electrónico: felegorreta@hotmail.com (Felipe Legorreta-García), ib368339@uaeh.edu.mx (Luz Elena Ibarra-Cruz)

Un aspecto clave en la composición de los agregados pétreos son los feldespatos, minerales aluminosilicados presentes en gran parte de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Karakaş et al., 2020; Maiza et al., 2010). Su estructura cristalina, compuesta por tetraedros de AlO_4 y SiO_4 , permite la sustitución isomórfica de cationes monovalentes (Na, K) o divalentes (Ca, Ba), dando origen a variedades como albita, ortoclasa y anortita (Green et al., 1986; Ribbe, 2018). Estos minerales son ampliamente valorados en la industria cerámica y del vidrio debido a sus propiedades de fusión y su función como fundentes.

Si bien existen yacimientos de feldespato de alta pureza, su disponibilidad varía geográficamente (Ferreira-Cuéllar et al., 2014). En México, los principales se encuentran en Puebla, Guanajuato y Chihuahua (Secretaría de Economía, 2022). No obstante, en materiales como la arena de construcción o agregados comunes, la presencia de impurezas limita su uso cerámico directo, lo que hace necesarios procesos de beneficio que reduzcan óxidos de hierro y titanio responsables de coloraciones indeseadas.

Diversos métodos han sido explorados para el enriquecimiento de feldespatos y arenas ricas en aluminosilicatos, incluyendo separación magnética, separación gravimétrica, flotación y lixiviación ácida (Zhang et al., 2018; Liu, 2013). Ejemplos de éxito incluyen la reducción de Fe_2O_3 en relaves de granito mediante separación magnética (Silva et al., 2019), la obtención de concentrados de feldespato y cuarzo aptos para vidrio y cerámica tras flotación de impurezas titaníferas (Burat et al., 2007; Gaied et al., 2015), así como el empleo de separación magnética de alta intensidad y flotación selectiva (Moura et al., 2019; Hacifazlioglu et al., 2012; Gulgonul et al., 2018). Paralelamente, la lixiviación con ácidos orgánicos e inorgánicos ha mostrado una gran eficacia para eliminar Fe y Ti y mejorar la blancura de los feldespatos (Vapur et al., 2017; Salimkhani et al., 2020).

Es relevante subrayar que el método de lixiviación ácida a presión aplicado en este estudio es una técnica innovadora para el beneficio de agregados pétreos. Por consiguiente, representa un hito innovador en el campo de investigación de la ingeniería cerámica.

2. Metodología

2.1. Preparación de la muestra

La arena fue proporcionada por la mina Ejido, ubicada en municipio de Zempoala en el estado de Hidalgo, México, sus coordenadas son $19^\circ 55' 25.6'' \text{ N}$ - $98^\circ 43' 37.0'' \text{ W}$. La muestra fue reducida de tamaño mediante trituración primaria y secundaria aplicando el método de cono y cuarteo (Campos et al., 2017), hasta obtener una muestra representativa. Posteriormente la muestra se pulverizó en un mortero de ágata en seco, hasta obtener partículas inferiores a 30 micrómetros.

2.2. Separación de magnética

Las partículas fuertemente magnéticas del polvo fueron separadas con un imán de neodimio, tal y como se indica el trabajo de Herrera et al., (Herrera-Pérez et al., 2021). Tras la

separación magnética se realizó una lixiviación ácida del material no magnético.

2.3. Obtención de $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{SiO}_2$

El polvo de $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{SiO}_2$ se obtuvo mediante la metodología de (Ibarra-Cruz, 2024) el cual posee la composición química siguiente: Al_2O_3 74.400%, SiO_2 1.58%, MgO 0.254%, CaO 0.554%, Na_2O 1.06%, Fe_2O_3 0.027%, Cl 0.682%, P_2O_5 0.011%, SO_3 0.336% y una pérdida por calcinación de 21.1%. Este polvo es un precursor de Al, al poseer un alto porcentaje de Al_2O_3 .

2.4. Lixiviación ácida hidrotermal

En un reactor de teflón se adicionó una solución 6 M de HCl en una relación 1:10 del polvo no magnético. El blanqueo de la arena se realizó mediante lixiviación hidrotermal a una temperatura de 140°C durante 2 h y con presión autógena. Tras el tiempo de lixiviación, el reactor se introdujo en un recipiente con agua fría para terminar la reacción. Finalmente, mediante filtración con abundante agua destilada se realizó la separación del sólido. El polvo obtenido se secó a una temperatura de 80°C durante 12 h para su posterior caracterización.

2.5. Sinterización reactiva

El polvo obtenido, se dividió en dos rutas de proceso: en la primera el polvo se sometió a 1400°C durante 2 h con una rampa de calentamiento de $10^\circ \text{C}/\text{min}$ hasta 1400°C sostenido durante 2 horas y enfriamiento natural. En la segunda ruta se mezcló con polvo de $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{SiO}_2$ en una relación 1.25:1 a las mismas condiciones de temperatura y tiempo. Finalmente se caracterizaron por diferentes técnicas. La nomenclatura de esta muestra se denominó como ACTS (arena con tratamiento sinterizada).

3. Caracterización

3.1. Composición química de óxidos por fluorescencia de rayos-x (FRX)

La composición química de los elementos mayoritarios de las muestras se analizó por FRX con un espectrómetro RIGAKU ZSX Primus II. El análisis se realizó secando las muestras 110°C durante 2 h. Se tomaron 0.8 g de polvo en seco y se mezcló con 7.8 g de borato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) para su fusión y obtención de una perla. La pérdida por calcinación (PXC) se determinó calentando 1 g de muestra molida seca a 950°C por 1 h y midiendo posteriormente la pérdida de masa en porcentaje.

3.2. Estudio cristalográfico por difracción de rayos-x (DRX)

Se realizó el estudio cristalográfico de la muestra por medio de DRX a temperatura ambiente, en un difractómetro marca INEL modelo Equinox 2000, con una fuente de irradiación de $\text{Co K}\alpha 1$ ($\lambda=1.789010 \text{ \AA}$), un detector curvo y aplicando un voltaje de 10 kV. La identificación de las señales de difracción se realizó con el programa Match.

3.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La muestra lixiviada fue sometida a un análisis utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) en un equipo JSM-IT300 de JEOL Ltd. en Tokio, Japón, con una tensión de aceleración de 30 kV.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis químico por Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS por sus siglas en inglés), en diferentes áreas de la muestra sinterizada, utilizando un detector de rayos-x de la marca OXFORD Instruments de Oxford, Reino Unido, el cual está integrado en el mismo equipo.

En la figura 1, se muestra el diagrama experimental y las técnicas de caracterización empleadas. Se complementa con la Tabla 1 que indica los experimentos realizados, los códigos empleados en el manuscrito.

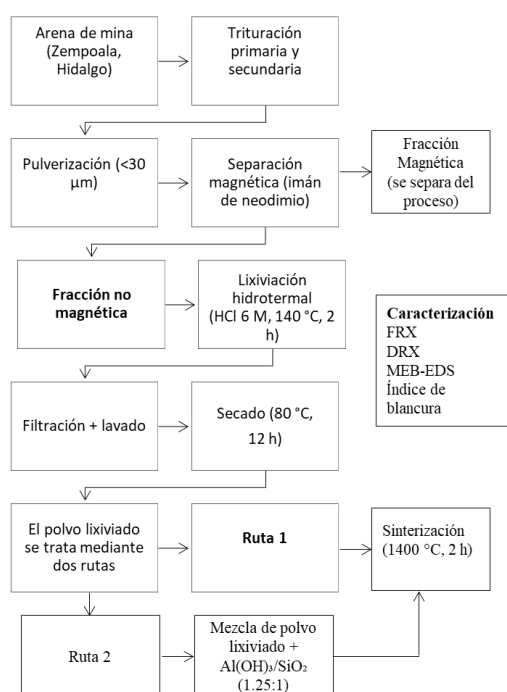


Figura 1. Diagrama experimental que explica todo el proceso que se llevó a cabo en este trabajo.

Tabla 1 Códigos, descripción y experimentación empleados en el manuscrito.

Código	Descripción de muestra	Experimentación
AST	Arena sin tratamiento	Sin tratamiento
ACT	Arena con tratamiento	Separación magnética y lixiviación
P	Pérdida del óxido metálico	Separación magnética
NM	Fración no magnética	Separación magnética
Al(OH) ₃ /SiO ₂	Precursor de Al	(Ibarra-Cruz, 2024)
ACTS	Arena lixiviada sinterizada	Sinterización a 1400°C

3.4. Determinación del índice de blancura.

El índice de blancura se determinó mediante un espectrómetro UV-Vis marca Ocean Optics modelo USB 4000. Se utilizó un estándar para calibrar y establecer el valor de referencia de material blanco con un índice de blancura del 100 %.

La muestra analizada, se comparó con el estándar calibrador y se expresó como un porcentaje del nivel de blancura de la muestra de referencia.

4. Análisis y resultados

4.1. Caracterización de la arena

4.1.1. Análisis químico mediante FRX

La composición química expresada en óxidos y en porcentaje en masa de la arena sin tratamiento (AST) y la arena con tratamiento (ACT), se muestra en la Tabla 2. La composición de la AST indica que ambos materiales están compuestos principalmente de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃), con porcentajes de 71.838 y 14.411 respectivamente, representando más del 86 % en masa del total de la muestra. Además, se encontraron pequeñas cantidades de otros elementos, representados como óxidos: Na₂O, K₂O, CaO, MgO, Fe₂O_{3T}, TiO₂, MnO y P₂O₅.

La tercera columna en la Tabla 2, denominada como %P, se refiere a la pérdida de cada óxido disuelto durante la lixiviación y se determinó en porcentaje mediante la siguiente ecuación:

$$\%P = [(\% I - \% F) / \% I] \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- % P = La pérdida del óxido metálico
- % I = % del óxido arena sin tratamiento
- % F = % del óxido arena con tratamiento

Los valores ausentes de P en SiO₂ y Al₂O₃ y P₂O₅ indican que, tras la lixiviación, se observó un incremento relativo en el porcentaje en masa de estos óxidos. Esto se debe a que el ácido clorhídrico reaccionó preferentemente con las impurezas (óxidos de Fe, Ti, Mg, Ca, entre otros), lo que provocó su disolución y, en consecuencia, un enriquecimiento de los óxidos de sílice, alúmina y potasio. Este efecto refleja una mejora en la calidad del polvo tratado, al aumentar la proporción de sus componentes mayoritarios más estables. En consecuencia, los elevados valores de P calculados para TiO₂, Fe₂O_{3T} y MnO indican la preferencia del HCl en atacar minerales asociados con estos óxidos.

La disolución con HCl se aprecia con especial énfasis en el Fe₂O_{3T}, con un total de 91.329 % en relación con la arena inicial sin tratamiento. A esto le siguen los óxidos de Mg y Ti, con una disolución superior al 81 %.

Asimismo, se observa la pérdida de otros óxidos, como los de Mg, Ca, Na y K, con porcentajes de 25.41, 10.935, 11.764 y 10.138 % respectivamente.

Tabla 2: Análisis químico de la arena sin tratamiento (AST) y la arena con tratamiento (ACT), valores representados en porcentaje en masa.

Componente	AST (%)	ACT (%)	P (%)
SiO ₂	71.838	75.075	--
TiO ₂	0.131	0.021	83.969
Al ₂ O ₃	14.411	14.896	--
Fe ₂ O _{3T}	2.595	0.225	91.329
MnO	0.059	0.011	81.356
MgO	0.122	0.091	25.410
CaO	1.701	1.515	10.935
Na ₂ O	5.007	4.418	11.764
K ₂ O	3.916	3.519	10.138
P ₂ O ₅	0.040	0.049	--
PxC*	0.18	0.18	NA*

PXC = Pérdida por Calcinación; NA = No Aplica

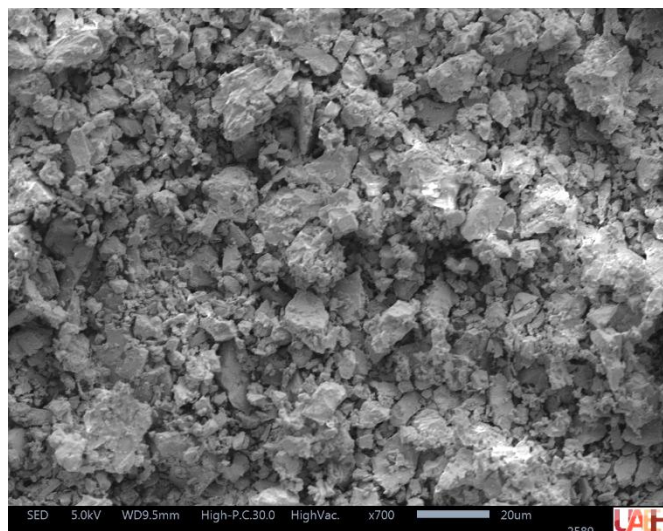


Figura 2. Imagen de MEB de los polvos de arena estudiada antes de la lixiviación ácida a presión (AST).

Los resultados señalan que los compuestos que contienen estos metales fueron disueltos durante el proceso de lixiviación. Nótese que se obtiene un compuesto con 89.971 % de Al₂O₃ y SiO₂, el cual concluye poseer una composición que puede ser adecuada para diversas industrias.

4.1.2. Determinación del índice de blancura

El índice de blancura es una característica óptica crucial tanto en la materia prima como en el producto final en la industria cerámica (Tarhan, 2019). Los datos revelan que la muestra sin tratamiento exhibe un índice de blancura más bajo de 51.3 y un tono grisáceo, mientras que la ACT presenta un índice de blancura de 77.3 %, teniendo un color más blanco. Estos resultados confirman la diferencia visual en blancura entre ambas muestras, lo que corrobora la pérdida de óxidos metálicos como el TiO₂, Fe₂O_{3T}, MnO, MgO, CaO, Na₂O y K₂O.

4.1.3. Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 2, se observan partículas de las rocas trituradas antes de ser sometidas al tratamiento de separación magnética y lixiviación. Se observa que las partículas presentan diferentes fracturas, irregulares, típico de algunos minerales duros como el vidrio volcánico.

Algunas superficies de las partículas presentan cierta porosidad, que puede atribuirse a granos o minerales que se unen entre sí, dejando espacios intergranulares. La distribución de tamaños de las partículas es desde aproximadamente un micrómetro hasta partículas de alrededor de 20 micrómetros.

4.1.3. Análisis cristalográfico

La muestra tratada mediante separación magnética y lixiviación ácida a presión con ácido clorhídrico (ACT) se presenta en la Figura 3. Al comparar el difractograma correspondiente a esta muestra (ACT) con el de la arena sin tratamiento (AST), se observa una disminución notable en la intensidad de tres señales de difracción (indicadas con flechas de doble punta) ubicadas en los ángulos 2θ de 26.0°, 22.7° y 29.4°, las cuales ya no se presentan o muestran un número significativamente menor de conteos tras el proceso de lixiviación. Esta disminución sugiere la disolución parcial o total de una fase cristalina correspondiente principalmente al ortopiroxeno.

Cabe destacar que se ha reportado en la literatura que el ortopiroxeno es susceptible a disolverse en ácido clorhídrico caliente, incluso a presión atmosférica (Jassen et al., 2011; Sarpong et al., 2023), lo que respalda la interpretación de estos resultados.

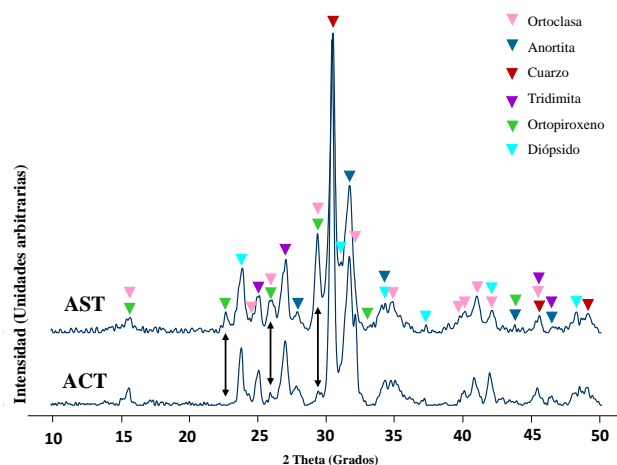


Figura 3. Identificación de las fases presentes en la arena con tratamiento (ACT) y sin tratamiento (AST).

En la tabla 3, se hace una recopilación de las fases cristalinas identificadas en la Fig 2, mediante el estudio cristalográfico. Se muestra la simbología, el nombre de la fase cristalina y su fórmula química. Nótese que los elementos que componen las fases cristalinas mencionadas concuerdan con los análisis químicos de los compuestos mayoritarios determinados por medio de FRX.

Tabla 3. Identificación del símbolo que representa cada fase cristalina, el nombre, el número de ficha PDF, y fórmula química.

Símbolo	Fase cristalina	Ficha PDF	Fórmula química
◀	Ortoclasa	96-900-0162	Si ₃ AlKO ₈
▶	Anortita	96-9200-0363	Al ₂ Si ₂ CaO ₈
◀	Cuarzo	96-9007379	SiO ₂
▶	Tridimita	96-901-3493	SiO ₂
◀	Ortopiroxeno	96-900-7017	Si _{1.848} Al _{0.236} Ca _{0.01} Fe _{0.967} Mg _{0.016} Mn _{0.016} O ₆
▶	Diópsido	96-900-4955	Si ₂ Ca _{0.7} Mg _{1.3} O ₆

4.2. Caracterización del polvo sinterizado a 1400 °C

4.2.3. Microscopía electrónica de barrido

La muestra de la primera ruta se adhirió al crisol de alúmina, y sufrió una fusión incipiente, por lo que no se caracterizó. Los polvos de la segunda ruta mezclados con polvo de Al(OH)₃/SiO₂ se muestran en la Figura 4 (ACTS). Estas partículas presentan una morfología irregular, con una fractura de tipo concoidea visible en la parte superior derecha de la imagen, característica de materiales vítreos.

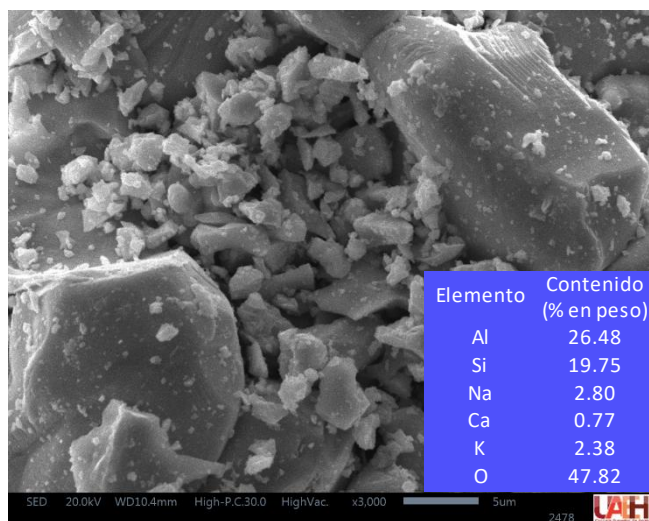


Figura 4. Imagen de MEB de la muestra ACTS, mezcla de polvos del cerámico obtenido después de la sinterización a 1400 °C.

El análisis químico realizado mediante EDS, en la superficie de las partículas más grandes (sinterizadas) se presenta en la Figura 4. Los elementos más prominentes son aluminio y silicio, seguidos de sodio, potasio y calcio. Estos resultados concuerdan con las fases cristalinas identificadas en el estudio cristalográfico y con la composición de los polvos utilizados inicialmente.

A partir de la imagen de la figura 4, se realizó un conteo del tamaño de las partículas con ayuda del software libre ImageJ. El tamaño promedio fue calculado de aproximadamente 1.649 micrómetros.

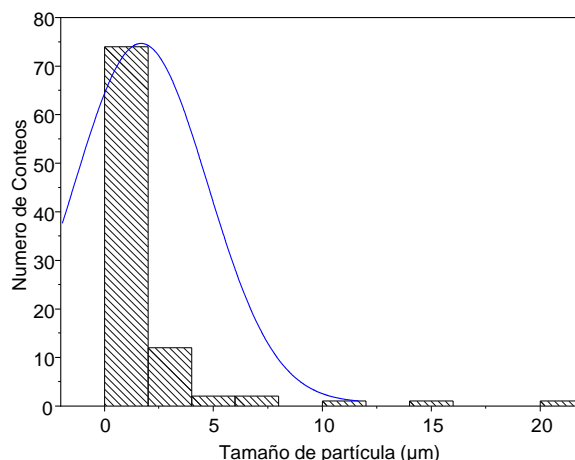


Figura 5. Histograma de distribución de tamaños de partícula de la muestra ACTS, cerámico obtenido después de la sinterización a 1400 °C.

Referente a la distribución de tamaños, se observan partículas que superan los 20 micrómetros debido a la sinterización reactiva a la que se sometieron los polvos. También hay una población de partículas más pequeñas alojadas sobre las más grandes, las cuales tienen dimensiones de alrededor de 1 a 3 micrómetros, como lo indica el histograma de distribución de tamaños de la figura 5.

4.2.4. Análisis cristalográfico

El difractograma que corresponde a la muestra de los polvos mezclados y sinterizados a 1400 °C se observa en la Figura 6. Se presentan señales de difracción típicas de un vidrio cerámico con una posible fracción amorfa en el material analizado. También se identifican las fases cristalinas mullita, andalucita, albita, y sílice, como se muestra en la Tabla 4.

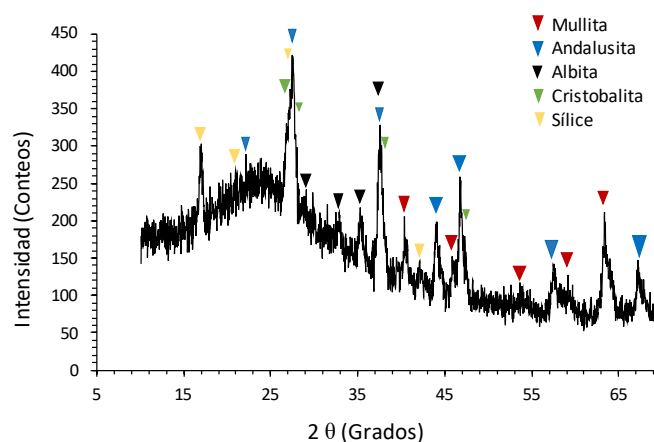


Figura 6. Identificación de las fases presentes de mezcla después de calentar a 1400 °C de arena de feldspatos procesada y mezclada con Al(OH)₃/SiO₂.






Nótese que las reflexiones en 2θ = 16.89°, 20.02°, 22.97°, 30.14°, 33.27°, ficha PDF 96-412-4049 la cual ha sido reportada en la literatura como característica de marcos tipo

zeolita (Foster et al., 2004). Sin embargo, en este estudio la presencia de un halo difuso en el patrón sugiere una fracción amorfa significativa, atribuible a la formación de vidrio aluminosilicatado. Por lo tanto, dicha reflexión puede explicarse tanto por orden de rango medio en la fase amorfa como por coincidencia parcial con marcos hipotéticos, sin que ello implique necesariamente la presencia de una fase zeolítica estable a 1400 °C.

Es bien sabido que la mullita y la sílica vítrea, son fases cristalinas que se obtiene a partir de la andalusita entre 1150 y 1600 °C, ambas fases son consideradas como materiales cerámicos refractarios (Pannhorst, 1978), (Li, 2017), (Scheinder & Majdič, 1979).

Las fases cristalinas encontradas son acordes con los análisis químicos realizados a polvos de partida mezclados, como en el material cerámico analizado por EDS presentado en la figura 4. De acuerdo al estudio termodinámico de un diagrama ternario Al_2O_3 - SiO_2 - K_2O , publicado por García-León, estas fases pueden estar asociadas. Incluso, el sodio de la albita puede estar sustituido por calcio y potasio, formando fases cristalinas como la anortita. (García-León, 2019).

Tabla 4. Identificación del símbolo que representa cada fase cristalina, el nombre, el número de ficha PDF, y fórmula química.

Símbolo	Fase cristalina	Ficha PDF	Fórmula química
	Mullita	96-900-1568	$Al_{2.25}Si_{0.75}O_{4.871}$
	Andalusita	96-900-0718	Al_2SiO_5
	Albita	96-900-0527	$AlNaSi_3O_8$
	Cristobalita	96-901-3428	SiO_2
	Sílice	96-900-7017	SiO_2

5. Conclusiones

Este trabajo demostró que, a partir de un material compuesto principalmente por ortoclasa, anortita, sílice y dióxido, es posible obtener una materia prima de alta pureza mediante separación magnética y lixiviación ácida a presión. El tratamiento permitió remover el 91.33 % del óxido de hierro total, lo que se reflejó en un índice de blancura de 77.3 y en una composición final cercana al 90 % en masa de sílice y alúmina.

Los resultados cristalográficos evidenciaron que la adición de polvo de $Al(OH)_3/SiO_2$ permitió la transformación de fases indeseables como el ortopiroxeno, generando un producto con propiedades adecuadas para su uso en la industria cerámica y del vidrio, donde minerales como ortoclasa, anortita y dióxido son comúnmente empleados (Morsi et al., 2001). Tras su sinterización a 1400 °C en mezcla con alúmina-sílice, el material mostró incremento en resistencia térmica, lo que lo posiciona como una alternativa viable en cerámica técnica.

En términos complementarios, el contenido de potasio y calcio de fases como ortoclasa y anortita sugiere posibles aplicaciones agrícolas, y el carácter abrasivo suave del polvo aluminosilicatos abre opciones en formulaciones de pastas dentales. No obstante, su mayor potencial se encuentra en el

aprovechamiento como materia prima sustentable para cerámicos estructurales, vidriados y técnicos.

En conjunto, los resultados confirman que el tratamiento propuesto representa una ruta efectiva para valorizar materiales de bajo costo, ofreciendo un insumo competitivo para industrias de alto valor agregado.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Geología de la UNAM, de la sección de FRX por su apoyo para analizar las muestras por análisis químicos.

Referencias

- Alexander, M., Mindess, S., (2005). *Aggregates in concrete*. Taylor & Francis, London and New York.
- Bommisetty, J., Keertan, T. S., Ravitheja, A., Mahendra, K., (2019). Effect of waste ceramic tiles as a partial replacement of aggregates in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 19, 875-877.
DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.230
- Burat, F., Kokkilic, O., Kangal, O., Gurkan, V., Celik, M. S., (2007). Quartz-feldspar separation for the glass and ceramics industries. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 24, 75-80.
DOI: 10.1007/BF03403362
- Campos-M, M., Campos-C, R., (2017). Applications of quartering method in soils and foods. *Int. J. Eng. Res. Appl*, 7(1), 35-39.
DOI: 10.9790/9622-0701023539
- Ferreira-Cuellar, D. A., Torres-López, K. M., (2014). Caracterización física de agregados pétreos para concretos, caso: Vista Hermosa (Mosquera) y mina Cemex (Apulo).
- García-León, R. A., Solano, E. F., & Rodríguez-Castilla, M. (2019, November). Ternary diagrams SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O as tool for the analysis of ceramic materials behavior. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1388, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Gaied, M. E., Gallala, W., (2015). Beneficiation of feldspar ore for application in the ceramic industry: Influence of composition on the physical characteristics. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(2), 186-190.
DOI: 10.1016/j.arabjc.2011.04.011
- Green, N. L., Usdansky, S. I., (1986). Ternary-feldspar mixing relations and thermobarometry. *American Mineralogist*, 71(9-10), 1100-1108.
DOI: 10.1007/s00410-009-0480-8
- Gulgonul, I., Çelik, M. S., (2018). Understanding the flotation separation of Na and K feldspars in the presence of KCl through ion exchange and ion adsorption. *Minerals Engineering*, 129, 41-46.
DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.038
- Hacifazlioglu, H., Kursun, I., Terzi, M., (2012). Beneficiation of low-grade feldspar ore using cyclojet flotation cell, conventional cell and magnetic separator. *Physicochemical problems of mineral processing*, 48(2), 381-392.
DOI: 10.5277/ppmp120205
- Herrera-Pérez, J. G., Legorreta-García, F., Reyes-Pérez, M., Chávez-Urbiola, E. A., Reyes-Cruz, V. E., (2021). Análisis de partículas magnéticas provenientes de desechos mineros. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9 (Especial 2), 97-104.
DOI: 10.29057/icbi.v9iEspecial2.7972
- Ibarra-Cruz, L. E., Legorreta-García, F., Juárez-Tapia, J. C., Cobos-Murcia, J. Ángel, & Rosario-Olguin, Y. (2024). Bohemita de tamaño micrométrico obtenida a partir de desechos urbanos. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 11(22), 138-143.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11026>
- Janssen, A., Putnis, A., (2011). Processes of oxidation and HCl-leaching of Tellnes ilmenite. *Hydrometallurgy*, 109(3-4), 194-201
DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.07.004
- Karakas, A., (2020). MR Smith and L. Collis (eds): *Aggregates: sand, gravel, and crushed rock aggregates for construction purposes*.
- Li, B., He, M., & Wang, H. (2017). Phase transformation of andalusite-mullite and its roles in the microstructure and sinterability of refractory ceramic. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 3188-3192.
- Liu, Y., Peng, H., Hu, M., (2013). Removing iron by magnetic separation from a potash feldspar ore. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 28(2), 362-366.
DOI: 10.1007/s11595-013-0696-3
- Maiza, P. J., Marfil S. A., (2010). Las rocas como materiales para hormigón. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* N° 24, 01-11.

- Morsi, M. M., Khater, G. A., Range, K. J., (2001). Glass ceramics in the system diopside–anorthite–orthoclase prepared by using some industrial waste materials. *Glass technology*, 42(6), 160-164.
- Moura, L. C., André, F. P., Miceli, H., Neumann, R., Tavares, L. M., (2019). Manufactured feldspar-quartz sand for glass industry from gneiss quarry rock fines using dry rare-earth magnetic separation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(5), 333-343.
DOI: 10.1080/08827508.2019.1643341
- Pannhorst, W., & Schneider, H. (1978). The high-temperature transformation of andalusite (Al_2SiO_5) into 3/2-mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) and vitreous silica (SiO_2). *Mineralogical Magazine*, 42(322), 195-198.
- Ray, S., Haque, M., Sakib, M. N., Mita, A. F., Rahman, M. M., Tanmoy, B. B., (2021). Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 43, 102567.
DOI: 10.1016/j.job.2021.102567
- Ribbe, P. H. (Ed.), (2018). *Feldspar mineralogy (Vol. 2)*. Walter de Gruyter GmbH & Co, KG.
- Salimkhani, H., Joodi, T., Bordbar-Khiabani, A., Dizaji, A. M., Abdolalipour, B., Azizi, A., (2020). Surface and structure characteristics of commercial K-Feldspar powders: Effects of temperature and leaching media. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(1), 307-317.
DOI: 10.1016/j.cjche.2018.11.016
- Sarpong, B., Watson, M. J., Scott, A., (2023) Reactivity of Magnesium Silicate Minerals in Hydrochloric Acid.
DOI: 10.2139/ssrn.4374475
- Secretaría de Economía., (2022). Unidad de Coordinación de Actividades Extractivas. Perfil del Mercado del Feldespato. Recuperado el 20 de agosto de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692308/8_Perfil_Feldespato_2021__T_.pdf
- Schneider, H., & Majdič, A. (1985). Kinetics and mechanism of the solid-state high-temperature transformation of andalusite (Al_2SiO_5) into 3/2-mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) and silica (SiO_2). *Ceramics International*, 11(4), 137.
- Silva, A. C., Carolina, S. D., Sousa, D. N., Silva, E. M. S., (2019). Feldspar production from dimension stone tailings for application in the ceramic industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1-7.
DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.02.011
- Smith, M. R., Collis, L., (2001). *Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. Geological Society, London.
DOI: 10.1144/GSL.ENG.2001.017
- Tarhan, M. (2019). Whiteness improvement of porcelain tiles incorporated with anorthite and diopside phases. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 929-936.
- Vapur, H., Top, S., Demirci, S., (2017). Purification of feldspar from colored impurities using organic acids. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53.
DOI: 10.5277/ppmp170112
- Zhang, Y., Hu, Y., Sun, N., Liu, R., Wang, Z., Wang, L., Sun, W., (2018). Systematic review of feldspar beneficiation and its comprehensive application. *Minerals Engineering*, 128, 141-152.
DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.043