

Síntesis De Nanocompósitos Cerámicos-NTC a Partir De Desechos Mineros Synthesis of Ceramic Nanocomposites-NTC from Mining Waste

M. A. Fosado-Cruz  ; D. L. Vázquez-Martínez , J.L. Henkel-García *, F. Legorreta-García ,
J. A. Cobos-Murcia , M. A. Paqui-Lima

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

Resumen

En esta investigación, se buscan alternativas para el uso de los desechos mineros acumulados en el municipio de Mineral de la Reforma Hidalgo, México. El estudio presenta el manejo y tratamiento de estos desechos a fin incrementar el punto de fusión de los mismos, la obtención de una mezcla de fases $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ de pureza elevada y la síntesis de los nanocompósitos cerámicos-nanotubos de carbono multiparedes (NTCMP). El nanocompósito se prepara mediante clasificación por tamaños, lixiviación, mezcla con NTCMP y densificación en atmósfera de nitrógeno a 1400°C . Las muestras fueron analizadas por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, microscopía óptica, de barrido y de transmisión. Los resultados ponen en evidencia que los polvos lixiviados poseen una fase cerámica principalmente de $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ superior al 91% en masa; incremento del 43% del punto de fusión con respecto a los polvos originales, homogeneidad entre las partículas cerámicas - NTC y una densificación del nanocompósito de 88%.

Palabras clave:

Lixiviación, Compósito, Desechos mineros, Cerámica/NT.

Abstract

In this research, alternatives are sought for the use of accumulated mining waste in the city of Mineral de la Reforma, Hidalgo, Mexico. The study presents the management and treatment of these wastes in order to increase their melting point, the obtaining of a mixture of $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ phases of high purity and the synthesis of ceramic nanocomposites-multi-walled carbon nanotubes (NTCMP). The nanocomposite is prepared by size classification, leaching, mixing with NTCMP and densification under a nitrogen atmosphere at 1400°C . The samples were analyzed by X-ray diffraction, X-ray fluorescence, optical, scanning and transmission microscopy. The results show that the leached powders have a ceramic phase mainly of $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ greater than 91% by mass; 43% increase in the melting point with respect to the original powders, homogeneity between the ceramic particles - NTC and a densification of the nanocomposite of 88%.

Keywords:

Leaching, Composite, Mine waste, Ceramic / NTC.

Introducción

México se ubica entre los 10 principales productores de 16 minerales, destacando el oro en octavo lugar. En el año 2018, el producto interno bruto que aporta la minería es del 1.8% (Servicio Geológico Mexicano, 2018). En contraparte, la producción de metales genera la acumulación de material estéril, con poco contenido de metal económicamente viable que se va depositando en las llamadas presas de jales, que en muchos casos están localizadas en zonas urbanas (Gómez Bernal y colaboradores, 2010). Diversos estudios en todo el mundo se han realizado para determinar el grado de contaminación de estos desechos, detectándose varias zonas mineras, que pueden causar problemas de salud y eco-toxicológicas a mediano y largo plazo (Belmonte Serrato y colaboradores, 2010). Estos polvos, al ser almacenados en grandes superficies de terreno, son considerados fuentes de contaminación debido al contenido de metales pesados. Algunos

no disponen de diques de contención, por lo que pueden ser arrastrados por los cauces de erosión hídrica (Belmonte Serrato y colaboradores, 2010). Un caso específico se presenta los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma, cuyos desechos de material estéril procedentes de la obtención de oro y plata, han acumulado alrededor de 650 millones de metros cúbicos de polvos, permaneciendo a lado de cientos de casas habitación. Al respecto, los trabajos de Moreno-Tovar (Moreno Tovar, 2009) y Hernández-Acosta y colaboradores (Hernández Acosta, 2009), han realizado estudios al jal de mina de dos Carlos en la ciudad de Pachuca Hidalgo, los valores de pH fueron de neutros a ligeramente alcalinos, con contenidos de Cd que rebasaron a lo establecido por la NOM-021-RECNAT-2000, sin llegar a considerarse peligrosos. Una manera de acabar con el peligro amenazante de estos polvos es buscar alternativas para utilizarlos.

Autor para la correspondencia: jorge.henkel16@gmail.com

Correos electrónicos: profe_974@uaeh.edu.mx (Felipe Legorreta-García), fo346569@uaeh.edu.mx (Miguel Angel Fosado-Cruz), va360076@uaeh.edu.mx (Diana Laura Vázquez-Martínez), paquilima@outlook.com (Marco Antonio Paqui-Lima), jose_cobos@uaeh.edu.mx (José Angel Cobos-Murcia).

Fecha de recepción 02/09/2020 Fecha de aceptación: 03/11/2020 Fecha de publicación: 12/12/2020
<https://doi.org/10.29057/icbi.v8iEspecial.6323>



Hernández y colaboradores han realizado la caracterización de los jales de Pachuca a fin de buscar alternativas para su uso como material industrial. Los autores llegan a la conclusión que si es posible emplear los polvos como materiales para la construcción (Hernández y colaboradores, 2006). En general, los residuos de las minas de minerales metálicos y no metálicos son altamente utilizados cuando el contenido es $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ el superior al 85% en peso y con bajos contenidos de metales pesados, en estas condiciones químicas, pueden tener diversas aplicaciones. Por ejemplo, el estudio realizado por Zamora y colaboradores, trata de sintetizar zeolita a partir de jales mineros, con aplicación para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados (Zamora y colaboradores, 2017). Castro y colaboradores utilizaron los desechos de la mina de tungsteno conteniendo sílice y alúmina en un 88.7% en peso, para desarrollar materiales compuestos a base de polímeros para su aplicación en la restauración y diagonal o rehabilitación de monumentos históricos, esculturas, o para el uso de materia prima para revestimientos de la industria de la construcción de (Castro Gomes y colaboradores, 2011). En otro trabajo de investigación, los desechos del mineral de hierro o relaves, se utilizaron como aditivos en la industria cerámica desde 0 a un 5% en peso, y sinterizados 900 °C. Los resultados mostraron que la adición de este material es factible tanto técnica como ambientalmente, para la producción de cerámica roja (Naranjo y colaboradores, 2010). Otro tipo de desechos de minerales de Fe, se ha empleado para la fabricación de vidrio a partir de la mezcla de los residuos industriales de goethita (FeOOH) a 30-60%, dolomita y botellas de vidrio. La mezcla se realizó a partir de un molino de bolas para la homogenización de los tres materiales, se sinterizó a una temperatura de 1450 °C durante 30 min. Posteriormente se le realizó un tratamiento térmico de recocido a 500 °C durante 2 horas. Obtuvieron vidrios estables y con buenas propiedades mecánicas de un intervalo de 5-7 Gpa Hv y químicamente estables (Romero y colaboradores, 1997). En otro estudio, Longhi y colaboradores, evaluaron la viabilidad de utilizar un residuo de la industria minera como los lodos caoliníticos como materia prima para la producción de aglutinantes de geopolímeros. Utilizaron caolín tratado térmicamente a 750 °C durante una hora con el objetivo que obtener “metacaolín”, obtuvieron un geopolímero de 70 Mpa (Longhi y colaboradores, 2015). En las últimas dos décadas, la adición de nanotubos de carbono en matrices cerámicas ha sido ampliamente investigada debido a que los nanotubos le confieren a la matriz diferentes propiedades mecánicas, eléctricas, de adsorción y resistencia a la corrosión en ambientes fisiológicos; por ejemplo, en el trabajo de Gómez y colaboradores, sintetizaron nanotubos de carbono adicionados en una matriz de zirconia itria, de estructura cúbica y sinterizados a 1200°C (Gómez, 2018). Pegney y colaboradores, demuestran por microscopía electrónica de barrido, que los nanotubos de carbono en una matriz cerámica de MgO , consolidados por spark plasma sintering, detienen la propagación de las grietas, incrementan la dureza y tenacidad, le confiere propiedades eléctricas y disminuyen el tamaño de grano de la cerámica (Pegney y colaboradores, 2010). Con la finalidad de mejorar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable en ambientes fisiológicos, Álvarez y colaboradores, utilizaron probetas de acero inoxidable modificando la superficie con sílice, nanotubos de carbono dispersos y polvo de wollastonita, sintetizados por sol-gel a fin de someterlos en biorreactores in vitro. Se observó la formación de fases de apatita en la superficie y una mejora de la resistencia a la corrosión por picado, debido a

la presencia de los nanotubos de carbono (Álvarez, 2017). En otra investigación, Marattra Martínez adsorbió de los hidruros gaseosos de As y Sb sobre un sorbente sólido basado en nanotubos de carbono (NTC) funcionalizados, realizaron la oxidación de los NTC y la obtención de nanopartículas híbridas combinadas con dióxido de titanio (TiO_2) (Maratta Martínez, 2019). Vegas et al evaluaron la viabilidad técnica de fabricar un nuevo cemento ecoeficiente mezclado con desechos de minería provenientes de Lon España y carbón activado térmicamente; los resultados mostraron que la adición de carbón (hasta 20% de reemplazo) modificó las propiedades físicas y mecánicas de las matrices de cemento mezclado (Vegas y colaboradores, 2015). Un trabajo similar fue realizado por Zamorano y colaboradores. Utilizaron sílice ultra fina proveniente de cenizas volantes de plantas geotérmicas, para mezclarla con el cemento Portland, sustituyéndolo de 10 a 20%. Los autores determinan que un 20% de sílice genera grietas, por lo que conviene más adicionar 10% (Zamorano y colaboradores, 2009). Este trabajo de investigación, tiene como objetivo buscar alternativas para aplicar los polvos de los jales acumulados en las presas, tales como en la industria del vidrio, o bien la fabricación de nuevos materiales nanocompuestos nanotubos de carbono sílice alúmina, con propiedades de alta resistencia a la corrosión y alto punto de fusión. De esta manera se puede disminuir el problema de la contaminación ambiental derivado de estos polvos, y al mismo tiempo la creación de nuevos materiales de alta tecnología.

Metodología

Se realizó un muestreo aleatorio en diferentes puntos y altura de las presas de jales en los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma, Hidalgo. El material fue homogeneizado usando técnicas probabilísticas como cono cuarteo y cuarteador Jones, hasta obtener 4 muestras representativas de 10 Kg cada una. Una pequeña parte es separada para determinar el porcentaje de humedad secándola en una estufa a 100 °C durante 180 minutos. Posteriormente el material se introduce a un molino de bolas de alúmina de ¼ de diámetro al 10% de sólidos en masa y a 90 rpm durante una hora. El material pasa completamente por una malla no. 400 de la serie Tyler, obteniendo tamaños de 100% a – 38 µm. Después del proceso de molienda, se tomaron 50 g de material para agregarlo en 500 mL de una solución de 3M de ácido clorhídrico de la marca Aldrich. La reacción se llevó a cabo en un matraz balón de 1000 mL a una temperatura de solución de 90 °C. Después la suspensión se filtró con ayuda de vacío, de un matraz kitasato y un Embudo Büchner. El polvo se lavó con agua hasta llegar a un pH neutro. Una vez obtenidos los polvos de los jales lixiviados, lavados y secados, se realiza la síntesis de los nanocompuestos. Los nanotubos de carbono multiparedes, funcionalizados con carboxilo (Chengdu Organic Chemicals Co. Ltd.) son agregados con 5% en masa y son dispersados en agua desionizada aplicando sonicación de sonda durante 10 minutos. El polvo se adiciona lentamente hasta llegar a una relación solido-agua del 50% en masa, los polvos nanocompuestos se secaron a 75°C por 24 horas. La cantidad necesaria de polvos nanocompuestos compactaron en una prensa hidráulica a 9700 MPa. Se obtuvieron pastillas compactadas en verde, de 8 mm de diámetro y un centímetro de altura. Dichas pastillas se introdujeron en un horno horizontal con atmósfera de nitrógeno a 1400 °C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min, estabilidad a 1400°C de 0.5 horas y enfriamiento natural. La resistencia a la compresión de las pastillas se determinó con una prensa hidráulica convencional de laboratorio con medición de presión, aplicando 1000 psi por cada 5 minutos hasta su fractura.

Caracterización Densidad y microscopía óptica

La densidad de la arena seca, se determinó con un matraz de Le Chatelier. El matraz del Le Chatelier es un material de vidrio de laboratorio empleado para determinar la densidad. El procedimiento se realizó cinco veces y se calculó el promedio. Se calculó también la densidad geométrica de las pastillas sinterizadas a 1400°C. Con la finalidad de determinar la morfología, color y confirmar el tamaño promedio de cada muestra, se empleó un Microscopio de tipo óptico USB de la marca Comet.

Análisis químico por fluorescencia de rayos X (FRX)

En la determinación de la composición química de las muestras, se analizaron por fluorescencia de rayos X. Se utilizó un espectrómetro marca RIGAKU ZSX Primus II operado en vacío. La preparación de la muestra consiste en la fusión de 0.8 gramos de muestra y 7.2 gramos de fundente constituido por $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_7$ y LiBO_2 granular grado ultra puro en relación 1:1. Se irradió con una fuente de Rh empleando los cristales LiF200, Ge111 y T1AP, la calibración del equipo se realizó con diferentes óxidos minerales de composición conocida.

Estudio cristalográfico X (DRX)

La identificación de las fases cristalinas se realizó mediante la técnica de difracción de rayos X a temperatura ambiente, los materiales se analizaron con un difractorómetro marca INEL modelo Equinox 2000, el rango de 2 theta se ejecutó de 5–100°, la fuente de irradiación fue de Co $\text{K}\alpha_1$ ($\lambda=1.789010 \text{ \AA}$), con un detector curvo, 30 mA de corriente y un voltaje de 25 kV. Los patrones de difracción de rayos X se indexaron con el programa Match.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se efectúa un estudio de la morfología, tamaño y relieve de las muestras analizadas por medio de la microscopía electrónica de barrido (MEB), las muestras fueron depositaron sobre una cinta de grafito adherida a un porta muestras de cobre, posteriormente se deposita oro ionizado para analizar en el microscopio electrónico de barrido de alta resolución marca JEOL modelo JSM-IT300, con una distancia de trabajo de 9 mm y una aceleración de voltaje de 25 kV, equipado con un detector de energía retro dispersiva de rayos X (EDS).

Microscopía Electrónica de Transmisión (MET)

Se realiza un estudio de los polvos nanocompuestos por medio de microscopía electrónica de transmisión con un microscopio marca JEOL (modelo JEM 2100) trabajando a 120 kV. Las muestras se prepararon depositando una suspensión sobre rejillas de cobre recubiertas de carbono y se secaron a 90°C durante 8 h, las mediciones de los tamaños se realizaron directamente sobre las imágenes.

Resultados y discusión

Estudio de análisis químico

En la Tabla 1, se presenta la composición química del material en polvo, así como el material lixiviado. Se presenta una alta concentración de aluminio y silicio en forma de óxidos, los cuales aumentan considerablemente con la lixiviación, mientras que las concentraciones principalmente de hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), titanio (Ti) disminuyen.

Tabla 1. Resultados de los análisis químicos por Fluorescencia de Rayos X (FRX), representados en porcentaje en peso.

Compuesto	Polvo sin lixiviar (%)	Polvo lixiviado (%)
SiO_2	65.6	76.10
TiO_2	0.459	0.386
Al_2O_3	10.5	15.80
Fe_2O_3	5.63	0.779
MnO	1.05	0.059
MgO	1.28	0.111
CaO	4.27	0.215
Na_2O	ND	0.133
K_2O	4.45	3.51
P_2O_5	0.143	0.015
SO_3	3.48	1.00
Cl	0.019	ND
Pérdida por calcinación	1.89	1.89
TOTAL	99.98	99.998

ND=No Detectado

Esto indica la remoción de estos metales con la lixiviación con HCl. El contenido de potasio no disminuye en la misma proporción de los demás elementos metálicos, esto se puede explicar sobre la base del trabajo reportado por Nixon y colaboradores, quienes demuestran que los iones potasio están dentro de la estructura de la microlina. Los iones de calcio y sodio se encuentran más disponibles para su lixiviación, en cambio, para el eliminar los iones de potasio se deben eliminar total o parcialmente las capas externas de los tetraedros de la sílice o alúmina (Nixon y colaboradores, 1979). También puede apreciarse que en la muestra de polvo lixiviado aparece un porcentaje de Na_2O que no se encontraba en la muestra base y esto se le puede atribuir a la etapa de neutralización hasta pH 7 donde se utilizó agua. El cloro es determinado por FRX, se encuentra en sales a muy bajas concentraciones.

Tabla 2. Resultados de los análisis de micro elemental por espectroscopia de rayos x de energía dispersa (EDS), representados en porcentaje en peso.

Elemento	O	Al	Si	Ti	Fe	Cu
% en masa	51.84	6.60	39.85	0.16	0.23	1.22

Con este análisis se demuestra que el silicio predomina por sobre otros elementos además del oxígeno el cual forma los óxidos, por lo que sustenta claramente los resultados de FRX.

Estudio de Microscopía óptica digital.

Las imágenes de microscopía se obtuvieron mediante microscopio óptico digital modelo Kkmoon con aumento de hasta 1600x y cable USB para conectar a una computadora personal (CP). Las condiciones de obtención de las imágenes fueron a temperatura ambiente sin ningún aditivo extra para su obtención. El polvo se coloca sobre una superficie plana y el lente del microscopio se sitúa sobre la muestra, se enfoca y se obtiene la imagen, la cual es capturada en la PC.

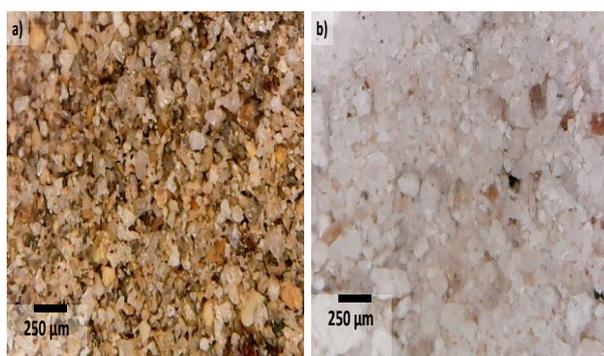


Figura 1. Imágenes de a) una muestra de los polvos de las presas de jales procesados antes de lixiviarse y la b) polvos después de la lixiviación.

En la Figura 1, se observa en a) la imagen de los polvos tal y como vienen de la presa de jales y la b) Partículas de los polvos después de la lixiviación. Se observa claramente el cambio de tonalidad ya que se han removido parte de las impurezas. Haciendo un análisis detallado de las partículas lixiviadas, se aprecian partículas con dimensiones que oscilan de 100 µm hasta 300 µm aproximadamente. También se logran observar dos grupos de partículas opacas y con brillo metálico. En el primer grupo, las partículas poseen un tono cristalino transparente que podría tratarse de cuarzo (SiO_2) o de cuarzo-alúmina. Así mismo, se observan partículas de un color blanco que podrían tratarse de aluminosilicatos. En este mismo grupo se encuentra otro tipo de partículas de un tono rosa que podría tratarse de minerales de potasio derivados de feldespato potásico.

Finalmente, para estos grupos se observan café rojizo que puede asociarse a óxidos de hierro como la hematita (Fe_2O_3). Así como óxido de hierro como la magnetita (Fe_3O_4). En el segundo grupo se observan partículas con brillo metálico. En una pequeña población se observan otras partículas metálicas con forma esférica asociadas a sulfuros de Zn, Fe, Ag. Las partículas tienen ese aspecto esferoidal debido a los procesos de obtención durante el beneficio de los metales de interés que pudo haber llevado, métodos como molienda o atrición, dichos métodos se sabe que se obtienen partículas de carácter esferoidal, también se puede atribuir que en otros trabajos se reportan partículas irregulares debido al tipo de materiales presentes, los cuales también pueden influir en ese aspecto.

Estudio cristalográfico

En la Figura 2, se presentan los patrones de difracción con el propósito de identificar las fases cristalinas y algunos de los

minerales presentes en el material. No se observan cambios significativos a excepción de unos cuantos picos de difracción que representan los metales lixiviados principalmente el Fe. En ambos casos el componente principal es cuarzo (SiO_2) y la microlina (KAlO_8Si_3) que se presenta en menor cantidad. Este tipo de materiales son muy resistentes a ataques químicos como en el caso de la lixiviación en comparación con la mayoría de los metales contenidos en los jales, todo esto lo sabemos gracias al trabajo de Nixon y colaboradores que reporta que el potasio contenido en el aluminosilicato no reacciona con los agentes químicos ácidos (Nixon y colaboradores, 1979).

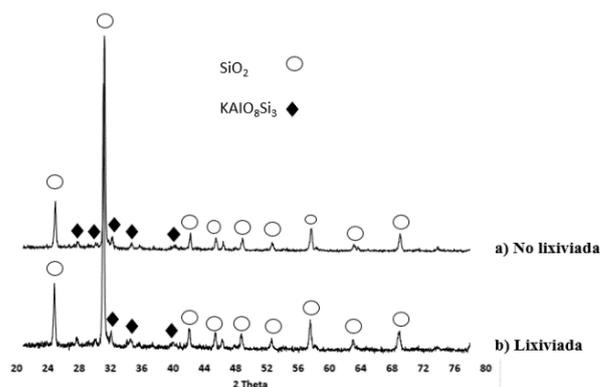


Figura 2. Comparación e indexación de los patrones de Difracción de Rayos X (DRX) entre una muestra a) antes de ser lixiviada y b) una ya lixiviada.

Como se puede observar no hay diferencias significativas entre los dos difractogramas ya que apuntan a materiales similares. No obstante, en el difractograma se aprecia que hay un crecimiento que identifican al óxido de silicio (SiO_2) lo que podría ser un indicativo de la limpieza del mismo, es decir se remueven las impurezas contenidas, que son las arcillas y los metales contenidos en los minerales de inicio. Las condiciones ácidas del ambiente y la temperatura hacen que los metales se disuelvan obteniendo el Ca^{2+} , Ti^{4+} , Fe^{3+} , etc.

El análisis químico por Fluorescencia de Rayos X (FRX), en la Tabla 1, indica la composición entre estas dos muestras.

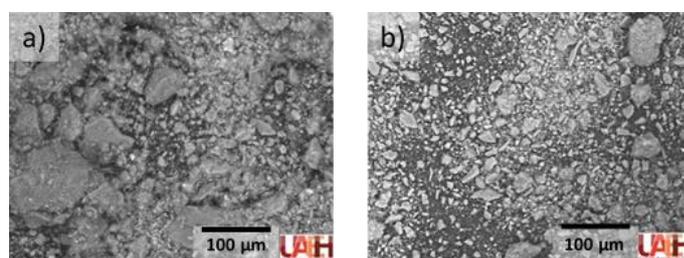


Figura 3. Imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de los polvos de las presas de jales de a) Tal cual como vienen de las presas y b) Polvos finos procesados antes de lixiviar.

En la Figura 3, se presenta una imagen conseguida mediante microscopía electrónica de barrido a los jales denominados de a) Tal cual como vienen de las presas y b) Polvos finos procesados justo antes de lixiviar. Ambas imágenes presentan partículas amorfas y aciculares. En la bibliografía consultada se encuentra evidencia de que la forma de las partículas es dada por el

procesamiento del material en la mina y por las condiciones en la extracción de la presa de jales, por lo que podemos atribuir la morfología cuasi esférica a tratamientos de atrición y molienda, debido a que existe un choque entre partículas. (Wills, 1987)

La distribución de tamaños para las partículas de los polvos de las presas de jales, oscilan desde 1 μm hasta los 120 μm , sin embargo, en la imagen de las partículas procesadas se observan con tamaños inferiores a los 40 μm con algunos aglomerados (parte superior derecha) constituidos de partículas finas.

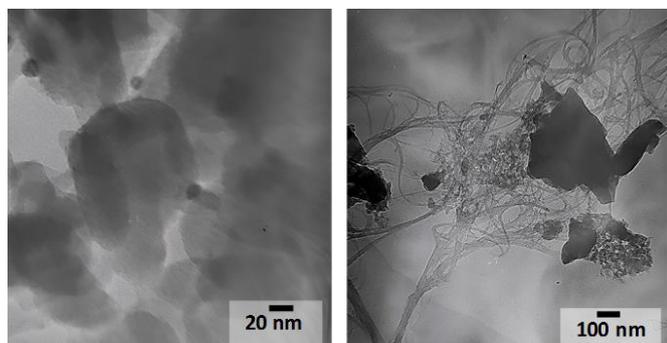


Figura 4. Imágenes de Microscopía Electrónica de transmisión de los polvos de las presas de jales de a) Polvos finos procesados lixiviados. b) Polvos nanocompuestos con 5% en masa de nanotubos de carbono multiparedes.

Pruebas de fusión

Para realizar las pruebas de fusión, los polvos tal y como vienen de la presa de jales y aquellos después de haber sido lixiviados, se sometieron a la reactividad térmica a diferentes temperaturas (700, 800, 900 y 1000°C). Los resultados demuestran que los polvos tal y como vienen de la presa de jales se funden a una temperatura inferior a los 800 °C, sin embargo, los polvos nanocompuestos después de haber sido lixiviados se conservan sin modificación aparente. Esto significa un incremento del punto de fusión de los polvos del orden de 43%.

El estudio por microscopía electrónica de transmisión se muestra en la Figura 4. En el inciso a se observan partículas de tamaño nanométrico que oscilan entre los 10 y los 240 nanómetros, e incluso puede haber partículas más grandes. Mientras que en el inciso b se observan los nanocompuestos con nanotubos de carbono y partículas de sílice.

Los nanotubos de carbono se presentan enredados sin embargo algunas partículas están adheridas a los mismos, cuyos tamaños son del orden de las 50 a los 200 nm.

Resistencia a la compresión

La densidad de los polvos fue de 2.0 g/cc y la volumétrica de las pastillas fue de 1.76 g/cc. Esto significa que se logró únicamente una densificación del 88%. Las pérdidas no significativas son debidas a la manipulación del proceso de análisis. La resistencia a la compresión de las pastillas de los nanocompuestos densos, fue realizada utilizando una prensa de laboratorio con medidor de presión. Los ensayos ponen en evidencia, una resistencia a la compresión de 65 +/-2 MPa. Estos resultados indican que el compuesto denso fabricado, posee un valor de resistencia a la compresión similar a la del vidrio sódico cálcico, el vidrio común que conocemos en la cotidianidad. Al contener nanotubos de carbono en su interior, permitiría utilizar estos materiales como candidatos para soportar fricciones; puesto que los nanotubos de carbono multiparedes al ser friccionado se convierte en hojas de grafito. En virtud de lo propuesto, se sugiere un estudio

complementario de resistencia al desgaste para evaluar lo anteriormente expuesto. (Terry y colaboradores, 2009).

Conclusiones

En este trabajo de investigación se pone en evidencia la fabricación con éxito de materiales densos nanocompuestos con material de desecho acumulado en las presas de jales. Los análisis químicos indican que los polvos al ser sometidos a un proceso de lixiviación, se liberan la mayor cantidad de metales que contiene, logrando obtener principalmente sílice y alúmina alcanzando 91.9 % en masa. Las pruebas de resistencia a la compresión presentada indican que los resultados obtenidos son similares a la resistencia de un vidrio común sin embargo, al poseer en el interior nanotubos de carbono estos materiales son candidatos para ser aplicados como materiales que puedan disminuir la resistencia a la fricción en seco.

Agradecimientos

Se agradece fehacientemente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, a la Unidad Central de Laboratorios por el espacio y los recursos aportados para la realización de este trabajo. Al Doctor Felipe Legorreta García por el completo apoyo y compromiso para el desarrollo de este proyecto, al igual que a todos los colaboradores por todo el trabajo realizado para impulsar este proyecto.

Referencias

- Servicio Geológico Mexicano (2018), Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2015, México, SGM.
- Gómez Bernal J. M., Santana-Carillo J., Romero-Martin F., Armienta-Hernández, M. A., Morton-Bermea A. & Ruiz-Huerta E. A. (2010). Plantas de sitios contaminados con desechos mineros en Taxco, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 131-133.
- Belmonte Serrato F., Romero Díaz A. & Moreno Brotóns J. (2010). Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la sierra minera de Cartagena-La unión (sureste de España). *Cuadernos de Turismo*, 25, 11-24.
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15, 2, 109-114.
- Moreno-Tovar, R., Barbanson, L., & Coreño-Alonso, O. (2009). Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, 25, 2, 31.
- Hernández, J., Rivera, I., Patiño, F., & Juárez, J. C. (2013). Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ - O_2 - Cu^{2+} Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos. *Información tecnológica*, 24, 1, 51-58.
DOI: 10.4067/S0718-07642013000100007
- Zamora, R. M. R. (2017). Síntesis de zeolitas a partir de jales de cobre para la remoción de metales y amonio presentes en agua. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 1, 68, 16 y 17, Ciudad de México, México.
- Castro-Gomes J.P, Silva A., Cano R., Durán Suárez J. & Albuquerque A. (2011, diciembre 13). Potential for reuse of tungsten mining waste-rock in technical-artistic value-added products. *Journal of Cleaner Production*, 25, 34-41. 2020, Julio 12, De ScienceDirect Base de datos.
DOI:10.1016/j.jclepro.2011.11.064
- Naranjo, T., & Isabel, O. (2010). Optimización del proceso de cocción en la producción de ladrillos de cerámica roja en el cantón Chambo (Bachelor's thesis).

- Gómez S. (2018). Materiales nanoestructurados de zirconia: Materiales densos y compositos con nanotubos de carbono (NTC). Tesis Doctoral. Universidad Nacional De La Plata, La Plata, Argentina.
- Peigney, A., Garcia, F. L., Estournes, C., Weibel, A., & Laurent, C. (2010). Toughening and hardening in double-walled carbon nanotube/nanostructured magnesia composites. *Carbon*, 48, 7, 1952-1960.
DOI: 10.1016/j.carbon.2010.01.063
- Alvarez Escobar, S. P. Recubrimientos vítreos silíceos con partículas bioactivas de wollastonita y nanotubos de carbono obtenidos por la técnica sol-gel y depositados sobre acero inoxidable 316L. Maestría tesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Romero M. & Rincón J. M. (1997). Obtención y caracterización de vidrios obtenidos a partir de residuos industriales de goethita (FeOOH). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36, 1, 39-46.
- Maratta S. (2019). Micropreconcentración y especiación de As y Sb empleando una aguja cargada con nanotubos de carbono en un sistema de microextracción en fase sólida (tesis doctoral). Universidad Nacional De San Luis
- Longhi A., Rodríguez E., Bernal S. & Provis J. (2015, diciembre 23). Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 115, 265-272. 2020, Julio 12.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.011
- Vegas I., Cano M., Arribas I., Frías M., & Rodríguez O. (2015). Physical-mechanical behavior of binary cements blended with thermally activated coal mining waste. *Construction and Building Materials*, 99, 169-174.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.189
- Zamorano, L. G., Escalante, J. I. (2009). Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultra fina. *Materiales de construcción*, 296, 5-16.
DOI: 10.3989/mc.2009.46108
- Nixon, R. A. (1979). Differences in incongruent weathering of plagioclase and microcline—Cation leaching versus precipitates. *Geology*, 74, 2, 21-224.
DOI:10.1130/00917613(1979)7<221:DIWOP>2.0.CO;2
- Klein, C., Cornelius, S., (1996). *Manual de Mineralogía*. Reverté, Barcelona, España.
Coordinación General de Economía, Dirección General de desarrollo Minero, Perfil de Mercado del Sílice, 13-19.
- G. F. Terry Lay & Maria C. Rockwell. (2009). Characteristics of silicate glasses derived from vitrification of manganese crust tailings. *Ceramics International*
DOI: 10.1016/j.ceramint.2008.10.035
- Wills, B. A., 1987. *Tecnología de Procesamientos de Minerales: tratamiento de menas y recuperación de minerales*. Editorial Limusa. Cornwall, Inglaterra,