

## Activación de cenizas volantes para retención de gases contaminantes

S. HERNÁNDEZ <sup>1</sup>, R. JUAN <sup>1</sup>, X. QUEROL <sup>2</sup>, A. ALASTUEY <sup>2</sup>, P. FERRER <sup>1</sup>, J.M. ANDRÉS <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Carboquímica (CSIC), Zaragoza; <sup>2</sup>Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Barcelona.

Se han estudiado las zeolitas sintetizadas a partir de cenizas volantes, mediante activación alcalina y calentamiento por vía hidrotermal o con microondas, con el objeto de evaluar su posible utilización como adsorbentes de gases contaminantes tales como CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>. Las cenizas volantes contienen un alto contenido en aluminosilicatos en su composición, por lo que pueden constituir una materia prima para llevar a cabo la síntesis de zeolitas, consiguiéndose en el mejor de los casos eficacias del 75%. Los tipos de zeolitas obtenidos por el método convencional y por microondas fueron muy similares, habiéndose sintetizado zeolitas sódicas y potásicas como Analcima, Sodalita, Linde F, NaPl, KM y Chabazita, dependiendo de los parámetros de síntesis (tiempo, temperatura y concentración y naturaleza del agente activante). La principal diferencia entre ambos métodos es el tiempo de activación necesario que se reduce considerablemente usando microondas hasta 30 minutos frente a las 24-48 h en el calentamiento convencional. Las zeolitas fueron previamente activadas a 473 K con la finalidad de eliminar parte del agua de constitución que contienen pero sin alterar su estructura, facilitando de este modo la posible adsorción gaseosa. Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo a presión atmosférica, haciendo pasar mezclas de cada gas en Helio sobre la muestra y utilizando temperaturas de 195 K para CO<sub>2</sub>, 263 K para SO<sub>2</sub> y 250 K para NH<sub>3</sub>. Las desorciones fueron realizadas a temperatura ambiente. Se ha estudiado también el efecto que produce el intercambio de Na<sup>+</sup> de una zeolita (NaPl) por NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en cuanto a la modificación de la capacidad de retención de gases.

La capacidad de retención de gases fue baja para todas las zeolitas ensayadas. En las condiciones de trabajo utilizadas, únicamente la superficie externa de la zeolita es aprovechada para la adsorción. En general las zeolitas sintetizadas mediante microondas muestran mayor capacidad de retención de gases que las sintetizadas mediante el método convencional.

*Palabras clave:* Ceniza volante, zeolita, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>

### Fly for activation pollutant gas retention

Zeolites synthesized from fly ash by Hydrothermal Activation and Microwave Assistance were studied to evaluate their utilization as sorbents of pollutant gases like CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>. Fly ash have a high aluminosilicate content in its composition that makes it a good starting material to synthesize zeolites, getting efficiencies about 75%. Zeolites obtained by Hydrothermal Activation and Microwave Assistance were very similar. Depending on the synthesis parameters - reaction time, temperature and activation solution concentration- the following zeolites were obtained: Analcime, Sodalite, F-Linde, NaPl-zeolite and Chabazite. Synthesis yields and zeolite types obtained from the microwave and conventional experiments were very similar, but the activation time needed was drastically reduced by using microwaves (from 24-48 h to 10-30 min). The zeolitic material was previously activated at 473 K to remove the hydration water and facilitate the gas adsorption. The adsorption experiments were performed at atmospheric pressure by flowing a mixture of every gas in He through the sample. The adsorption temperatures were 195 K (CO<sub>2</sub>), 263 K (SO<sub>2</sub>) and 250 K (NH<sub>3</sub>). The desorption experiments were made at room temperature. Finally, the effect of the substitution of Na<sup>+</sup> by NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in the NaPl-zeolite in the adsorption capacity was studied. The adsorption capacities obtained for all the samples were low. Only external surface of the zeolites was reached in the working conditions. In general, samples synthesized by microwave assistance showed more adsorption capacity than those synthesized by conventional methods.

*Keywords:* Fly-ash, zeolite, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>

### 1. INTRODUCCIÓN

Conforme ha ido avanzando el mundo en desarrollo industrial y nivel de vida, han aparecido como contrapartida una variedad de riesgos para el Medio Ambiente. Aunque las fuentes de contaminación atmosférica pueden ser muy variadas (automóvil, usos industriales, agrícolas y domésticos, etc), son las centrales térmicas las responsables del aumento progresivo de contaminantes en la atmósfera. La necesidad de generar más electricidad obliga a la construcción de nuevas plantas, e inevitablemente al incremento de emisiones gaseosas como CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> que pueden originar serios problemas medioambientales.

Las exigentes regulaciones medioambientales, llevadas a cabo con el fin de controlar la calidad del aire, han fomentado la búsqueda y desarrollo de nuevos procesos y tecnologías que puedan ser utilizadas para la separación-recuperación de gases contaminantes como CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> (1,2).

Uno de los procesos que ha sido ampliamente utilizado es la adsorción física sobre sólidos porosos tales como las zeolitas (3-5 Å), puesto que tienen estructuras porosas muy abiertas y consecuentemente áreas superficiales internas extensas, capaces de adsorber gran cantidad de sustancia (3). Por ello, las zeolitas han sido empleadas como adsorbentes selectivos

para la eliminación de impurezas con la consiguiente purificación de las corrientes gaseosas (1).

La adsorción física puede ser usada además como medio para concentrar determinados gases en una corriente gaseosa (1). Dado que los periodos de adsorción y desorción son relativamente pequeños en la mayoría de los casos, no resultaría complicado enriquecer una corriente gaseosa mediante la desorción de un gas previamente retenido en un sólido lo suficientemente selectivo.

Por otra parte, los procesos de combustión de carbón generan gran cantidad de residuos sólidos (cenizas volantes). Gran parte de éstos son almacenados en balsas o reciclados para su posterior uso en agricultura ó como aditivos en la producción de cemento y hormigón (4). Pero, por otra parte, la composición química y mineralógica de las cenizas volantes, ricas en componentes sílico-alumínicos, hace que éstas puedan ser utilizadas como material de partida para la síntesis de zeolitas mediante su activación alcalina y calentamiento por vía hidrotermal o con microondas (4,5,6,7).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la retención a presión atmosférica de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  en zeolitas sintetizadas a partir de cenizas volantes de diferente procedencia y composición.

Asimismo, algunas investigaciones han puesto de manifiesto que la cantidad adsorbida en zeolitas de algunos gases, particularmente  $\text{NH}_3$ , depende de la forma catiónica de las mismas (8). Con el fin de determinar el efecto de la sustitución catiónica respecto a la adsorción, en una zeolita (NaPl) se intercambió el ión  $\text{Na}^+$  por el ión  $\text{NH}_4^+$  y se evaluó la capacidad de retención de la zeolita intercambiada.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes

Las cenizas volantes utilizadas para la síntesis de las zeolitas proceden de distintas centrales térmicas españolas, Teruel, Compostilla y Narcea. Las cenizas recogidas en los precipitadores electrostáticos fueron empleadas para la síntesis sin ningún tratamiento previo. Para la síntesis es necesario activar las cenizas volantes y dicha activación se lleva a cabo mediante soluciones alcalinas de NaOH y KOH en un sistema cerrado mediante calentamiento con microondas o por vía hidrotermal (5,6).

Los productos zeolíticos sintetizados se reflejan en la Tabla I.

#### 2.1.1 ACTIVACIÓN HIDROTERMAL

El método clásico para la activación de las cenizas volantes se lleva a cabo en un reactor cerrado (45 mL) recubierto con PTFE y con calentamiento convencional. La cantidad de cenizas empleada para la síntesis oscila entre 1 y 2 g. La síntesis se estudia en función de la temperatura (150-200°C), el tiempo de reacción (3-98 h) y la concentración de álcali (0.5-5 M). Los rangos de presión estimados durante la reacción varían desde 4.7 atm (150°C) hasta 15.3 atm (200°C). La relación solución/ceniza volante empleada osciló entre 2-18 mL/g, siendo la primera de ellas la que permite una drástica reducción del tiempo de activación necesario para la síntesis y consiguiéndose eficacias mayores cuando el agente activante

TABLA I. ZEOLITAS SINTETIZADAS A PARTIR DE CENIZAS VOLANTES

Zeolita	Fórmula
NaPl	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Analcima	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Fillipsita/KM	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$
Linde F	$\text{KAlSiO}_4 \cdot 1.5 \text{H}_2\text{O}$
Tobermorita	$\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Sodalita	$\text{Na}_{1.08}\text{Al}_2\text{Si}_{1.68}\text{O}_{7.44}$
Cancrinita	$\text{Na}_{14}\text{Al}_{12}\text{Si}_{13}\text{O}_{51} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kalsilita	$\text{KAlSiO}_4$
Herschelita	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Chabazita	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{SiO}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$

TABLA II. ZEOLITAS SINTETIZADAS MEDIANTE ACTIVACIÓN HIDROTERMAL UTILIZANDO NaOH COMO AGENTE ACTIVANTE

Muestra	Procedencia	Conc.álcali	t (h)	T (°C)	Zeolita
2-1H	Narcea	1M	24	200	Analcima
3-1H	Compostilla	1M	48	150	NaPl Analcima
2-2H	Narcea	1M	48	150	Analcima Tobermorita NaPl
3-2H	Teruel	1M	48	150	NaPl Tobermorita Sodalita
6-2H	Narcea	5M	8	150	Herschelita

TABLA III. ZEOLITAS SINTETIZADAS MEDIANTE ACTIVACIÓN HIDROTERMAL UTILIZANDO KOH COMO AGENTE ACTIVANTE.

Muestra	Procedencia	Conc.álcali	t (h)	T (°C)	Zeolitas
5-1H	Narcea	1M	24	200	KM
5-2H	Compostilla	1M	48	150	KM
6-1H	Teruel	1M	24	150	Chabazita

es NaOH. Además la relación solución/ceniza volante de 2 mL/g permite la síntesis de algunas zeolitas (Herschelita) que no habían sido sintetizadas con la relación más diluida.

Los materiales zeolíticos seleccionados para su estudio como adsorbentes o intercambiadores, con las condiciones particulares de activación empleadas, junto con las zeolitas

presentes en ellos, se muestran en las Tablas II y III.

2.1.2 ACTIVACIÓN CON MICROONDAS

Los experimentos realizados en horno de microondas se llevaron a cabo en un reactor de autoclave de 500 mL con el interior de PTFE y partes no metálicas, equipado con sonda de temperatura. La cantidad de ceniza empleada para todos los experimentos fue de 5 g. Los parámetros de reacción empleados fueron la temperatura (175-225°C), el tiempo de reacción (10-30 minutos), la concentración de álcali (1-5 M) y la relación solución/ceniza volante (7-18 mL/g).

Las zeolitas sintetizadas y las condiciones particulares de activación empleadas se muestran en las Tablas IV y V.

La diferencia más importante en la síntesis de zeolitas mediante microondas respecto al procedimiento convencional es que la disolución de la sílice y alúmina se produce rápidamente. Esto da lugar a la formación de una disolución saturada y como consecuencia la nucleación y cristalización de las zeolitas se produce de inmediato.

En ambos procedimientos, una vez alcanzado el tiempo de activación fijado, los materiales zeolíticos son filtrados y lavados con agua desionizada de calidad Milli-Q, secados a temperatura ambiente y analizados mediante DRX en un difractómetro SIEMENS D500 con monocromador de grafito, detector NaI(Tl) y radiación CuK $\alpha$ . La morfología de las zeolitas se determinó por medio de un microscopio electrónico de barrido (JEOL 6400 SEM) equipado con un espectrómetro de rayos X con energía dispersiva (LINKLZ5).

También se llevaron a cabo medidas de superficie en todos los materiales sintetizados mediante un equipo de fisiorción ASAP 2000. El adsorbato empleado fue CO<sub>2</sub> a 273 K. Las muestras fueron desgasificadas a 473 K con un vacío de 5 x 10<sup>-1</sup> mm Hg antes de realizar las medidas de adsorción. La superficie se calculó mediante la ecuación de Dubinin-Radushkevich.

2.2 Adsorción de gases

Los experimentos de adsorción de gases han sido realizados en el equipo Pulse Chemisorb 2700. Aproximadamente 400 mg de zeolita se colocaron en un reactor en U y se activaron a 473 K en un flujo continuo de He durante 1 h. Esta temperatura fue considerada adecuada para conseguir la eliminación de parte del agua de hidratación de las zeolitas, sin provocar cambios estructurales en la misma, que pudieran afectar a su capacidad de adsorción.

Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo haciendo pasar a través de cada muestra un flujo de 30 mL/min de una mezcla gaseosa de la siguiente composición en volumen:

CO<sub>2</sub>: 30 % CO<sub>2</sub> y 70 % He

SO<sub>2</sub>: 30 % SO<sub>2</sub> y 70% He

NH<sub>3</sub>: 10% NH<sub>3</sub> y 90 % He

Las temperaturas de adsorción variaron en correspondencia a las constantes físicas (temperaturas de condensación) de los gases estudiados. Esas temperaturas fueron 195 K para CO<sub>2</sub>, 263 K para SO<sub>2</sub> y 250 K para NH<sub>3</sub>. La saturación de la muestra se detecta cuando la señal de conductividad de los detectores situados en la corriente gaseosa, antes y después del tubo en U, se mantiene estable en el tiempo. Una vez saturada la zeolita, la desorción se realiza a temperatura ambiente. La cantidad de gas adsorbido o desorbido se cuantifica previa calibración del Pulse Chemisorb 2700.

Para ver el efecto que tiene sobre la adsorción de gases la

TABLA IV. ZEOLITAS SINTETIZADAS MEDIANTE MICROONDAS UTILIZANDO NaOH COMO AGENTE ACTIVANTE.

Muestra	Procedencia	Conc.álcali	t (min)	T (°C)	Zeolitas
1-1M	Teruel	5 M	30	225	Sodalita Cancrinita Tobermorita
1-2M	Teruel	5 M	30	175	Sodalita Tobermorita
2-1M	Teruel	1 M	30	225	Analcima NaP1 Sodalita
1-3M	Teruel	5 M	30	175	Sodalita Tobermorita
3-1M	Teruel	1 M	30	175	NaP1

TABLA V. ZEOLITAS SINTETIZADAS MEDIANTE MICROONDAS UTILIZANDO KOH COMO AGENTE ACTIVANTE.

Muestra	Procedencia	Conc.álcali	t (min)	T (°C)	Zeolitas
4-1M	Teruel	5 M	30	225	Linde F Kalsilita
4-2M	Teruel	5 M	30	175	Linde F
4-3M	Teruel	5 M	10	225	Linde F Kalsilita
4-4M	Teruel	5 M	30	175	Linde F

forma catiónica de las mismas, se llevó a cabo el intercambio del ión Na<sup>+</sup> por el ión NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en una zeolita NaP1. El intercambio se produjo en una columna de 1 cm de diámetro con un lecho de 1 g de zeolita entre 0.2-0.5 mm de tamaño de grano. Se hizo pasar una disolución de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0.35 N a través de la zeolita con un flujo de 10 mL/h durante 3 h. Cuando el intercambio ha finalizado la zeolita se lava con agua desionizada Milli-Q y se seca a temperatura ambiente.

La adsorción de gases se lleva a cabo previa activación de la muestra a 373 K en corriente de He. Los parámetros de adsorción fueron los mismos que se utilizaron para la muestra

original.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cantidades de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NH}_3$  adsorbidas en el equilibrio, para las composiciones y temperaturas indicadas previamente, se presentan en la Tabla VI. Los resultados obtenidos en los experimentos de desorción llevados a cabo a temperatura ambiente muestran que la adsorción es reversible en todos los casos. Esto es importante desde el punto de vista industrial puesto que el adsorbente puede ser utilizado en sucesivas adsorciones. Tanto la adsorción como la desorción son rápidas como corresponde a una adsorción física (2.5-5 min).

Se observa que zeolitas sintetizadas mediante activación por microondas presentan mayor capacidad para la retención de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NH}_3$ , excepto en el caso de Herschelita. Esta zeolita ha sido sintetizada por vía hidrotermal apreciándose un aumento significativo en la retención de los tres gases.

Zeolitas sintetizadas por el mismo procedimiento y pertenecientes al mismo grupo presentan retenciones ligeramente diferentes. Si se observa la superficie externa obtenida para cada muestra ( $S_{\text{CO}_2}$ ) puede verse cierto paralelismo con la capacidad de retención de estas muestras, de modo que a mayor superficie externa mayor capacidad de retención de gases. Así, la Herschelita aunque ha sido sintetizada por el método convencional, presenta la superficie externa más elevada y esto se traduce en unas notables diferencias en su capacidad de retención de gases.

Las cantidades retenidas de  $\text{SO}_2$  en la Herschelita (13 mg/g) y NaP1 (9 mg/g) son algo inferiores a las obtenidas en algunas zeolitas hidrofóbicas en experimentos llevados a cabo con una metodología de trabajo similar (1), aunque las condiciones experimentales fueron diferentes. Esto puede ser debido a que la presencia de moléculas de agua no eliminadas durante la activación, dificulta la adsorción de las moléculas de  $\text{SO}_2$ . Respecto a las retenciones obtenidas para  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  no se han encontrado referencias en las que se trabaje con la misma metodología por lo que no se pueden realizar comparaciones.

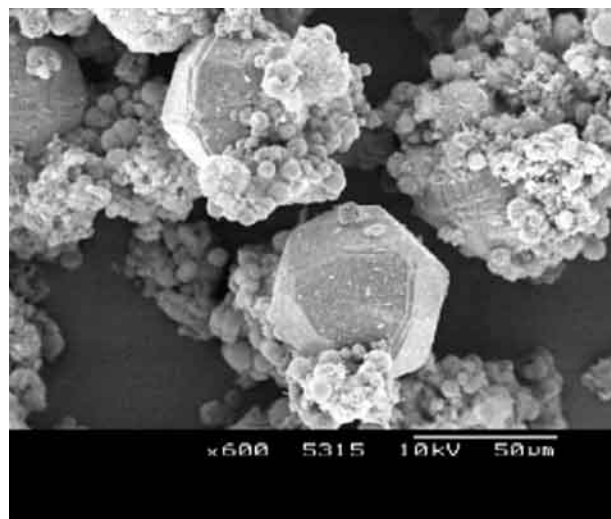
Las fotografías SEM de muestras sintetizadas con aporte energético de microondas (Figura I), muestran diferencias apreciables en la cristalización de la zeolita con respecto a las obtenidas por el método convencional (Figura II). En la Figura I se pueden ver cristales masivos de zeolita (2-1M) o las partículas zeolíticas de distinta geometría bien diferenciadas de pequeñas esferas de ceniza volante no transformadas (3-1M). En la Figura II esto no se aprecia, sino que parece que el propio proceso de síntesis genera un sólido más compacto con claros signos de cristalización zeolítica lenta y con menor superficie expuesta para la adsorción, lo que hace que la retención de gases disminuya en las zeolitas sintetizadas por el método hidrotermal.

Los experimentos sobre retención de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  llevados a cabo con la zeolita intercambiada con  $\text{NH}_4^+$  (Tabla VII), no muestran diferencias apreciables con respecto a la zeolita sódica original para ninguno de los dos gases. El intercambio debe provocar perturbaciones estructurales en la red de la zeolita que podría facilitar el acceso de los gases, aunque en este estudio se comprueba que esto no ha ocurrido porque la adsorción de los gases, en las condiciones de trabajo, es solamente superficial como se ha indicado. Puesto que el tamaño de molécula de  $\text{CO}_2$  (2.6 Å) y de  $\text{SO}_2$  (2.5 Å) son similares, cabía esperar un comportamiento similar para las moléculas de  $\text{SO}_2$ , por lo que no se consideró necesario la realización de

TABLA VI. CANTIDADES DE  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  Y  $\text{NH}_3$  ADSORBIDAS (mg/g SÓLIDO) Y SUPERFICIE  $S_{\text{CO}_2}$  ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) PARA CADA MUESTRA.

Grupo	Muestr	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NH}_3$	$S_{\text{CO}_2}$
		(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	( $\text{m}^2/\text{g}$ )
SODALITA	1-1M	2.7	2.4	0.7	20
	1-2M	4.8	4.0	0.8	27
	1-3M	4.1	3.6	0.7	23
ANALCIMA	2-1M	5.0	4.4	1.3	29
	2-1H	3.2	1.6	0.5	23
	2-2H	3.8	1.6	0.7	23
Na P1	3-1M	12.2	9.0	2.1	47
	3-1H	4.4	3.5	0.7	24
	3-2H	3.9	2.9	0.6	24
LINDE F	4-1M	6.3	4.3	2.0	52
	4-2M	7.5	6.1	1.4	52
	4-3M	7.9	5.8	1.3	42
	4-4M	9.3	6.7	1.8	34
KM	5-1H	5.0	3.6	4.8	32
	5-2H	4.3	3.1	2.2	26
CHABAZITA	6-1H	7.0	3.6	4.7	42
HERSCHELITA	6-2H	30.3	12.5	8.1	135

2-1M



3-1M



Figura I. Fotografías SEM de las muestras 2-1M y 3-1M



2-1M

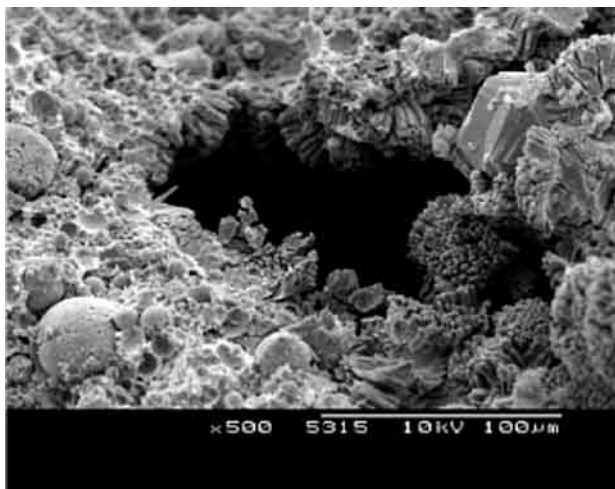


Figura II. Fotografías SEM de las muestra 3-1H

TABLA VII. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE GASES EN LA ZEOLITA AMÓNICA.

Muestra	CO <sub>2</sub> (mg/g)		NH <sub>3</sub> (mg/g)	
	195K	240K	195K	240K
NaP1-Na	12.2	2.1		
NaP1-NH <sub>4</sub>	13.4	2.2		

los experimentos con este adsorbato.

#### 4. CONCLUSIONES

Zeolitas pertenecientes al mismo grupo que han sido sintetizadas mediante la asistencia de microondas, presentan mayor capacidad de retención de gases que las que han sido obtenidas por el método hidrotermal. Las condiciones de trabajo no permiten el acceso a la superficie interna de las zeolitas, por lo tanto, las adsorciones llevadas a cabo son exclusivamente externas y consecuentemente la cantidad de gas adsorbido es pequeña.

En zeolitas del mismo grupo y sintetizadas por el mismo procedimiento hay ligeras diferencias en la capacidad de adsorción. Este comportamiento parece ser debido a diferencias en la superficie externa.

Desde el punto de vista industrial las zeolitas más interesantes son la Herschelita, Chabazita y KM sintetizadas por el método convencional y NaP1 por microondas.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comisión Internacional de Ciencia y Tecnología (CICYT) y a la Comisión Europea para el Carbón y el Acero (CECA) las subvenciones económicas recibidas a través de los Proyectos AMB95-0198 y 7220-ED-079 respectivamente, para la realización de este trabajo.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. S. G. Deng y Y. S. "Sulfur Dioxide Sorption Properties and Thermal Stability of Hydrophobic Zeolites" *Lin, Ind. Eng. Chem. Res.* 34, 4063-4070, 1995.
2. S. Díaz De La Torre, H. Miyamoto, H.Satake, J.Kawasaki, "Adsorption Capacity Prediction on Zeolite-5" *Funtai Oyobi Funmatsu Yakin*, 44, (4), 381-386, 1997.
3. L. Smart y E. Moore, "Zeolitas" *Química del estado sólido* 195-219, Addison-Wesley Iberoamericana, 1995.
4. C. Amrhein, G. H. Haghnia, T. S.Kim, P.A. Mosher, R.C. Gagajena, T. Amanios y L. De La Torre "Synthesis and Properties of Zeolites from Coal Fly Ash", *Environ. Sci. Technol.*, 30, 735-743, 1996.
5. X. Querol, A. Alastuey, J. L. Fernández y A. López, "Synthesis of zeolites by alkaline activation of ferro-aluminous fly ash", *Fuel*, 74, 8, 1226-1231, 1995.
6. X.Querol, A. Alastuey, A. López, F. Plana, J. M. Andrés, R. Juan, P. Ferrer y C. Ruiz, "A Fast Method for Recycling Fly Ash: Microwave -Assisted Zeolite Synthesis", *Environ. Sci. Technol.*, 31, 9, 2527-2533, 1997.
7. C. F. Lin y H. C. Hsi, "Resource Recovery of Waste Fly Ash: Synthesis of Zeolite-like Materials", *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1109-1117, 1995.
8. D. Kolousek, V. Seidl, E. Prochazkova, E. Obsasnikova, J. Kubelkova y L. Svetlik, "Ecological Utilization of Power Plant Fly Ash by their Alteration to Pilipsite: Hydrothermal Alteration, Application", *Acta Univ. Carol. Geol.*, 37, 167-178, 1993.

Recibido: 19.10.99

Aceptado: 28.02.01