

Síntesis de membranas cerámicas para la regeneración de baños de cromado agotados

E. SÁNCHEZ¹, S. MESTRE¹, V. PÉREZ-HERRANZ², M. GARCÍA-GABALDÓN².

¹Instituto de Tecnología Cerámica. Campus Universitario Riu Sec s/n. 12006 Castellón.

²Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia,.

Se han sintetizado membranas cerámicas destinadas a la función de separadores entre los compartimentos de un reactor electroquímico, cuya aplicación es el reciclado de baños de cromado usados. Se han estudiado dos variables del proceso de síntesis de las membranas (presión de prensado y adición de materia orgánica), para conseguir prototipos con las características adecuadas para realizar la función de separador, y a la vez conseguir un coste de fabricación reducido.

Palabras clave: Membranas cerámicas, variables de procesado, reactor electroquímico, reciclado, baños de cromado.

Síntesis of ceramic membranes for the regeneration of spent chromium plating baths.

Ceramic membranes intended for use as compartment separators in electrochemical reactors used for recycling spent chromium plating baths have been synthesised. Two variables of the membrane synthesis process have been studied (pressing pressure and organic matter addition), to enable designing prototypes with the appropriate characteristics to act as separators, at a low manufacturing cost.

Keywords: Ceramic membranes, processing variables, electrochemical reactor, recycling chromium plating baths.

1. INTRODUCCIÓN

Los baños de cromado consisten fundamentalmente en disoluciones concentradas de Cr(VI) en medio sulfúrico, que se utilizan para recubrir objetos con cromo metálico por procedimientos electroquímicos. Sin embargo, además de la reacción deseada, la reducción del Cr(VI) a Cr metal sobre el objeto a recubrir, se produce la reducción parcial del Cr(VI) a Cr(III), el cual ya no puede ser reducido a metal en las condiciones de operación normales en las celdas de cromado. Cuando la concentración de Cr(III) alcanza cierto límite, el cromado no puede realizarse adecuadamente, y se considera que el baño está "agotado". Debido a la elevada concentración de Cr(VI) que aún contienen, los baños agotados son un residuo altamente contaminante, que han de gestionarse adecuadamente (1). Una forma de prolongar la vida de los baños es el método del "Porous Pot", que permite reducir la concentración de cationes indeseables en el baño de cromado, pero su carácter discontinuo no impide que al final el baño tenga que ser desechado (2).

Una alternativa es regenerar los baños, oxidando el Cr(III) formado a Cr(VI). Para ello se puede seguir un procedimiento electroquímico (3), en el que la clave es separar las dos celdas del reactor mediante una membrana porosa, que permita el paso de la corriente eléctrica a través de la migración de iones, pero que impida la difusión del Cr^{3+} y del CrO_4^{2-} (Figura 1). Los principales requisitos para que dicha membrana sea efectiva son una distribución de tamaño de poro adecuada, una elevada resistencia química, ya que el baño es muy ácido y oxidante, y una resistencia eléctrica mínima. Estos requisitos pueden ser satisfechos con materiales cerámicos adecuadamente seleccionados y conformados.

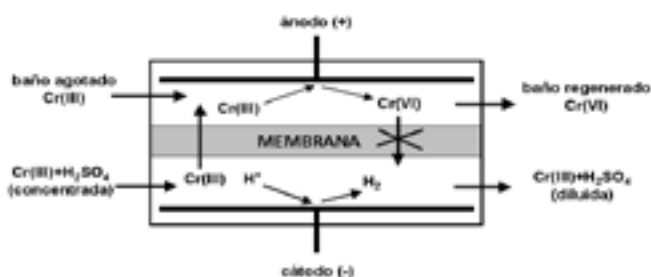


Fig. 1- Esquema del reactor electroquímico destinado a la recuperación del baño de cromado.

Un material adecuado para sintetizar las membranas es el Al_2O_3 , debido a su resistencia química, pero dicho material requiere unas temperaturas de procesado elevadas, que encarecen la fabricación. La alternativa escogida fue sintetizar las membranas con una composición dentro del sistema sílice-alúmina, ya que se puede partir de materiales económicos (alúmina y caolín), y mediante un procesado similar al de productos cerámicos tradicionales, se pueden obtener membranas cuyas fases (corindón, mullita y cuarzo), poseen buena resistencia química en medio sulfúrico (4).

1.1 Permeabilidad de las membranas

Durante la operación del reactor electroquímico, las membranas han de presentar una elevada resistencia al flujo de disolución a su través, de modo que el cromo no encuentre facilidades para difundirse del compartimento anódico al catódico.

Por ello es necesario determinar la permeabilidad de las distintas muestras de membrana, y relacionarla en lo posible con las características microestructurales de las mismas, que son el resultado del proceso de obtención. La permeabilidad al agua de las membranas se ha obtenido aplicando la ley de Darcy, que supone que el flujo a través de los capilares de la membrana es laminar. En dichas condiciones, la relación entre el flujo de líquido Φ a través de la membrana (volumen de líquido que la atraviesa por unidad de tiempo y área transversal, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), y la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana ΔP (Pa), viene dada por (5)

$$\Phi = K_p \frac{\Delta P}{\mu L} \quad [1]$$

Donde L es el espesor de la membrana (m), μ es la viscosidad del líquido utilizado en el ensayo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{seg}^{-1}$), y K_p es el coeficiente de permeabilidad (m^2)

El coeficiente de permeabilidad de las membranas se puede relacionar con propiedades microestructurales de las mismas como la porosidad total, el radio medio de los canales internos y la tortuosidad de los mismos. Una de las ecuaciones más extendidas para establecer dicha relación es la propuesta por Kozeny y Carman (6), que supone el flujo a través de los huecos de un lecho de partículas esféricas. Dicha ecuación posee la forma

$$K_p = \frac{\varepsilon r_0^2}{8 \cdot \lambda^2} \quad [2]$$

Donde:

- ε es la porosidad de la probeta, definida como $(\rho_{\text{real}} - \rho_{\text{aparente}}) / \rho_{\text{real}}$ (adimensional)
- r_0 es el radio medio de los canales (m).
- λ es la tortuosidad de los canales (adimensional).

1.2. Recuperación del cromo

El porcentaje de cromo recuperado se calcula a partir del Cr(VI) recuperado hasta un instante dado y el Cr(III) presente en la disolución en el instante inicial:

$$\text{Cr}_{\text{recuperado}} (\%) = \frac{[C(t) - C(0)]}{C_0} 100 \quad [3]$$

donde $C(t)$ es la concentración de Cr(VI) en un instante t , $C(0)$ es la concentración inicial de Cr(VI), y C_0 es la concentración inicial de Cr(III).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materias primas

El método de conformado escogido fue el prensado en seco unidireccional, que se adapta perfectamente a la geometría plana que requieren las membranas para su función de separador en los reactores electroquímicos. Con este método de conformado la microestructura de las membranas depende de la distribución de tamaño de partícula de las materias primas, y de las condiciones de procesamiento (presión de prensado y tratamiento térmico). Sin embargo las modificaciones que se pueden conseguir con estas variables en la microestructura son relativamente limitadas y por ello se

ensayó la incorporación de un material orgánico a la mezcla de materias primas, de modo que su oxidación crease una microestructura más abierta.

Las membranas se sintetizaron a partir de alúmina y caolín, dosificados para obtener una mezcla de materias primas fácilmente procesable por prensado en seco unidireccional. De los experimentos previos se dedujo que una mezcla con el 49.5 % de alúmina y 50.5% de caolín (% en peso), no presentaba problemas en el procesado, por lo que se mantuvo dicha proporción en todo el estudio.

A priori no se conocía la distribución de tamaño de poro más favorable para la operación de la membrana, por ello se ensayaron cuatro alúminas con diferentes tamaños de partícula (tabla 1), para analizar las posibilidades de modificar la distribución porosimétrica con dicha variable. En lo posible se partió de productos industriales fácilmente accesibles. Los óxidos de aluminio procedían de Alcoa Alúmina Española, S.A., el caolín ER/N fue suministrado por Caobar, S.A. (se escogió un material con pocas impurezas y que proporcionase suficiente plasticidad a la mezcla inicial). Como materia orgánica se utilizó un almidón de patata de elevada pureza y con una distribución de tamaño de partícula estrecha (Starch from potatoes, Fluka A.G.).

TABLA I. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA SÍNTESIS DE LAS MEMBRANAS.

Componente	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	β
Tipo	Alúmina SCB-01-D	Alúmina SCB-01-C	Alúmina molturada*	Alúmina SC-13	Caolín ER/N
D_{50} (μm)	4.0	9.7	21.6	89.2	4.2

*Alúmina $\alpha 4$ molturada en molino de bolas de laboratorio.

2.2. Preparación y caracterización de las membranas

Se ensayaron un total de ocho composiciones diferentes, variando el tipo de alúmina utilizada y el porcentaje de almidón en la mezcla, pero sin alterar la relación alúmina/caolín seleccionada previamente. Las composiciones y las referencias de las mezclas se detallan en la tabla 2.

TABLA II. COMPOSICIONES Y TIPO DE ALÚMINA UTILIZADAS EN LA SÍNTESIS DE LAS MEMBRANAS (% EN PESO)

Referencia	A	B	C	D	E	F	G	H
Almidón	-	-	-	-	5.00	10.00	15.00	20.00
Caolín	50.50	50.50	50.50	50.50	47.98	45.45	42.92	40.40
Alúmina	49.50	49.50	49.50	49.50	47.02	44.55	42.08	39.60
	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$

Las materias primas se homogeneizaron vía húmeda con acetona en un molino de bolas. La suspensión obtenida se secó bajo lámparas de infrarrojos y se humectó a un contenido en agua de 5.5 kg H_2O /kg sólido seco. Con el polvo húmedo se conformaron probetas de 5 cm de diámetro, por prensado en seco unidireccional a diferentes presiones, en una prensa automática de laboratorio.

Las probetas se sometieron a diferentes tratamientos térmicos en un horno eléctrico, dotado de programador para mantener el ciclo deseado. Las muestras carentes de almidón se sinterizaron con un calentamiento a 25°C/min

hasta la temperatura máxima establecida, seguido de una permanencia estipulada a dicha T_{max} para finalizar con un enfriamiento natural. En las muestras con almidón se incluyó un tratamiento térmico a 300°C para oxidarlo por completo antes de iniciarse la sinterización propiamente dicha.

Tras la sinterización, en cada muestra se determinó la densidad aparente por inmersión en mercurio, la distribución de tamaño de poro por porosimetría de intrusión de mercurio (Autopore III, Micromeritics, Norcross, USA), y las fases cristalinas presentes por DRX (PW 1840 Phillips. Eindhoven, The Netherlands). La permeabilidad al agua se determinó con un permeámetro de líquidos (LEP-1101-A, PMI, Ithaca, NY, USA). También se midió la densidad real del material sinterizado mediante un picnómetro de helio (Ultrapycnometer 1000, Quantachrome, Boyton Beach, FL, USA).

2.3. Caracterización funcional en el reactor

De todas las membranas sintetizadas se seleccionó una muestra representativa de las diferentes distribuciones porosimétricas obtenidas, para determinar su funcionalidad en el reactor electroquímico.

La caracterización funcional se llevó a cabo en un reactor electroquímico de laboratorio de compartimentos separados. Una vez montado el reactor se colocaron 200 ml de H_2SO_4 0.5 M en el compartimento catódico y 200 ml de una disolución 0.1 M en Cr(III), 0.1 M en Cr(VI) y 0.5 M en H_2SO_4 en el compartimento anódico. Cada experiencia se realizó en unas condiciones de trabajo prefijadas, 10 o 15 V cuando se trabajó a potencial constante, o 1.5 o 2.5 A cuando se trabajó a intensidad constante.

En operaciones a potencial constante se siguió la evolución de la intensidad con el tiempo, tomando medidas cada cinco minutos, mientras que el contenido en Cr(VI) se analizó a intervalos de 15 o 30 minutos según el experimento. Finalmente se calculó el rendimiento en la recuperación del cromo para evaluar el comportamiento del separador.

3. RESULTADOS

3.1. Relación entre el tratamiento térmico y las fases cristalinas generadas.

Inicialmente se analizó la relación entre el tratamiento térmico y las fases cristalinas que se generan en las membranas con las composiciones A, B, C y D, conformadas a una presión de 250 kg/cm². Los resultados indican que, independientemente de la alúmina utilizada, sólo se detectan cuatro fases cristalinas, cuarzo, corindón, mullita y cristobalita. Las dos primeras proceden de las materias primas (el caolín contiene cierta proporción de cuarzo), y las otras dos se generan durante el tratamiento térmico.

La génesis de la mullita es uno de los objetivos del tratamiento térmico, sin embargo la presencia de cristobalita resulta perjudicial de cara al procesado de la membrana, debido al cambio alotrópico que sufre a 200°C, y que conlleva una variación de volumen notable. Una elevada proporción de cristobalita puede generar grietas en la membrana durante el tramo de enfriamiento del tratamiento térmico, y por lo tanto reducir la resistencia mecánica, así como modificar la distribución de tamaño de poro.

Los ensayos realizados con la composición A sometida a diferentes tratamientos térmicos, indican que la mullita

comienza a sintetizarse tras una hora de tratamiento a 1200°C, y que la proporción de ésta aumenta lentamente al prolongar la permanencia a dicha T_{max} . Por el contrario la cristobalita sólo comienza a detectarse tras cuatro horas de tratamiento a 1200°C, y su proporción aumenta notablemente al prolongar el tratamiento (figura 2). Si se desea eliminar la cristobalita elevando la temperatura máxima del tratamiento térmico, se aprecia que es necesario alcanzar temperaturas de 1500°C para conseguirlo, ya que a temperaturas intermedias se favorece la génesis de esta fase, si bien paralelamente se incrementa la proporción de mullita.

El análisis por DRX de las membranas sintetizadas a partir de las composiciones B, C y D, manteniendo el tratamiento térmico de 4h a 1200°C, mostró que las proporciones de cuarzo y mullita apenas presentaban variaciones con respecto a las obtenidas con la composición A (figura 3), lo cual confirma que prácticamente toda la mullita generada proviene del caolín, y apenas se produce la reacción entre la sílice residual y la alúmina presente en las condiciones de trabajo utilizadas. Tampoco se detectó la presencia de cristobalita, confirmando los resultados obtenidos con la composición A. Por ello se escogió dicho tratamiento térmico para sinterizar el resto de membranas elaboradas.

3.2 Relación entre las propiedades de las membranas y las condiciones de operación utilizadas en su preparación

3.2.1. Efecto del tamaño de partícula de la alúmina utilizada

Las membranas sintetizadas a partir de las mezclas A, B, C y D, presentaron unas propiedades bastante similares entre sí, tanto en densidad aparente como en distribución de tamaño de poro (tabla 3 y figura 4). Para calcular la porosidad total se midió la densidad real del material obtenido tras la sinterización, cuyo valor es 3.26·10³ kg/m³. Las distribuciones de tamaño de poro indican que la porosidad total y el tamaño medio de poro, apenas varían a pesar de las grandes

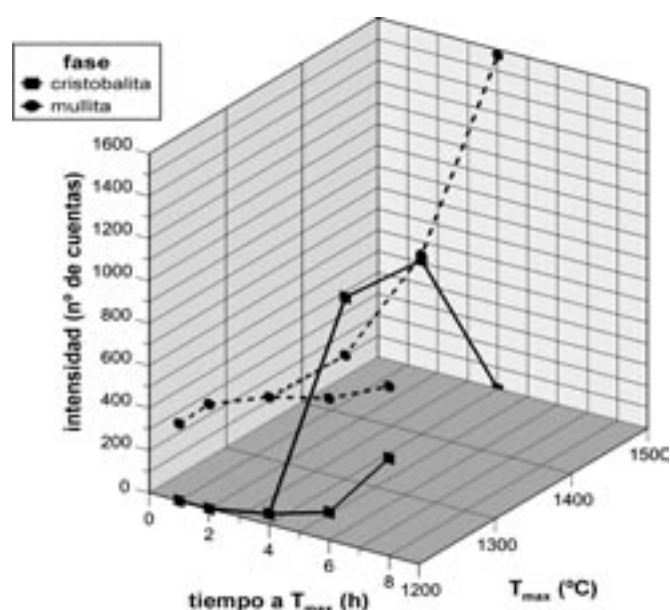


Fig. 2- Evolución de la intensidad de las reflexiones I_{100} de la mullita y la cristobalita para las membranas sintetizadas a partir de la composición A con distintos tratamientos térmicos.

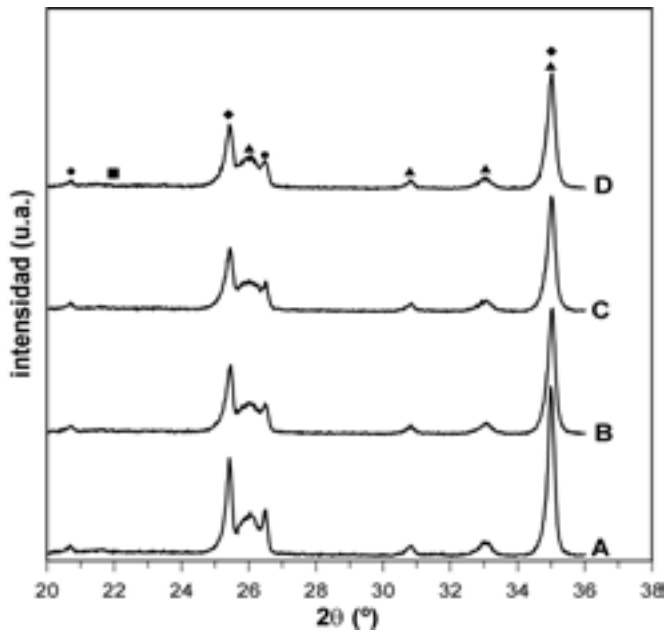


Fig. 3- Detalle de los difractogramas correspondientes a las membranas sintetizadas a partir de las composiciones A, B, C y D, sinterizadas con un ciclo de 4 h de permanencia a 1200°C (• cuarzo, ♦ corindón, ■ cristobalita, ▲ mullita).

diferencias en la distribución de tamaños de partícula de las alúminas utilizadas, lo cual indica que dicha distribución está gobernada principalmente por la presencia del caolín, que rellena gran parte de los intersticios presentes entre las partículas de alúmina, y por tanto si se desea obtener membranas con diferente distribución porosimétrica hay que recurrir a otros procedimientos, como modificar la presión de prensado o incorporar materia orgánica a la mezcla de materias primas.

TABLA III. PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS SINTETIZADAS A PARTIR DE DIFERENTES ALÚMINAS (PRESIÓN DE PRENSADO 250 KG/CM²).

Muestra	Diámetro medio de poro (μm)	Densidad aparente (kg/m ³)	Porosidad (-)
A	0.37	1620±10	0.50±0.01
B	0.39	1650±10	0.50±0.01
C	0.30	1630±10	0.50±0.01
D	0.33	1660±10	0.49±0.01

3.2.2. Efecto de la incorporación de almidón

A partir de las composiciones con diferentes porcentajes de almidón (A, E, F, G, y H), se sintetizaron membranas utilizando una presión de prensado de 500 kg/cm² y el tratamiento térmico de 4 horas de permanencia a 1200°C, si bien introduciendo una permanencia a 300°C para oxidar el almidón. Las muestras obtenidas presentaron grandes diferencias en densidad aparente, porosidad y distribución de tamaño de poro (tabla 4). Al incrementar la proporción de almidón en la mezcla, aumentaba tanto el tamaño medio de poro como la porosidad total de la muestra, a la vez que disminuía la densidad aparente. Estos resultados indican que con la incorporación del almidón se había logrado el resultado deseado, ya que se había modificado de forma notable la

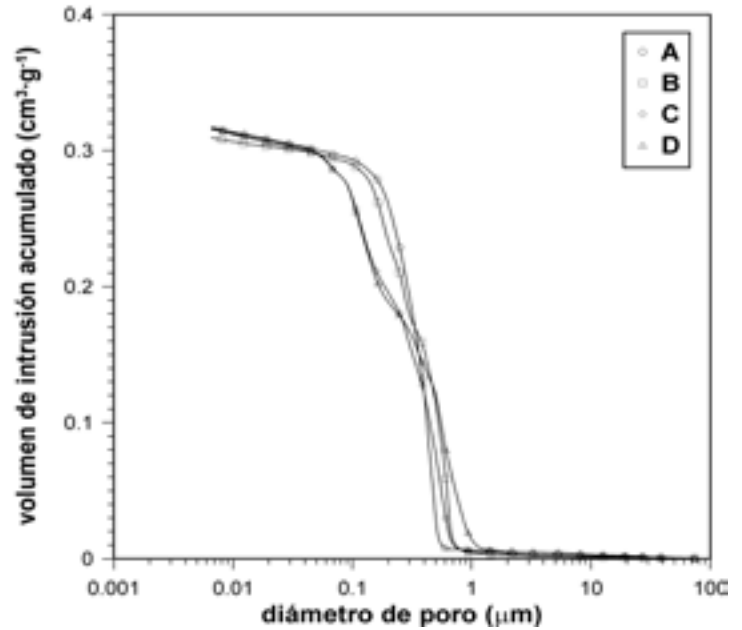


Fig. 4- Distribuciones de tamaño de poro de las membranas sintetizadas a partir de las mezclas A, B, C y D (tratamiento térmico 4h a 1200°C).

microestructura de la membrana.

Como corresponde a la mayor apertura de la microestructura de las membranas, el coeficiente de permeabilidad también

TABLA IV. PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS SINTETIZADAS A PARTIR DE MEZCLAS CON DIFERENTES PROPORCIONES DE ALMIDÓN (PRESIÓN DE PRENSADO 500 KG/CM²).

Muestra	Diámetro medio de poro (μm)	Densidad aparente (kg/m ³)	Porosidad (-)	Permeabilidad (m ²)
A	0.29	1810±10	0.45±0.01	4.1·10 ⁻¹⁶
E	0.33	1670±10	0.49±0.01	6.2·10 ⁻¹⁶
F	0.38	1560±10	0.52±0.01	9.0·10 ⁻¹⁶
G	0.40	1440±10	0.56±0.01	16.1·10 ⁻¹⁶
H	0.51	1320±10	0.60±0.01	26.2·10 ⁻¹⁶

muestra un aumento notable a medida que se incrementaba la proporción de almidón en la mezcla de materias primas (tabla 4), evolución que sigue una tendencia exponencial con bastante aproximación (figura 5). Este hecho manifiesta la importancia que tienen los poros creados por la oxidación del almidón sobre la permeabilidad de la membrana.

La incorporación del almidón permite alterar apreciablemente la microestructura porosa de la membrana, y aumentar la permeabilidad de la misma. Con dicho método se modifican simultáneamente el volumen total de poro y el tamaño medio de los mismos, sin que haya posibilidad de modificar ambas variables por separado, lo cual podría resultar de interés para mejorar la selectividad de la membrana al paso de los diferentes iones. Sin embargo este método implica incorporar un tratamiento térmico a baja temperatura para oxidar la materia orgánica, lo cual complica su futura obtención a escala industrial.

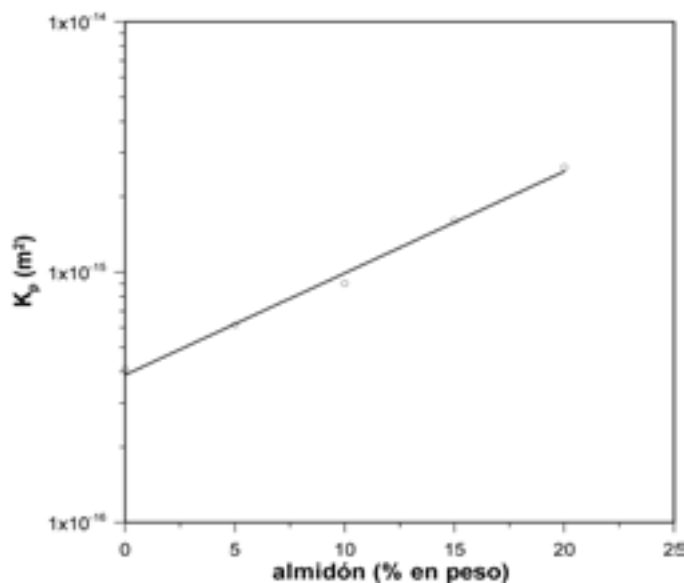


Fig. 5- Evolución del coeficiente de permeabilidad de las membranas frente al porcentaje de almidón presente en la mezcla utilizada para sintetizarlas.

3.2.3. Efecto de la variación de la presión de prensado

Para analizar la posibilidad de ejercer un mayor control sobre la estructura porosa de las membranas, y por tanto sobre su permeabilidad, se realizaron experimentos con las dos composiciones extremas en el intervalo de composiciones ensayado (composiciones A y H), modificando la presión de prensado entre 250 kg/cm² (mínima presión para conseguir una probeta con suficiente resistencia mecánica en crudo), y 700 kg/cm² (presión máxima del equipo). Las propiedades medidas se detallan en la tabla 5.

Para ambas composiciones se produce una disminución en la permeabilidad de las membranas obtenidas a medida que se incrementa la presión de prensado, siguiendo una

TABLA V. PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS SINTETIZADAS A PARTIR DE LAS COMPOSICIONES A Y H, A DISTINTAS PRESIONES DE PENSADO.

Muestra	Presión (kg/cm²)	Diámetro medio de poro (µm)	Densidad aparente (kg/m³)	Porosidad (-)	Permeabilidad (m²)
A	250	0.37	1620±10	0.49±0.01	7.1·10 ⁻¹⁶
	500	0.29	1810±10	0.45±0.01	4.1·10 ⁻¹⁶
	700	0.26	1870±10	0.43±0.01	3.4·10 ⁻¹⁶
H	250	0.68	1210±10	0.63±0.01	50.2·10 ⁻¹⁶
	500	0.51	1320±10	0.60±0.01	26.2·10 ⁻¹⁶
	700	0.48	1370±10	0.58±0.01	21.7·10 ⁻¹⁶

tendencia aproximadamente potencial y prácticamente paralelas entre sí (figura 6), lo cual indica que el cambio relativo en la permeabilidad de la membrana en función de la presión de prensado, es casi independiente de la presencia del almidón. Este hecho apunta a que el almidón no altera el mecanismo por el cual la mayor presión de prensado reduce la permeabilidad de la probeta.

3.2.4. Relación entre las propiedades microestructurales y la permeabilidad

Aunque se han establecido unas relaciones directas entre las condiciones de operación durante la síntesis de

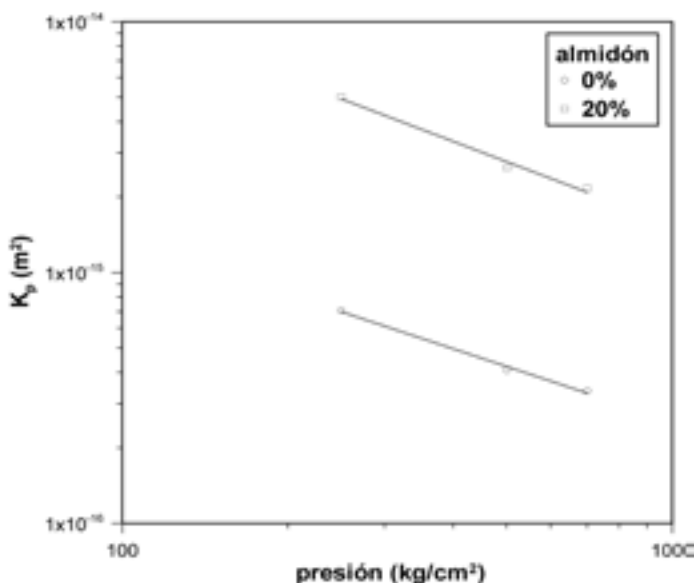


Fig. 6- Evolución del coeficiente de permeabilidad de las membranas frente a la presión utilizada en su conformado, para dos proporciones de almidón en la mezcla inicial.

las membranas y la permeabilidad de las mismas, también es posible relacionar las propiedades microestructurales de las probetas y la permeabilidad, utilizando la ecuación (2). A partir de dicha ecuación se deduce que debe existir una relación lineal entre K_p y el producto $\epsilon \cdot r_0^2$ cuya constante de proporcionalidad será inversamente proporcional al cuadrado de la tortuosidad, suponiendo que ésta sea una constante. Si se asume que el radio medio del canal se puede igualar al diámetro medio de poro obtenido a partir de las distribuciones porosimétricas, se obtiene una dependencia lineal entre ambas variables (figura 7), pero que no pasa por el origen de coordenadas, tal como sería de esperar por la ecuación de Kozeny-Carman. Esta desviación respecto a la tendencia teórica puede justificarse considerando que se ha

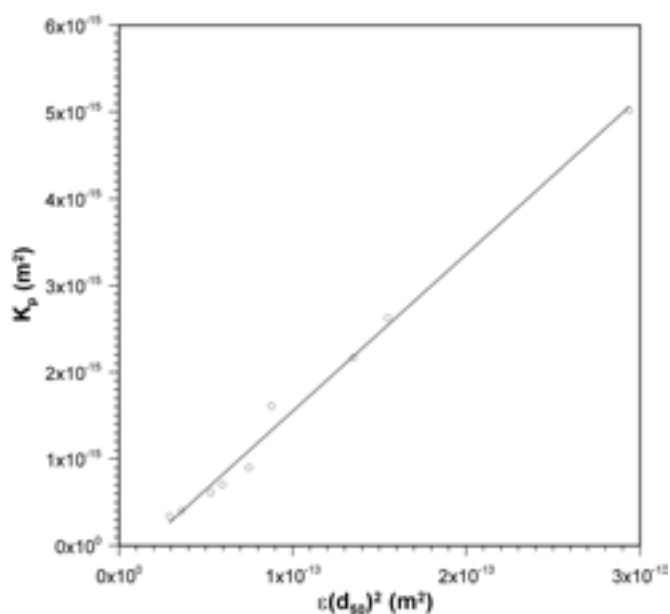


Fig. 7- Relación entre el coeficiente de permeabilidad de las membranas, con la porosidad y el diámetro medio de poro, según la ecuación de Kozeny-Carman.

supuesto la tortuosidad de los canales como independiente del procesado de las membranas, cuando es muy posible que dicho parámetro varíe de unas muestras a otras, sobre todo cuando mayor sea la proporción de almidón incorporada en las probetas, ya que la porosidad de la membrana aumenta y por tanto es probable que los canales disponibles para el flujo de agua presenten menos recodos.

Utilizando la pendiente de la recta de ajuste para calcular la tortuosidad de las membranas sintetizadas, se obtiene un valor de $\lambda = 1.31$, que es del mismo orden que los hallados en la bibliografía para otros tipos de materiales porosos (7).

3.3. Comportamiento de las membranas en el reactor electroquímico

El porcentaje de Cr(VI) recuperado en el reactor electroquímico utilizando como separadores alguna de las membranas elaboradas, demostró que esta variable es poco sensible a la presión utilizada en el conformado de la membrana cuando ésta se sintetiza a partir de una mezcla carente de almidón (figura 8), pero en cambio presenta una evolución decreciente a medida que se incrementa el porcentaje de almidón utilizado en su elaboración (figura 9). Esto se traduce en un efecto desfavorable cuando se incrementa la porosidad de la membrana, pero no tanto cuando se reduce esta variable por un aumento de presión.

Los resultados muestran que las membranas con una permeabilidad intermedia, como es la membrana obtenida a partir de la mezcla A y conformada con una presión de 500 kg/cm² es la que presenta mejores propiedades de cara a la función de separador en el reactor electroquímico. Posiblemente debido a que posee un equilibrio adecuado entre los distintos parámetros microestructurales que influyen sobre el transporte de los diferentes iones a su través, extremo que está siendo sometido a investigación y que será objeto de otras publicaciones.

4. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la síntesis de membranas cerámicas destinadas a la función de separadores en un reactor electroquímico, destinado al reciclado de baños de cromado agotados. Los resultados indican que es posible obtener dichas membranas a partir de materiales económicos como el caolín y la alúmina, utilizando unas condiciones de procesado poco exigentes (conformado por prensado en seco unidireccional y sinterización a temperatura moderada). Con este procedimiento se obtienen membranas constituidas por fases cristalinas que poseen una elevada resistencia química, y además presentan las características microestructurales adecuadas. Se ha comprobado que membranas con microestructuras demasiado abiertas o demasiado cerradas no dan lugar a un buen comportamiento en el reactor electroquímico, ya que no se consiguen porcentajes de recuperación de cromo tan elevados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida por el Ministerio de Educación, Ciencia y Cultura a través de los proyectos de investigación MAT2000-0622 y MAT2003-04199-CO2-O2.

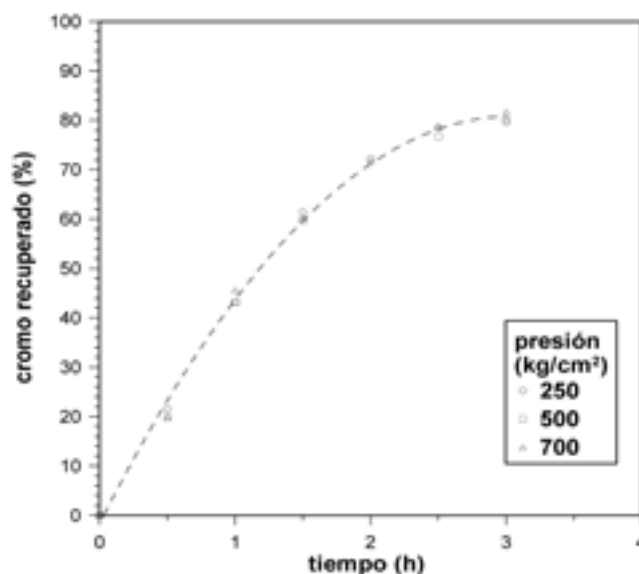


Fig. 8- Evolución del porcentaje de cromo recuperado en el reactor electroquímico frente al tiempo, utilizando como separadores membranas obtenidas a partir de la composición A, conformadas a tres presiones de prensado diferentes.

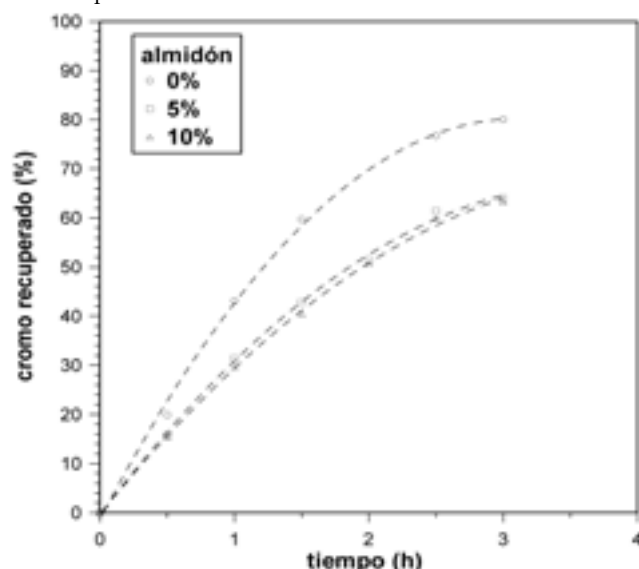


Fig. 9- Evolución del porcentaje de cromo recuperado en el reactor electroquímico frente al tiempo, utilizando como separadores membranas obtenidas a partir de mezclas con tres proporciones de almidón diferentes, y la misma presión de prensado (500 kg/cm²).

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Deepak, A.K. Gupta. "Hexavalent Chromium Removal from Wastewater" Indian J. Environ. Hlth. 33, 297-302 (1991).
2. S.L. Guddati, T.M. Holsen, C.C. Li, J.R. Selman, N.V. Mandich. "The use of a porous ceramic diaphragm for the removal of metallic impurities from chromium plating baths" J. Applied Electrochemistry. 29, 1129-1132 (1999).
3. N.V. Mandich, C.C. Li, J.R. Selman. "Practical and theoretical aspects of regeneration of chromic acid plating solutions via electrolytic purification" Plating and Surface Finishing. 84, 82-90 (1997).
4. R. Morrell. Handbook of properties of technical & engineering ceramics. pp 198 Her Majesty's Stationery Office. London. (1985).
5. N.P. Cheremisinoff, D.S. Azbel. "Flows through porous media" en Liquid filtration. pp 4-5 Ann Arbor Science. Woburn, Massachusetts. (1983).
6. P.C. Carman. Trans. Inst. Chem. Eng. 15, 150-166 (1937).
7. C.N. Satterfield. "Diffusion" en Mass transfer in heterogeneous catalysis. pp 38-39 M.I.T. Press, Cambridge. (1972).

Recibido: 09.01.05

Aceptado: 14.03.05