

Desarrollo de un sistema de filtración utilizando materiales sinterizados como medios filtrantes

Development of a filtration system using sintered materials as a means of filtration

Desenvolvimento de um sistema de filtração, utilizando materiais sinterizados como meios filtrantes.

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Ramírez, Í. y Muñoz Prieto, E. (2016). Desarrollo de un sistema de filtración utilizando materiales sinterizados como medios filtrantes. *Ingenio Magno*, 7(2), 43-55.

Íngrid G. Ramírez-P.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación en
Desarrollo y Nuevos Materiales (DANUM)
ingridgisela.ramirez@uptc.edu.co

Efrén de Jesús Muñoz-Prieto

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación en
Desarrollo y Nuevos Materiales (DANUM)
efren.muñoz@uptc.edu.co

Fecha Recepción: 10 de febrero de 2016
Fecha de Aceptación: 11 de Mayo de 2016

Resumen

En Boyacá existen zonas rurales que no se benefician de agua potable; por esta razón, el objetivo de este estudio es elaborar un lecho filtrante para calidad de agua que pueda ser utilizado en estas comunidades y reducir el consumo y la exposición a contaminantes. Para ello, se emplearon materiales como zeolita, bentonita, caolinita y carbón activado, los cuales fueron sometidos a un proceso de secado a 110 °C durante seis horas; posteriormente, estos materiales se utilizaron para la elaboración de cuatro tratamientos en diferentes proporciones: 1) 5% de zeolita, 20% de Bentonita, 4,2% de caolinita y 0,8% de carbón activado; 2) 80% de zeolita, 15% de bentonita, 4,5% de caolinita y 0,5% de carbón activado; 3) 85% de zeolita, 10% de bentonita, 4,3% de caolín y 0,7% de carbón activado, y 4) 85% de zeolita, 10% de bentonita, 4,6% de caolinita y 0,4% de carbón activado. Para la elaboración de este lecho filtrante potencial en la reducción de contaminantes, se realizaron procedimientos de tamizaje utilizando mallas de 100, 270 y 400, se aplicó una fase sin molienda y otra con molienda y se usó la metodología de sinterización para la obtención del lecho filtrante hasta una temperatura de 1000°C. Estos procedimientos fueron evaluados mediante la técnica de análisis de porosidad por SEM; los resultados encontrados reportaron una disminución en la porosidad del material sinterizado, los cuales estuvieron sujetos a procedimientos previos realizados.

Palabras clave: zeolita, bentonita, caolinita, carbón activado, filtración, sinterizado.

Abstract

In the department of Boyacá there are rural areas which do not benefit from drinkable water, therefore the goal of the study is to create a filtering bed for water quality, with the aim of being used in these communities and reducing consumption and exposure to contaminants, in order to do so we used materials such as zeolite, bentonite, kaolinite and activated carbon which were submitted to a drying process at 110°C for six hours, afterwards they were used for the creation of four treatments of different proportions using as treatment one, 75% zeolite, 20% Bentonite, 4.2% kaolinite and 0.8% activated carbon, for treatment two, 80% zeolite, 15% bentonite, 4.5% kaolinite and 0.5% activated carbon, for treatment three, 85% zeolite, 10% bentonite, 4.3% kaolin and 0.7% activated carbon and for treatment four, 85% zeolite, 10% bentonite, 4.6% kaolinite and 0.4% activated carbon. For the creation of this filtering bed capable of reducing contaminants we performed sifting procedures using meshes of 100, 270 and 400, applying a phase without a mill and another phase with a mill using the sifting method to obtain the filtering bed up to a temperature of 1000°C. These procedures were evaluated with the Porosity Analysis by SEM technique, the obtained results showed a decrease in the porosity of the sintered material, which were subjected to previously performed procedures. The analyses of the treatments were performed randomly; in the phase without a mill we obtained a pore size of 6, 23 and 3.56, microns for treatments 2 and 3, respectively, in the phase with a mill 2.390 microns for treatment 2.

Keywords: zeolite, bentonite, kaolinite, activated carbon, filtration, sintering.

Resumo

No departamento de Boyacá, existem zonas rurais que não se beneficiam de água potável, por esta razão, o objetivo deste estudo é elaborar um leito filtrante para qualidade da água, com o objetivo de ser utilizado nas comunidades e reduzir o consumo e a exposição a poluente. Para isso, foram utilizados materiais como zeólita, bentonita,

caolinita e carvão ativado, os quais foram sujeitados a um processo de secagem a 110°C durante seis horas e, posteriormente, foram utilizados para a elaboração de quatro tratamentos em diferentes proporções, utilizando como tratamento número um, 75% de zeólita, 20% de bentonita, 4.2% de caolinita e 0.8% de carvão ativado; para o tratamento dois, 80% de saturação, 15% de bentonita, 4.5% de caolinita e 0.5 % de carvão ativado; para o tratamento três, 85% de zeólita, 10% de bentonita, 4.3% de caulim e 0.7% de carvão ativado e para o tratamento quatro, 85% de zeólita, 10% de bentonita, 4.6% de caolinita e 0,4% de carvão ativado. Para a elaboração deste leito filtrante potencial na redução de poluentes foram realizados procedimentos de triagem utilizando malhas de 100, 270 e 400; aplicando-se uma fase sem moagem e outra fase, com moagem, utilizando a metodologia de sinterização para obtenção do leito filtrante até uma temperatura de 1000°C. Os procedimentos foram avaliados através da técnica de Análise de Porosidade por SEM. Os resultados encontrados relataram uma diminuição na porosidade do material sinterizado, os quais foram sujeitos a procedimentos prévios realizados. As análises dos tratamentos foram realizadas de forma aleatória; na fase sem moagem obteve-se um tamanho de poro de 6, 23 e 3,56 , mm para os tratamentos 2 e 3, respectivamente, na fase de moagem 2,390 micron para o tratamento dois.

Palavras Chave: zeolita, bentonita, caolinita, carvão ativado, filtração, sinterizado.

1. Introducción

Se han realizado estudios sobre la aplicación de diversos sistemas de filtración en aguas y el uso de zeolitas, bentonitas y caolinitas como materiales removedores de impurezas. Nuevas investigaciones se centran en resinas de intercambio iónico, que tienen la capacidad de eliminar iones inorgánicos del agua. Choo, Lee y Choi (2005) han probado la efectividad de una membrana de ultrafiltración (UF) para el tratamiento de agua en lo relacionado con cantidades de hierro, manganeso y calidad microbiológica.

Como nuevas tecnologías, autores como Mecha y Pillay (2014) exploraron la combinación de las membranas tejido de fibra de microfiltración (WFMF) de tela con nanopartículas de plata (AGNPS), las cuales tuvieron un porcentaje de efectividad de 84% al 91% en membranas sin recubrimiento, y de 100% en membranas con recubrimiento.

En estudios relacionados con la remoción de color y durezas en muestras de agua para el consumo, particularmente Watson y Hornburg (1989) utilizan

nanomembranas como nuevas tecnologías competitivas para el tratamiento de aguas. Estas membranas proporcionaron una disminución entre el 90% y el 95% en trihalometanos, con 85% a 95% de dureza.

Con el fin de eliminar hierro y manganeso, y utilizando arena de sílice, Qin, Mah, Huang y Yang (2009) evaluaron dos filtros biológicos a escala piloto en un pozo perforado. Los filtros de arena de manganeso y de arena de sílice eliminaron de 3 mg/L a 6 mg/L de hierro, y entre 0,9 mg/L y 0,6 mg/L de manganeso, bajo las condiciones de operación (pH 7,2) y con tasa de flujo de 3,9 m/ h.

También se han funcionalizado filtros de 0,35 µm y 0,45 µm, los cuales fueron evaluados por Roccaro, Barone, Mancini y Vagliasindi (2007). Los autores encontraron niveles elevados de manganeso, los cuales reportaron concentraciones de 1,810 mg/L. La eliminación del manganeso fue significativa (hasta de 95%) por adición de polielectrolitos a pH 8,5, con una dosis de 0,5 estequiométrica de oxidante y el filtro de malla de 35 µm.

Otros investigadores, como Shafiquzzaman, Azam, Nakajima y Bari (2011), han evaluado un filtro de cerámica y determinado el porcentaje de remoción de hierro y de arsénico en aguas subterráneas de Bangladesh. La eficiencia dependió altamente de la concentración inicial de hierro y arsénico en las aguas subterráneas. Esto permitió que la oxidación del hierro aumentara en un 18%, mayor a la remoción de arsénico.

En otros estudios se han fabricado membranas de microfiltración, como la elaborada por Dong *et al.* (2006) a partir de múltiples capas de cerámica con superficies lisas y grietas libres, sobre soportes porosos tubulares, con recubrimiento por inmersión y utilizando materiales como la zeolita. Se realizaron análisis de difracción de rayos X y estudios de microscopía electrónica de barrido, los cuales indican que los sólidos en la membrana comenzaron en una sinterización a aproximadamente 850 °C con óxidos de metales alcalinos. Estos últimos obtuvieron capas intermedias con tamaño medio de poro en el intervalo de 0,69 a 1,10 µm, y la temperatura óptima de cocción fue de entre 850 y 950 °C por 1 h.

Otros tipos de filtros, como el filtro de bioarena (BSF), el filtro de cubo (BF), el filtro de vela de cerámica (CCF) y el filtro de recipiente poroso impregnado con plata (SIPP), son estudiados por Mwabi *et al.* (2011) en conjunto con la Universidad de Tshwane. En concreto, evaluaron la velocidad de flujo, los contaminantes fisicoquímicos (como turbidez, fluoruros, fosfatos, clorofila, magnesio, calcio y nitratos), los contaminantes microbianos (como *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhimurium* y *Shigella dysenteriae*) y el caudal.

Uno de los materiales que ha tenido un auge por sus propiedades son las zeolitas naturales, que actualmente son explotadas en diferentes áreas del mundo y presentan centenares de reportes aplicados en agricultura, acuicultura, industria, descontaminación

ambiental, materiales de construcción, medicina, veterinaria, productos para el hogar, etc.

Las zeolitas presentan propiedades físicas y químicas atractivas. Son de gran interés para la comunidad científica, principalmente porque existen en grandes yacimientos explotables y tienen gran aplicación en diferentes áreas de la industria, la tecnología agrícola y el control de la contaminación.

Hay (1966) explica que la presencia de zeolitas ocurre más comúnmente en depósitos marinos y de agua dulce. Se han realizado recopilaciones de diversos reportes de presencia de estos minerales, como el realizado por Deffeyes (1959), donde principalmente la zeolita, la analcima y la clinoptilolita se comparan y son evaluadas mediante análisis de difracción de rayos X.

Entre las diferentes aplicaciones de este mineral, se destaca la del trabajo de Li *et al.* (2011), que empleó una zeolita clinoptilolita natural como medio filtrante para eliminar el arsénico del agua. En este caso, los resultados mostraron que la eliminación de arsénico se logró después de la precipitación y se tuvieron capacidades de sorción sobre el precipitado: entre 48 mg/g y 68 mg/g, respectivamente. El pH óptimo para la máxima eliminación se encontró en un rango neutral: entre 6,5 y 9.

Estos minerales también han sido utilizados por otros investigadores como Mopoung, Sriprang y Namahot (2014) para preparar un material a base de zeolita, bentonita, carbón activado y caolinita, con el fin de realizar un lecho filtrante para calidad de agua. En este estudio, el material fue sinterizado a una temperatura de 1000 °C; se destaca el comportamiento del carbón activado con respecto a la porosidad, así como la temperatura de sinterizado óptima para este. Se observan tamaño de poros de 0,3 µm en los tratamientos finales, que son adecuados para el tratamiento de aguas potables.

El método de sinterización se ha utilizado también para la preparación de materiales porosos. Dabwan *et al.* (2008) utilizaron sedimentos del fondo del mar para la purificación del agua; así, se realizaron dragados y descargas de materiales que están compuestos fundamentalmente por material geológico inerte que presenta niveles de contaminación significativos. Los productos sinterizados fabricados a 400 °C presentaron características de adsorción muy eficaces para la eliminación de metales pesados.

Por su parte, Salem, Afshin y Behsaz (2012) han evaluado el comportamiento de la mezcla de zeolita comercial, bentonita y caolín para la eliminación de metales pesados, a través de la técnica de moldeado por extrusión en forma de anillo Raschig.

Los anillos de ensayo se calcinaron a 600 °C y 700 °C, después de secar en horno de laboratorio; se caracterizaron mediante la determinación de la porosidad, la resistencia a la compresión diametral y la capacidad de adsorción. El estudio determinó que la fuerza, la fiabilidad y la capacidad de sorción de anillo se pueden optimizar simultáneamente por la adición de 47,5% en peso de polvo de horno de cemento, 32,5% de zeolita y 20,0% de bentonita.

urkovi, Cerjan-Stefanovi y Filipan (1997) estudiaron materiales de filtración naturales como la zeolita clinoptilolita croata de la zona de Donje Jesenje y la arcilla de bentonita croata de la zona de Kutina. Estos materiales se utilizaron como materiales de filtración naturales para la eliminación de nitrógeno en forma de iones de amonio ($N-NH^+$), con soluciones acuosas utilizando arcilla natural y zeolita.

En este estudio se alcanzó el valor más alto para la eficiencia de eliminación de $N-NH^+$ (61,1% en peso). La eficiencia de eliminación de nitrógeno amoniacal es mayor para las arcillas en estado coloidal líquido en

comparación con las arcillas en un estado seco. Se ha encontrado que la modificación de ácido de la arcilla disminuye la eficiencia de eliminación de nitrógeno amoniacal.

En varios países de Latinoamérica se han realizado diversos estudios para la remoción de agentes contaminantes, principalmente en México. En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Petkova *et al.* (2011) evaluaron diversos minerales para la remoción de arsénico en aguas de consumo humano.

En un estudio similar, Rivera y Piña (2003) evalúan la remoción de arsénico de aguas de consumo en Ciudad de México. Los resultados de este estudio permiten concluir que el proceso de remoción por parte del hierro y el manganeso, a través de adsorción y oxidación sobre la zeolita natural, es capaz de eliminar el arsénico presente en el agua.

El proceso de eliminación de arsénico se logra, en primera medida, mediante coprecipitación con compuestos de hierro insolubles, que son retenidos físicamente en el lecho de zeolita, seguido de la adsorción de arsénico en los óxidos de manganeso que cubren la zeolita. Para el caso particular del agua en estudio, hasta 38% de arsénico se elimina a través de coprecipitación y filtración, mientras que 5% a 60% es retenido por adsorción.

De igual manera, Rivera y Piña (2005) realizan un estudio similar en el que emplean zeolitas naturales (clinoptilolita) como medio adsorbente, recubiertas con óxidos de hierro, con el fin de remover arsénico de aguas naturales. Los mejores resultados de remoción de arsénico fueron obtenidos con zeolitas acondicionadas mediante evaporación de soluciones de hierro en presencia del medio granular, en especial cuando se usan sales de hierro III.

Este método es capaz de fijar una capa de óxidos de hierro que modifica las características superficiales de la zeolita, al transformar su carga eléctrica superficial neta a valores positivos. Dicha característica favorece la adsorción de especies de arsénico (negativas) mediante interacciones electrostáticas.

Del análisis de la influencia de factores (pH, masa de zeolita y tiempo de contacto) en la eficiencia de remoción de arsénico sobresale el efecto que causa el cambio de pH. Valores de pH ácidos entre 5,5 y 6,5 producen las mayores eficiencias de tratamiento.

Dadas las características fisicoquímicas de zeolitas, bentonitas, caolinita y carbón activado, se busca realizar un filtro idóneo de diferentes concentraciones de los materiales nombrados, ya que, debido a sus propiedades de intercambio iónico, permiten reducir en el agua principalmente analitos como hierro y durezas. Se presenta la necesidad de aplicar nuevas estrategias en las comunidades rurales de Boyacá, con el fin de reducir el riesgo asociado a diferentes sustancias químicas, lo cual afecta la salud de la población en general.

2. Materiales y métodos

Se utilizaron como materias primas para la elaboración del lecho filtrante la zeolita clinoptilolita (Zeocol), la bentonita cálcica (Bentominerales), la caolinita (Disproalquimicos) y el carbón activado (Distríquimicos); estos se secaron en una estufa a 110°C por 6 horas. El proceso de tamizaje para la fase 1 consistió en una serie de tamices que comprendían malla de 100, 270, y 400. Este estudio siguió la metodología de Mopoung, Sriprang y Namahoot (2014) y se adaptó a las condiciones del Laboratorio de Materiales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

A. Fase 1 (sin molienda)

El material se trabajó sin proceso de reducción

de tamaño de partícula o molienda; se tamizó por medio de una malla 270 y luego se realizaron cuatro tratamientos de diferentes concentraciones de zeolita, bentonita, caolinita y carbón activado, de acuerdo con lo expuesto en la tabla 1. Estos materiales se adicionaron en un recipiente, se añadieron 70 mL de agua y se homogeneizó la mezcla hasta que se consideró que existía plasticidad. Posteriormente se rellenaron en los moldes de PVC de 5 cm de altura y 5,8 cm de diámetro. Este material filtrante fue secado por 24 horas a temperatura ambiente y luego se secó en estufa a 110 °C durante 3 horas y se sinterizó a una temperatura de 1000 °C en una mufla por 1 hora. Se debe tener en cuenta que el material se debe manejar con un tiempo de secado de 6 horas a 110 °C, dado que este tiende a aglomerarse y a adherirse a la superficie del material donde se esté trabajando.

B. Fase 2 (con molienda)

Se sigue la metodología anterior, pero con la diferencia que se hace un proceso de molienda por medio de un molino de bolas de acero inoxidable (Pulverisette 6) bajo 300 rpm y un tiempo de 20 min. Este proceso de molienda se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (Incitema) de la UPTC.

Tabla 1. Tratamientos utilizados para el lecho filtrante

Tratamiento	Zeolita	Bentonita	Caolinita	Carbón activado
1	75	20	4,2	0,8
2	80	15	4,5	0,5
3	85	10	4,3	0,7
4	85	10	4,6	0,9

C. Medición del porcentaje de contracción a 110°C

Se llevó a cabo la medición del porcentaje de contracción por secado según lo expuesto por De Sa, Benboudjema, Thiery y Sicard (2008); medición que es simplificada en la ecuación [1]:

$$(D_o - D_f) * 100 / D_o \quad [1]$$

Dónde D_o es el diámetro del cilindro del molde y D_f es el diámetro del material después de secado a 110°C

Medición del porcentaje de contracción a 1000 °C

Se llevó a cabo la medición del porcentaje de contracción por sinterización según la metodología de Rasmussen, Ngaji-Okumu, Boenke y O'Brien, simplificada en [2]:

$$D_o - \frac{D_f}{D_o} X 100 \quad [2]$$

Donde D_o es el diámetro del cilindro del molde y D_f es el diámetro del material después de secado a 1000 °C.

D. Medida del porcentaje de porosidad

La determinación de la porosidad se realizó determinando la densidad aparente y real de las muestras sinterizadas en [3]. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UPTC. [3]

E. Análisis de porosidad por microscopía electrónica de barrido (MEB)

El análisis morfológico se efectuó por medio de MEB, procedimiento realizado a los tratamientos 2 y 3 de la muestra sinterizada, que corresponde a la fase 1; esto con el fin de determinar el tamaño de poro y observar la morfología.

3. Resultados y discusión

A. Fase 1 (sin molienda)

Se realizó el proceso sin molienda con el fin de verificar las condiciones finales del tamaño del poro del material sinterizado y así tomar una decisión sobre las características del material.

En el proceso de tamizaje se encontró que la mayor cantidad de material atravesó la malla de 270; es decir, para mallas con tamaño de poro más pequeño, como 325 y 400, no hubo retención de este. Por esta razón, es necesario realizar la fase 2 (molienda), con el fin de desintegrar el grano y obtener un material ultrafino.

B. Porcentaje de contracción (secado)

El porcentaje de contracción por secado se muestra en la tabla 2. Allí se observa que estos son similares, si se tiene en cuenta que los tratamientos 3 y 4 difieren en las cantidades de caolinita y carbón activado.

Tabla 2. Porcentajes de contracción después de secado a 110 °C

Tratamiento	D_i (cm)	Porcentaje de secado
1	5,0	13,8
2	5,0	13,8
3	5,2	10,3
4	5,2	10,3

Las principales razones de este resultado son la alta resistencia mecánica de fase aglutinante bentonita (Chen, Ma, Shen y Zhang, 2011), que deriva de la plasticidad y una alta viscosidad, así como las condiciones de viscosidad de la bentonita cálcica cuando se suspende

en agua (Churchman *et al.*, 2002). También incide el volumen de poro de la zeolita (Park y Komarneni, 1997).

Tabla 3. Porcentaje de contracción después del sinterizado a 1000 °C

Tratamiento	Resultado (cm)	Porcentaje de contracción sinterizado
1	5,0	13,8
2	5,0	13,8
3	5,0	13,8
4	5,2	10,3

Con base en los resultados experimentales de la tabla 3, se expresaron los datos en porcentaje de contracción. Se puede observar que el proceso de sinterizado conduce al aumento de la contracción de cocción. La relación entre la composición de la materia prima y el porcentaje de la contracción se muestran también en esta tabla, donde se observa que no hay diferencia significativa en cuanto a la contracción, excepto en el tratamiento 4, en el cual es menor.

Esto indica que este proceso de sinterizado está determinado por las velocidades de calentamiento, la temperatura (que constituye la principal variable) y la fuerza impulsora, lo que favorece los mecanismos de transferencia de materia, como difusión superficial, difusión a través de la red cristalina y difusión a través de los bordes del grano, como la acción de fuerzas mecánicas (Shackelford, 2005). Por otra parte, el porcentaje de porosidad para todas las mezclas aumentó ligeramente, como la proporción de polvo de carbono (Chen *et al.*, 2011) y la cantidad de zeolita presente en el tratamiento.

C. Sinterizado

En la figura 1 se observa el material sinterizado de los diferentes tratamientos. Dado que no hay diferencia visible, es necesario la utilización de MEB teniendo en cuenta los diferentes factores que afectan los procesos de sinterizados, como la temperatura, la composición del material y las velocidades de calentamiento y enfriamiento.

En este proceso de sinterizado se puede observar en relación con el estado inicial, cuando el poro del material se encuentra en estado verde, que es una unión mecánica, donde los poros se encuentran abiertos, el material es frágil y su resistencia es baja. Posteriormente, en el proceso de sinterizado por acción de las fuerzas mecánicas, estos tienden a cerrarse (Shackelford, 2005).

Otros factores que afectan la muestra son los procesos de deshidroxilación en la zeolita (Hajjaji, Kacim y Boulmane, 2002) y el contenido de carbón activado que se utiliza (Zhang *et al.*, 2011). Además, las temperaturas utilizadas para el proceso de sinterización se basaron en los resultados reportados por Chen *et al.* (2011), donde se especifica que la temperatura adecuada para este proceso es de 1000 °C. Las reacciones de oxidación son dadas en estos procesos térmicos, pues el tamaño de poro final se da por estas temperaturas (Mwabi *et al.*, 2011).



Figura 1. Material sinterizado sometido a una temperatura de 1000 °C

D. Porosidad de los materiales obtenidos usando MEB

1) Iniciales

Con el fin de determinar el tamaño del poro del material, se realizaron dos ensayos en dos tratamientos

seleccionados al azar: los tratamientos 2 y 3 (véase la tabla 1). Las micrografías iniciales obtenidas a partir del material sin molienda fueron las siguientes, para el tratamiento 2: 80% de zeolita, 15% de bentonita, 4,5% de caolinita y 0,5% de carbón activado.

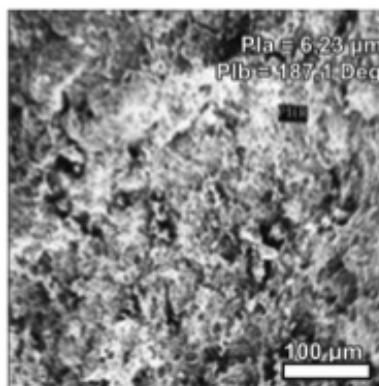


Figura 2. Micrografía del tratamiento 2 (80% de zeolita, 15% de bentonita, 4,5% de caolinita y 0,5 % de carbón activado)

Para la micrografía correspondiente al tratamiento 2 se observa un tamaño de poro mayor: 6,23 µm (figura 2), lo cual puede explicarse según lo reportado por Park y Komarneni (1997). Se determina que el espacio superficial se debe a las sales minerales que se encuentran en las cavidades de la zeolita. El tamaño

de poro y el área superficial están determinadas de acuerdo con la cantidad de carbón activado; por esta razón se observan unas cavidades más grandes en el material.

Para obtener un tamaño de poro más pequeño que se considere dentro de los niveles aptos para reducción de contaminantes, se deben realizar procedimientos (por ejemplo, moliendas) que reduzcan el tamaño del poro, tal como se observa en la micrografía realizada.

Para el tratamiento 3, correspondiente al porcentaje de zeolita de 85%, bentonita de 10%, caolinita de 4,3% y carbón activado de 0,7%, se observa que el tamaño de poro de la muestra es de 3,56 μm , lo cual concuerda con lo reportado por Park y Komarneni (1997) (figura 3).

Se determina que el gran tamaño de poro se da por la presencia de sales minerales que contienen la zeolita y el carbón activado. En consecuencia, fue necesario realizar nuevamente el procedimiento: someter el material a molienda con el fin de obtener un tamaño de poro más pequeño que permitiera la reducción de contaminantes y mejorara la calidad de una muestra de agua.

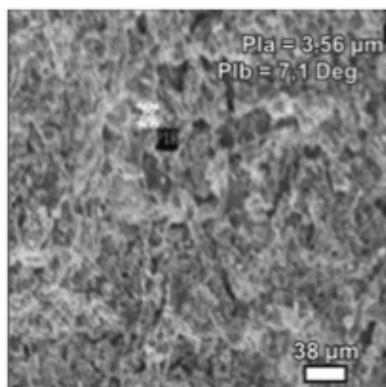


Figura 3. Micrografía del tratamiento 3 (85% de zeolita, 10% de bentonita, 4,3% de caolinita y 0,7% de carbón activado)

E. Fase 2 (molienda)

Se sigue la metodología anterior, pero con la diferencia de que se hace una reducción de partículas por medio de un molino de bolas de acero inoxidable (Pulverisette 6) a 350 rpm y un tiempo de 20 min. Los resultados obtenidos demuestran que el material se quedó retenido en su

gran proporción en la malla de 270, correspondiente a 53,3 μm , sin observar retención en las mallas de 325 y 400. Por ello, se considera necesario disminuir las condiciones de trabajo en cuanto a la velocidad de molienda y tiempo, con el fin de obtener un material de mayor finura, lo cual se relaciona principalmente con la velocidad crítica del equipo.

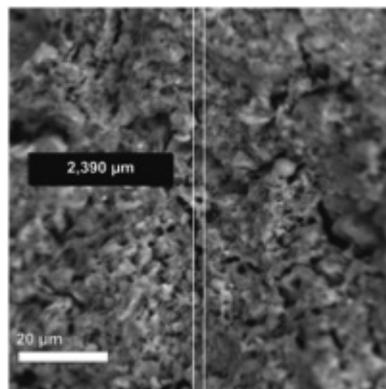


Figura 4. Micrografía del tratamiento 2 (80% de zeolita, 15% de bentonita, 45% de caolinita y 0,5% de carbón activado)

En la figura 4 se observa la micrografía del material del tratamiento 2, correspondiente a 80% de zeolita, 15% de bentonita, 45% de caolinita y 0,5% de carbón activado, sometido a proceso de molienda. Al aplicar la técnica MEB, se observó un tamaño de poro de 2,390 μm , lo que evidencia que el proceso de molienda disminuye el tamaño de partícula en comparación con la muestra trabajada inicialmente.

Igualmente, Alcántara (2005) señala que cuando se trabajan velocidades del molino bajas, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino, lo que favorece la producción de una molienda más fina. En cambio, a velocidades mayores se produce lo que se llama *caídas en catarata*, que ocasionan material más grueso.

El tamaño de bolas del molino fue seleccionado con el fin de crear un mayor aporte en el mecanismo de roce o desgaste, teniendo en cuenta el proceso de fractura de la partícula por impacto del molino de bolas Pulverisette 6. Igualmente, con ello se buscaba conseguir un tamaño de material de mayor finura, al considerar la velocidad crítica y una mayor eficiencia en la molienda.

IV. Conclusiones

Se hace evidente que el proceso de sinterización favorece la disminución del tamaño del poro en el lecho filtrante, con el fin de retener contaminantes en muestras de agua. Las condiciones de secado del material (6 horas a 110 °C) son de gran importancia: si no se trabaja bajo estas condiciones, se puede producir aglomeración del material y causar demoras en el proceso, debido a que el material tiende a adherirse a la superficie del material donde se está manipulando.

Es de gran importancia conocer las condiciones de molienda del material, por cuanto si se quiere obtener un material ultrafino (con menor tamaño de poro), el proceso se debe realizar de acuerdo con las velocidades de rotación lenta a 350 rpm por 20 min, para obtener el tamaño de poro adecuado.

Después del proceso de sinterización a 1000 °C, se obtuvo un porcentaje de contracción de 13,8% para los tratamientos 1, 2 y 3, y de 10,3% para el tratamiento 4. Además, como el material sinterizado de los diferentes tratamientos no presenta diferencia visible, se utilizó para su análisis la técnica MEB, en función de determinar el tamaño de poro del material sinterizado.

En la fase sin molienda se determinó el tamaño del poro del material en dos tratamientos seleccionados: 2 y 3, donde se obtuvo un tamaño de poro de 6,23 μm y 3,56 μm , respectivamente. Por su parte, en la fase de molienda se obtuvo un tamaño de 2,390 μm para el tratamiento 2.

Referencias

- Alcántara Valladares. J. R (2005). *Diseño práctico de un molino de bolas* (tesis de pregrado). Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Chen, F., Ma, L., Shen, Q. y Zhang, L. (2011). Pore structure control of starch processed silicon nitride porous ceramics with near-zero shrinkage. *Materials Letters*, 65, 1410-1412.
- Choo, K. H., Lee, H. y Choi, S. J. (2005). Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water treatment. *Journal of Membrane Science*, 267(1-2), 18-26.
- Churchman, G., Askary, M., Peter, P., Wright, M., Raven, M. y Self, P. (2002). Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite. *Applied Clay Science*, 20, 199-209.
- urkovi, L., Cerjan-Stefanovi, Š y Filipan T. (1997). Metal ion exchange by natural and modified zeolites. *Water Research*, 31(6), 1379-1382.
- Dabwan, A. H., Imai, D., Kaneco, S., Senmatsu, I., Nakahama, K., Katsumata, H. Suzuki, T. y Ohta, K. (2008). Water purification with sintered porous materials fabricated at 400°C from sea bottom sediments. *Journal of Environmental Sciences*, 20(2), 172-176.
- De Sa, C., Benboudjema, F., Thiery, M y Sicard, J. (2008). Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 947-956.
- Deffeyes, K. S. (1959). Zeolites in sedimentary rocks. *International Journal of Sediment Research*, 29(4), 602-609.

- Dong, Y., Chen, S., Zhang, X., Yang, J., Liu, X. y Meng, G. (2006). Fabrication and characterization of low cost tubular mineral-based ceramic membranes for micro-filtration from natural zeolite. *Journal of Membrane Science*, 281(1-2), 592-599.
- Hajjaji, M., Kacim, S. y Boulmane, M. (2002) Mineralogy and firing characteristics of a clay from the valley of Ourika (Morocco). *Applied Clay Science.*, 21, 203-212.
- Hay, R. L. (1996). Zeolites and zeolitic reactions in sedimentary rocks. *Geological Society of America (Journal/Seek)*, 85, 1-122.
- Li, Z., Jiang, W. T., Jean, J. S., Hong, H., Liao, L. y Lv, G. (2011). Combination of hydrous iron oxide precipitation with zeolite filtration to remove arsenic from contaminated water. *Desalination*, 280(1-3), 203-207.
- Mecha, C. A. y Pillay, V. L. (2014). Development and evaluation of woven fabric microfiltration membranes impregnated with silver nanoparticles for potable water treatment. *Journal of Membrane Science*, 458, 149-156.
- Mopoung, S., Sriprang, N. y Namahoot, J. (2014). Sintered filter materials with controlled porosity for water purification prepared from mixtures with optimal ratio of zeolite, bentonite, kaolinite, and charcoal. *Applied Clay Science*, 88-89, 123-128.
- Mwabi, J., Adeyemo, F., Mahlangu, T., Mamba, B., Brouckaert, B., Swartz, C., Offringa, G., Mpenyana-Monyatsi, L. y Momba. M (2011). Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1120-1128.
- Park, M. y Komarneni, S. (1997). Occlusion of KNO₃ and NH₄NO₃ in natural zeolites. *Zeolites*, 18(2-3), 171-175.
- Qin, S., Ma, F., Huang, P. y Yang, J. (2009). Fe (II) and Mn (II) removal from drilled well water: A case study from a biological treatment unit in Harbin. *Desalination*, 245(1-3), 183-193.
- Rasmussen, S. T., Ngaji-Okumu, W., Boenke, K. y O'Brien, W. (1997). Optimum particle size distribution for reduced sintering shrinkage of a dental porcelain. *Dental Materials*, 13(1), 43-50.
- Rivera, M. L. y Piña, M. (2003). *A pilot study for arsenic removal from water by adsorption in natural zeolite adsorption in presence of iron and manganese*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rivera, M. L. y Piña, M. (2005). *Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Roccaro, R., Barone, C. Mancini, G. y Vagliasindi, F. G. (2007). Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: a case study. *Desalination*, 210(1-3), 205-214.
- Salem, A. Afshin, A. y Behsaz, H. (2012). Removal of lead by using Raschig rings manufactured with mixture of cement kiln dust, zeolite and bentonite. *Journal of Hazardous Materials*, 223-224, 13-23.
- Shackerford, J. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Prentice Hall.
- Shafiquzzaman, M., Azam, M. S., Nakajima, J. y Bari, Q. H. (2011). Investigation of arsenic removal performance by a simple iron removal ceramic filter in rural households of Bangladesh. *Desalination*, 265(1-3), 60-66.
- Verginia, P., Rivera, M. L., Pila, M., Avilés, M. y Pérez, S. (2011). *Evaluación de diversos materiales para la*

remoción de arsenico. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Watson, B. M. y Hornburg, C. D. (1989). Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies. *Desalination*, 72(1-2), 11-22.

Zhang, Z., Qi, C., Wang, S. Liu, J. y Cao, J, H. (2011). A study on preparation of cordierite gradient pores porous ceramics from rectorite. *Solid State Sciences*, 13, 929-933.