

Adsorción y Desorción de Vapor de Agua mediante la utilización de las Zeolitas Naturales de la Provincia del Guayas

Armando Fredy Adriano Macas⁽¹⁾, Jorge Washington Duque Rivera⁽²⁾ Guillermo Enrique Soriano Idrovo⁽³⁾
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾
aadriano@espol.edu.ec⁽¹⁾, jduque@espol.edu.ec⁽²⁾, gsorian@espol.edu.ec⁽³⁾,

Resumen

El trabajo presente evalúa las zeolitas naturales del yacimiento Policía, cordillera Chongón-Colonche, como material desecante. Las muestras son caracterizadas mineralógicamente para identificar tipo de zeolita y detectar otras formas cristalinas. Los experimentos de absorción se realizaron a través de un filtro desecante desmontable para determinar la velocidad de difusión de agua en zeolitas para las siguientes granulometrías Tipo I (250-150µm), II (150-45 µm) y III (<45µm). La caracterización de la desorción se la realizó usando XRD, FTIR y TGA, calentando muestras a temperatura de 60°C por 24 y 48 horas. Los resultados de la caracterización mineralógica, mostraron contenidos de mordenita y clinoptilolita. Los resultados de absorción determinaron mayor velocidad de difusión en zeolitas Tipo III. Los resultados de desorción mostraron ligeras pérdida en el contenido agua sin cambio estructural. De los estudios realizados puede concluirse que las zeolitas Policía son capaces de realizar la deshumidificación, pero al calentar las zeolitas hay pérdida de agua sin cambio estructural, posiblemente por cambio en su porosidad. Se recomienda realizar estudios de activación química en las zeolitas Policía para determinar si es posible mejorar su capacidad de absorción.

Palabras claves: Zeolita Policía, adsorción, desorción, vapor de agua, difusión, calentamiento.

Abstract

The present work evaluates the use of natural zeolites from the Policía deposit, located at Chongón - Colonche mountain range, as a desiccant material. -Samples collected were mineralogically characterized in order to identify their crystalline structure. Absorption experiments were carried out using a removable desiccant filter to determine the diffusion speed of water in zeolites Type I (250-150µm), II (150-45µm) and III (<45µm). Samples were subject to a desorption test, by heating them up to 60 °C during 24 and 48 hours, and analysed using experimental techniques such as: X-ray diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared spectroscopy (FT-IR) and Thermogravimetry (TGA). Results showed the samples were mostly composed of mordenite and clinoptilolite. Additionally it was found that zeolites Type III exhibited the highest diffusion rate. Finally, the desorption results of FTIR showed slight loss of water content without structural changes. It can be concluded that zeolites from the Policía deposit are able to act as a desiccant, but heating the zeolites causes loss of water without structural change, possibly due to changes in its porosity. It is recommended to perform further studies about chemical activation on natural zeolites to determine the possibility of improving its absorption capacity..

Key words: Policía Zeolite, adsorption, desorption, vapour of water, diffusion, heating.

1. Introducción

Las zeolitas naturales son aluminosilicatos con una estructura que presenta cavidades en forma de canales y cajas que están ocupadas por moléculas de agua y cationes [1].

Una de las propiedades más importantes de algunas zeolitas es su capacidad de absorción reversible de vapor de agua, considerando esa propiedad y disponibilidad tenemos zeolitas como: clinoptilolita, chabazita y mordenita, que parecen tener gran potencial de absorción de agua [2].

Este mineral cristalino no es peligroso, ni tóxico y es amigable con el medio ambiente, puede controlar la humedad del aire con la incorporación o eliminación de vapor de agua (deshumidificación) [3]. A su vez, el material puede ser regenerado para absorber, un vez más, vapor de agua. Para el proceso de regeneración, el rango de temperatura utilizado están generalmente entre 54,4 y 148,9 °C [4]. Durante el proceso de desorción, generalmente se utiliza aire caliente como medio de calentamiento, se puede obtener aire caliente utilizando un colector solar, calentador eléctrico o a través de escape de calor de algunas industrias [5].

La tecnología de la deshumidificación es un factor muy importante en muchas industrias, procesos de manufactura, almacenamiento, transporte y conservación de gran variedad de productos. Este tipo de tecnología es reconocida como componente esencial para asegurar el ahorro de energía y productividad [6].

En el Ecuador, se han hecho muchos estudios sobre zeolitas naturales, todos ellos a cerca de yacimientos de zeolitas, características, propiedades y aplicaciones. Además, existen estudios sobre la utilización de las zeolitas naturales en aplicaciones agrícolas y pecuarias, para material de construcción, en la retención de algunos y compuestos orgánicos, entre otras.

En el yacimiento Policía se encontraron zeolitas tipo clinoptilolita y heulandita, con fase mayoritaria de clinoptilolita que tiene buena capacidad de intercambio catiónico [7]. Las zeolitas tipo clinoptilolita han sido probada como absorbente para llevar a cabo tareas de deshumidificación y enfriamiento [8]. Además, se han hecho estudios de aplicaciones de energía solar con zeolitas naturales [9]. Continuando con el estudio de este mineral, la presente investigación evalúa a las zeolitas naturales extraídas del yacimiento Policía (Guayaquil) como desecante para posibles aplicaciones en procesos de absorción y desorción.

Una vez realizado este trabajo de investigación, los análisis obtenidos nos permitirán evaluar las zeolitas Policía, y servirá como bases para futuras investigaciones como

material desecante para su desarrollo en procesos de deshumidificación.

1.1. Objetivo

Objetivo general, evaluar las zeolitas del yacimiento Policía como material desecante en procesos de absorción y desorción de vapor de agua. Objetivos específicos son: Caracterizar las rocas zeolitizadas extraídas del yacimiento, previo a los experimentos de absorción y desorción de vapor de agua. Determinar la velocidad de difusión de vapor de agua en zeolitas para diferentes granulometrías. Estudiar los efectos de la temperatura de calentamiento en zeolitas naturales.

2. Materiales y Metodología

2.1. Materiales

Zeolitas. Se usaron zeolitas naturales procedentes del yacimiento Policía, ciudad de Guayaquil, Provincia del Guayas. Las rocas zeolitizadas fueron trituradas por medio de un molino planetario, según especificaciones ASTM C136-06 y ASTM C117 [10,11]. El material triturado fue dividido en tres tipos de granulometrías: Tipo I (250-150 μm), Tipo II (150 - 45 μm) y Tipo III (<45 μm), para los respectivos experimentos.

2.2. Metodología

Se procedió de la siguiente manera:

Caracterización mineralógica del material recolectado. Para su correcta aplicación fue necesario conocer la estructura y composición del material zeolítico.

La caracterización mineralógica permite identificar los tipos de zeolitas, contenido de agua higroscópica y zeolítica e identifica los enlaces químicos involucrados en la estructura del material zeolítico. Para dicho propósito se emplearon las siguientes técnicas de caracterización: Difracción de rayos X (XRD), Termogravimetría (TGA), Calorimetría por barrido diferencial (DSC) y Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).

Experimentos de absorción de vapor de agua. Se aplica este experimento para determinar la velocidad de difusión para granulometría Tipo I, II y III. Conjuntamente se aplica la segunda ley de Fick para determinar el coeficiente de Difusión D_{AB} .

Antes de empezar con el experimento se procedió con la deshidratación de las muestras de zeolitas, para vaciar o remover el agua de los

El análisis XRD de las rocas zeolitizadas indican que el material contiene dos tipos de zeolitas: clinoptilolita – heulandita y mordenita, junto a otros minerales como cuarzo y montmorillonita. Dado que las zeolitas clinoptilolita – heulandita tienen estructuras parecidas, se realizó un tratamiento térmico a 450 °C a las muestras durante 12 horas [13]. A través de esta prueba se pudo reconocer la presencia de una de estas zeolitas. Al final del tratamiento se pudo determinar presencia mayoritaria de clinoptilolita, debido a que se encontró poca pérdida de cristalinidad del material.

La curva TGA - DSC de la muestra, figura 4, se puede observar la pérdida continua de agua hasta los 780 °C.

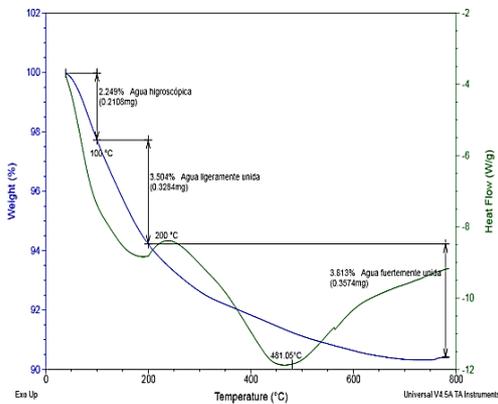


Figura 3. Curva TGA - DSC de la muestra recolectada

El rango comprendido entre 42 y 100 °C, representa la desorción de agua desde la superficie del grano de las muestras, también llamada agua higroscópica. La porción media de la curva, entre 100 y 200 °C, representa la desorción de agua ligeramente unida a la zeolita. A altas temperaturas, el segmento desde 200 a 780 °C, indica la desorción de agua fuertemente unida a la zeolita, en este caso representa la lenta desorción de agua del componente clinoptilolita, la misma que fue encontrada por Breger and Allieti [14].

En el espectro FTIR por transmitancia del material se muestra en la figura 4, en ella se puede observar las principales vibraciones moleculares presentes en el espectrograma del material.

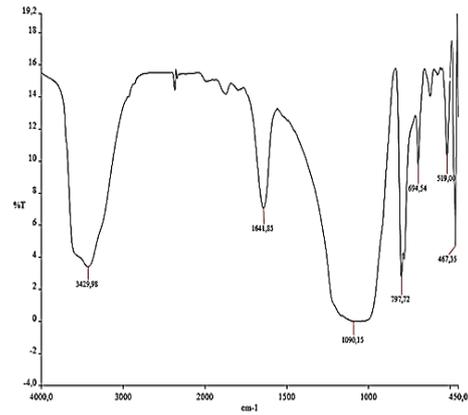


Figura 4. Espectrometría infrarroja de la muestra recolectada

A través de esta técnica se han hecho estudios del comportamiento de la deshidratación de las zeolitas, las variaciones espectrales observadas en zeolitas deshidratadas en un rango de 450 a 500 K, provoca pérdida de agua [15]. Los resultados FT-IR de la muestra recolectada son mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las principales vibraciones moleculares de la zeolita

Descripción de la vibración	Frecuencia ($1/cm$)
Deformación T-O	467
Tensión simétrica T-O	694,797
Tensión asimétrica T-O	1090
Deformación H ₂ O	1641
Unión de hidrógeno para iones de O	3429
Estiramiento OH	3611
Pseudo - lattice	519

T= Si ó Al

El FTIR de la muestra recolectada (fig. 4) muestran las vibraciones estructurales en una región de 400 - 4000 cm^{-1} . La vibración más fuerte en la banda deformación T-O aparece a 467 cm^{-1} , la intensidad de esta banda es independiente del grado de cristalinidad. A 1090 cm^{-1} aparece la vibración de tensión asimétrica T-O, esta banda es significativa para estimar el contenido de aluminio en la estructura cristalina [16]. Las siguientes vibraciones moleculares aparecen debido a la presencia de agua zeolita y son las que tienen mayor importancia en el estudio de deshidratación en zeolita: El estiramiento aislado OH aparece a 3611 cm^{-1} , es atribuido a la interacción de agua hidróxilo con los cationes. La vibración a 3429 cm^{-1} , es característica de doblamiento de hidrógeno OH para iones de oxígeno. Y la vibración a 1641 cm^{-1} , es propio del modo doblamiento de H₂O.

3.2. Ensayos de absorción

Los resultados de absorción de vapor de agua por los testigos de humedad respecto al tiempo, para zeolitas de granulometría Tipo I, II y III son mostradas en las figuras 5, 6 y 7, respectivamente.

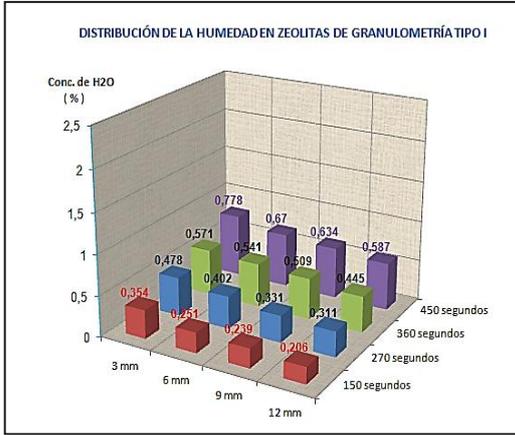


Figura 5. Porcentaje de humedad absorbida por las zeolitas de granulometría Tipo I.

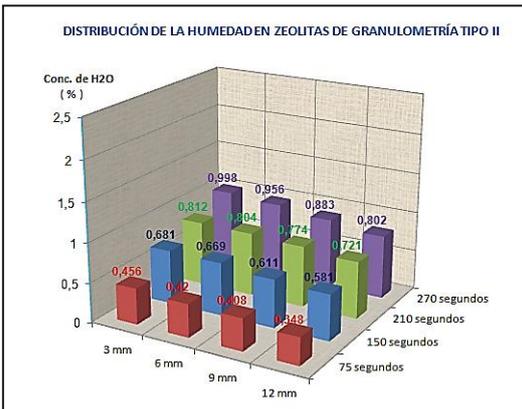


Figura 6. Porcentaje de humedad absorbida por las zeolitas de granulometría Tipo II.

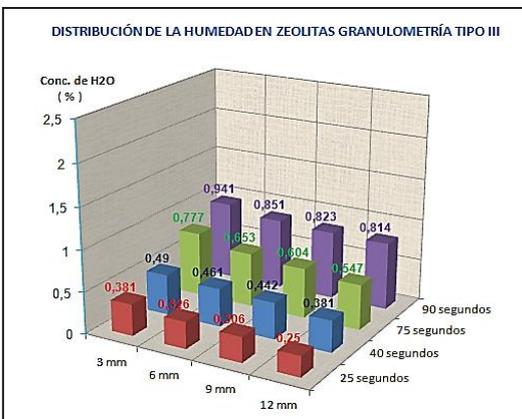


Tabla 7. Porcentaje de humedad absorbida por las zeolitas de granulometría Tipo III.

Mediante la ecuación 1 se pudo calcular el coeficiente de difusión, D_{AB} , según el tipo de granulometría. Bajo las siguientes condiciones iniciales y de frontera: $C_{A,i} = 1.3\%$ y $C_{A,s} = 2.3\%$ La figura 8, 9 y 10 muestran la distribución del coeficiente de difusión para granos de zeolitas Tipo I, II y III, respectivamente.

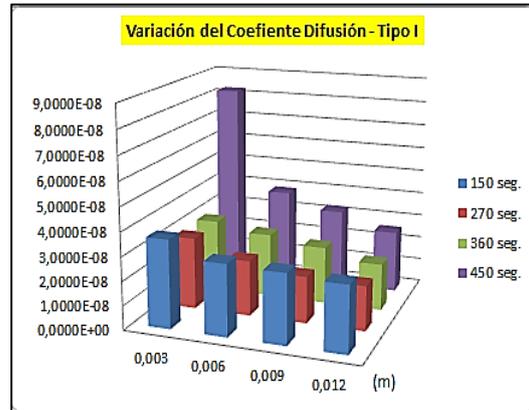


Figura 8. Variación del coeficiente de difusión para zeolitas de granulometría Tipo I

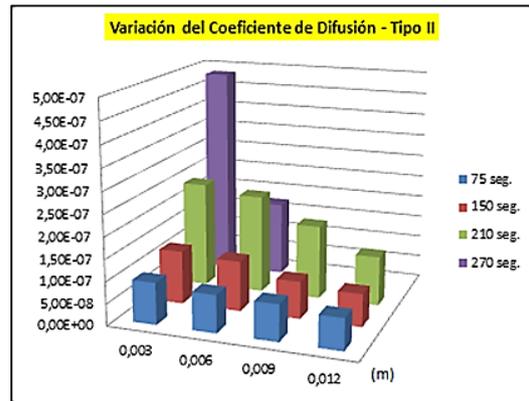


Figura 9. Variación del coeficiente de difusión para zeolitas de granulometría Tipo II

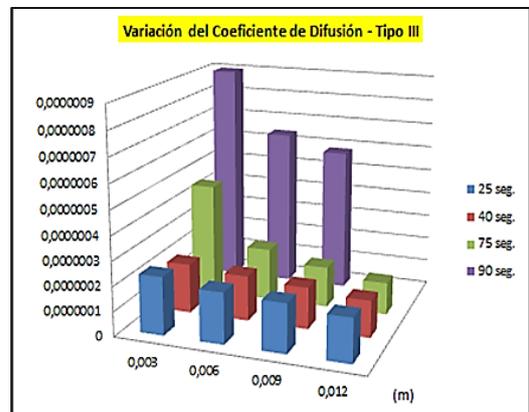


Figura 10. Variación del coeficiente de difusión para zeolitas de granulometría Tipo III

Como se podrá observar, en la figuras de variación de coeficiente de difusión para las diferentes granulometrías, existen datos atípicos para los valores de velocidad de difusión cercanos al tiempo de saturación. Esto se debe la ecuación 1 no se comporta como función Gaussiana cuando esta cerca al tiempo de saturación. En la figura 9 que no aparecen dos valores: 48.2645 y $17.139E-08 \text{ m}^2/\text{s}$, por no estar dentro del rango de variación del coeficiente de difusión; así mismo se da en la figura 10, $58.0636E-08 \text{ m}^2/\text{s}$, cuyo valor no esta dentro del rango. Se toma el valor de la mediana para cada tipo de granulometría, la mediana será el valor que represente la tendencia central de cada conjunto datos. Los resultados son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente de difusión D_{AB} para zeolitas con diferentes tamaños de grano.

Tipo de grano	$D_{AB} \text{ (m}^2/\text{s)}$
Tipo I	$2,827E-08$
Tipo II	$11,930E-08$
Tipo III	$20,389E-08$

3.3. Ensayos de desorción

A través de las distintas técnicas de caracterización se pudo estudiar los efectos de la desorción (deshidratación) en zeolitas, en este caso, medir el contenido de agua en la estructura de la zeolita y posibles cambios en la estructura por causa de la temperatura de calentamiento. Las estructuras de las zeolitas contienen cantidades variables de extra-marco cationes y moléculas de agua, son muy sensibles a los cambios de temperatura. Varios cambios se producen juntos a contenido de agua y a veces cambio en la estructura cada vez que una zeolita se somete a un cambio en el medio ambiente. Los cambios en las estructuras incluyen modificaciones en el tamaño de la celdilla unidad y la geometría, el movimiento de cationes extra- estructurales. El contenido de agua en algunas zeolitas varía suavemente en función de la temperatura y la presión vapor-agua [17]. Todo esto, puede cambiar la razón de desorción o absorción, debido a cambios en la porosidad de la zeolitas [5].

Los difractogramas de las muestras calentadas por 24 y 48 horas son mostradas en la figura 11. Según los resultados obtenidos, las muestras revelan ligeros cambios en las posiciones de los picos respecto a la muestra inicial, ambas muestras no conducen a cambios estructurales significativos.

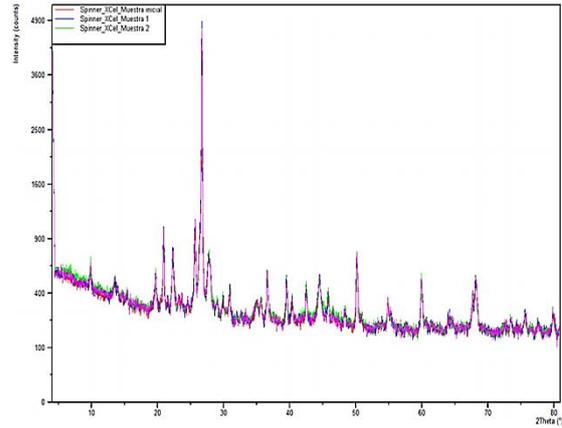


Figura 11. Difractogramas de las muestras de zeolitas.

La figura 12, muestra tres distintas curvas TGA de las muestras de zeolitas, la curva de línea continua es la muestra inicial, no fue sometida a calentamiento; en tanto que las curvas de líneas discontinuas fueron sometidas a calentamiento a 60°C durante 24 y 48 horas, respectivamente.

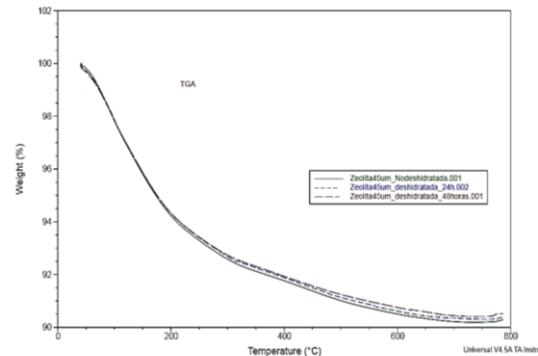


Figura 12. Curvas TGA para diferentes muestras de zeolitas.

En ella se puede observar una disminución en el contenido de agua higroscópica, agua ligeramente unida y agua zeolítica, dentro de la estructura de zeolita como consecuencia de la temperatura de calentamiento. Los resultados de la termogravimetría de las diferentes muestras son mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis Termogravimetría de las muestras de zeolitas.

Muestras	Pérdida de masa (%)			
	42-100°C	100-200°C	200-400°C	400-780°C
Recolectadas	2,249	3,606	2,464	1,514
Calentad - 24h	2,114	3,556	2,437	1,496
Calentad - 48h	2,091	3,517	2,394	1,426

La figura 13 muestra los espectrogramas de las muestras de zeolitas, en ella se puede observar ligeros desplazamientos de la frecuencia de la banda de estiramiento OH con un $\Delta\nu =$ de 7 y 6 cm^{-1} respectivamente, con respecto a la muestra inicial.

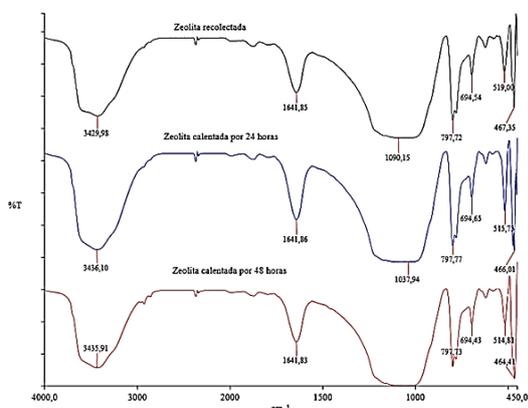


Figura 13. Espectrogramas de las muestras de zeolitas.

4. Discusión

4.1. Caracterización mineralógica de las muestras

De los resultados de la figura 2, se puede determinar que el yacimiento Policía poseen una fase mayoritariamente de minerales como: cuarzo, mordenita y heulandita-clipnotilolita, y fase minoritaria comprendida por las arcillas montmorillonita. Dado que los difractogramas de la fase heulandita-clipnotilolita son similares, se realizó un tratamiento térmico a 450 ° C donde la heulandita pierde su cristalinidad, al final de este tratamiento se determinó la presencia mayoritaria de zeolita clipnotilolita en las rocas zeolitizadas del yacimiento Policía.

En la curva TGA, figura 3, se puede observar la pérdida continua de agua higroscópica a temperaturas menores a 100 ° C, agua que se aloja en la superficie del grano de zeolita. Agua zeolítica está representada en el segmento desde 100 a 780 ° C.

La figura 4 muestra los valores de las frecuencias de las bandas de absorción de los grupos funcionales componen la estructura de la zeolita. La frecuencia más fuerte de la banda doblamiento T-O aparece a 467 cm^{-1} . A 1090 cm^{-1} aparece la vibración más fuerte de la banda tensión T-O. Finalmente, se determinó las bandas debido a la presencia de agua zeolita, la vibración de la banda de doblamiento H₂O aparece a 1641 cm^{-1} y la vibración característica de doblamiento de hidrógeno OH aparece a 3429 cm^{-1} .

Las principales vibraciones por la presencia de agua nos indica la adsorción de energía realizada por las moléculas de agua higroscópica y zeolítica.

4.2. Ensayos de adsorción.

Los ensayos de adsorción permitieron determinar la velocidad de difusión de vapor de agua en zeolitas Tipo I, II y III.

La variación del coeficiente de vapor de agua en zeolitas para los distintos tipos de granulometrías son mostrados en las figuras 8, 9 y 10. Dentro de los grupos de datos obtenidos existen datos atípicos cercanos al tiempo de saturación. La mediana para cada conjunto de datos es una medida adecuada de tendencia central para determinar el valor de velocidad de difusión para cada tipo de granulometría.

Según los resultados de la tabla 2, la velocidad de difusión para zeolitas de granulometría Tipo III es mayor en comparación con otros tipos de granulometría. Para granulometría Tipo I, II y III, los valores del coeficiente de difusión son 20.389E-08, 11.930E-08 y 2.827E-08 m^2/s , respectivamente. Los valores obtenidos en este experimento difieren en un rango de entre 2.827 a 20.389 veces respecto al mayor valor experimental sugerido en el artículo de Difusión en Zeolitas, Karger Jorg y Vasenkov Sergey [18].

4.3. Ensayos de desorción.

A través de las distintas técnicas de caracterización se pudo estudiar la desorción de las zeolitas durante 24 y 48 horas de calentamiento a temperatura de 60 ° C.

Los difractogramas de las muestras calentadas (figura 11) muestran ligeros cambios en las posiciones de los picos e intensidades de los principales componentes cristalinos de las rocas zeolitizadas, pero no significa que hay cambio estructural, probablemente exista una ligera pérdida de cristalinidad del material.

Según el análisis TGA de las muestras de zeolita (figura 12), se pudo determinar la disminución del contenido de agua, tanto como higroscópica y zeolítica del material, si se compara el termograma inicial respecto a las dos muestras calentada, existe pérdida en el contenido de agua higroscópica en las muestras deshidratadas por 24 y 48 horas, con pérdida de agua higroscópica de 6 y 7.03 % respectivamente.

A través de la técnica FTIR se pudo observar los cambios en las vibraciones de la banda por presencia de agua, no hay cambio en la estructura de la zeolita por que no existe ninguna diferencia entre los espectros (figura 13) en la región huella dactilar (1500-600

cm^{-1}), según los resultados de la espectroscopía se puede observar pequeños desplazamientos de la frecuencia de la banda de estiramiento OH con un $\Delta\nu =$ de 6.12 y 5.93 cm^{-1} para las muestras calentadas a 24 y 48 horas, respectivamente, respecto a la muestra de zeolita inicial; posiblemente esto ocurrió por pérdida en el contenido de agua, a una temperatura de calentamiento de 60 °C.

5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones. En esta parte, se define las siguientes conclusiones de este trabajo de investigación, basados en el cumplimiento de los objetivos planteados:

La caracterización mineralógica del material recolectado a través de las técnicas de caracterización, Difracción de rayos X y Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier, se pudo determinar que el material zeolítico extraído en el área de estudio, poseen zeolitas tipo heulandita – clinoptilolita y mordenita, con fase mayoritaria de clinoptilolita. Con estas, conviven otros minerales como: cuarzo y arcillas montmorillonitas

A través de los métodos térmicos se pudo identificar diferentes tipos de agua en el material recolectado. El análisis TGA muestra lo siguiente: el agua higroscópica se presenta hasta los a 100 ° C. Así mismo, por arriba de los 100 ° C, aparece el agua zeolítica. Según la curva DSC, el primer pico endotérmico representa la desorción del agua higroscópica y segundo pico endotérmico, más ancho, representa la desorción del agua fuertemente unida a la zeolita.

Con los experimentos de absorción se determinó la velocidad de difusión de vapor de agua en zeolitas para los tres tipos de granulometrías. Los resultados de los ensayos de absorción muestra el siguiente orden de velocidad de difusión: Tipo III ($20.389E-08 m^2/s$) > Tipo II ($11.930E-08 m^2/s$) > Tipo I ($2.827E-08 m^2/s$).

El experimento de absorción no se comporta como una función Gaussiana, que sugiere la ecuación diferencial de Difusión transitoria, esto se debe a que la solución de la ecuación de difusión utilizada en este experimento es para determinar la difusión en un tiempo determinado y depende la función error.

En los experimentos de adsorción, la temperatura de calentamiento es un factor muy importante en los ensayos de desorción. A través de la técnica FT-IR, se encontraron ligeros cambios en las vibraciones de la banda de estiramiento OH con un $\Delta\nu =$ de 7 y 6 cm^{-1} para las muestras deshidratadas por 24

horas y 48 horas respectivamente, con respecto a la muestra inicial. Y mediante las técnicas XRD Y TGA, se encontró una ligera pérdida de cristalinidad y contenido de agua, respectivamente.

Culminado este trabajo de investigación los resultados de los ensayos indican que las zeolitas de la zona de estudio son capaces de realizar la deshumidificación, pero al calentar las zeolitas hay pérdida en el contenido de agua sin cambio estructural, probablemente exista un efecto en la porosidad en comparación con otros elementos desecantes.

Recomendaciones. Basados en los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se recomienda lo siguiente:

Se recomienda uso de técnicas experimentales para caracterizar el coeficiente de difusión con mayor resolución y precisión para estudiar el comportamiento cerca del estado de saturación.

También se sugiere que es necesario caracterizar la degradación del comportamiento de difusión de las zeolitas al ser sometidas a largos ciclos de trabajo

Se recomienda realizar estudios de activación química en las zeolitas Policía con el objeto de determinar la posibilidad de mejora de la capacidad de absorción de vapor de agua y resistencia al fuego.

Se recomienda el desarrollo de dispositivos que usen zeolitas para aplicaciones de deshumidificación que sean probadas en condiciones de trabajo real.

6. Agradecimientos

Al Msc. Mauricio Cornejo M. por su valiosa colaboración en este proyecto de investigación. Y un agradecimiento fraterno al personal LEMAT – ESPOL por permitir la realización de este trabajo de investigación.

7. Referencias

- [1] Gianneto Giuseppe, Montes, Arturo y Rodriguez, Gerardo. “Zeolitas: Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales”. Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, 2000.
- [2] Maier-Laxhuber, Peter, Schmidt, Ralf and Grupp, Christoph. Air Ventilated Heating and Cooling Based on Zeolite Technology”, Symposium on “Blowing Hot and Cold: Protecting Against Climatic Extremes”, Germany, 8-10 October 2001.
- [3] Shigeishi Ronald A., Langford Cooper H. and Hollebony Bryan R., “Solar Energy Storage using Chemical Potential Changes

- Associated with Drying of Zeolites”, Solar Energy, Vol. 23, pp. 489-495, Pergamon Press Ltd., 1979
- [4] Bula Silvera Antonio José, Méndez Díaz Felipe Andrés, “Ahorro de energía eléctrica por implementación de filtros desecantes en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor”, Revista Facultad de ingeniería Universidad de Antioquia, junio, numero 031, pp. 84-92.
- [5] Huang Hongyu, Ito Seiya, Watanabe Fujio, Hasatani Masanobu and Kobayashi Noruyuki, “Microwave irradiation effect in water-vapor desorption from zeolites”, Nagoya University, Japan.
- [6] Carbonell Morales Tania, López Alen Leonart y Quesada Ramos Guillermo, “Utilización de las ruedas desecantes, entálpicas y sensibles en el tratamiento de aire en Cuba, Centro de Estudio Tecnologías Energéticas Renovables del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- [7] Morante Carballo, Fernando. “Las zeolitas de la costa de Ecuador de Ecuador (Guayaquil): Geología, Caracterización y Aplicaciones”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid”, 2004.
- [8] Kanoglu, M, Carpinlioglu M, Yildirim M, “Energy and exergy analyses of an experimental open-cycle desiccant cooling system”, Applied Thermal Engineering 24, 2004, pp. 919-933.
- [9] Tchernev D.I., “Solar Energy Application of Natural Zeolites”, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- [10] ASTM C136-06, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”.
- [11] ASTM C117, “Test Method for Materials Finer than 75 μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing”.
- [12] Korkuna O., Leboda R., Skubiszewska-Zieba J., Vrublevs’ka T., Ryczkowski J., “Structural and physicochemical properties of natural zeolites: clinoptilolite and mordenite”, Microporous and Mesoporous Materials 87(2006)243-254.
- [13] Giannetto Pace Giuseppe, Montes Rendón Arturo y Rodríguez Fuentes, “Zeolitas: Características, Propiedades y Aplicaciones industriales”, Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, 2000.
- [14] Knowlton, Gregory and White Ted. “Thermal Study Types of water Associated with Clinoptilolite”, Clays and Clay Minerals, Vol. 29, No 5, 403-411, 1981.
- [15] Prasad Shiva K. and Prasad P.S.R., “FTIR Study of Dehydration Dynamics in Natural Zeolites”, International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering, December 20-22, 2004, Chennai, India.
- [16] Perraki, Th, and Orfanoudaki, A. “Mineral study of zeolites from Pentafloos area, Thrace, Greece”. Applied Clay Science 25 (2004), 9-16.
- [17] Bish David L. and Carey William, “Thermal Behavior of Natural Zeolites”, Los Alamos National Laboratory, Hydrology, Geochemistry, and Geology, MS D469.
- [18] Karger Jorg y Vasenkov Sergey, “Diffusion in zeolites”, Marcel Dekker, Inc., 2003