



**PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS DE NÍQUEL SOBRE NANOTUBOS DE CARBONO POR ELECTROLESS Y SU APLICACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO**

Mayra Zyzlila Figueroa-Torres<sup>1</sup>, Carlos Domínguez-Ríos<sup>1</sup>, José Gerardo Cabañas-Moreno<sup>2</sup>, Karina Suarez-Alcántara<sup>2</sup>, Alfredo Aguilar-Elguézabal<sup>1</sup>.

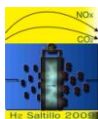
<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.  
Depto. de Química de Materiales. Miguel de Cervantes 120,  
Complejo Industrial Chihuahua, CP. 31130, Chihuahua, Chihuahua, México.  
Tel +52 614 4391109; fax: +52 614 4391130.

E-mail: [alfredo.aguilar@cimav.edu.mx](mailto:alfredo.aguilar@cimav.edu.mx) [m\\_zyzlila@yahoo.com.mx](mailto:m_zyzlila@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencia de Materiales, ESFM-IPN UP-ALM,  
Apdo. Postal 21-408, C.P. 04021, México, DF, México

RESUMEN

La búsqueda de un sistema de almacenamiento apropiado para la industria del transporte se ha convertido en un tema estratégico de investigación para poder implementar el uso del hidrógeno como portador de energía. Los nanotubos de carbono (NTC) son materiales potencialmente interesantes en el almacenamiento de hidrógeno. En este trabajo se investigaron las condiciones de depósito para dispersar en un sólo paso nanopartículas de níquel por la técnica de electroless sobre la superficie de los nanotubos de carbono y se estudió su influencia en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Los materiales se caracterizaron por microscopía electrónica de barrido y transmisión. Mediante isothermas de adsorción de nitrógeno se determinó el área superficial de los materiales. La capacidad de almacenamiento de hidrógeno se estudió a la temperatura de 77 K y presión atmosférica y también a 303 K y presiones de 0.1-5 MPa. Los resultados muestran que se obtuvieron nanopartículas esféricas de níquel altamente dispersas sobre los nanotubos de carbono con un tamaño promedio de 3-9 nm. La adición de níquel sobre los nanotubos de carbono mejora significativamente su capacidad de almacenamiento de hidrógeno, se encontró que a 303 K y 5 MPa el factor de incremento fue de hasta 2 veces en comparación con los nanotubos sin níquel.

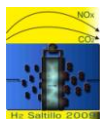


### 1.- Introducción

El desarrollo y la implementación de combustibles alternos que sean medioambientalmente aceptables es un área de gran interés. El hidrógeno como portador de energía es una de las mejores opciones que existen para usarse como combustible no contaminante. La mejor característica que ofrece es su poder calorífico por unidad de masa, siendo el más alto dentro del grupo de los combustibles químicos y es casi 3 veces mayor al del petróleo. Sin embargo, el hidrógeno a temperatura ambiente y presión atmosférica es un gas y su densidad por unidad de volumen es baja, siendo esto lo que genera dificultades físicas y económicas en su almacenamiento<sup>1</sup>. Se han llevado a cabo a nivel mundial una gran cantidad de investigaciones para desarrollar materiales que cumplan los requisitos de almacenamiento de hidrógeno para la industria automotriz con la intención de hacerlo competitivo con los combustibles fósiles<sup>2</sup>.

La adsorción de hidrógeno en nanoestructuras de carbono mediante fisisorción es una alternativa prometedora para reducir el elevado volumen que implica su almacenamiento<sup>2-4</sup>. Los NTC llamaron la atención como posibles materiales para adsorber hidrógeno sobre todo porque su interior es hueco y el hidrógeno podría adsorberse en la pared interna y externa<sup>1</sup>. Se ha demostrado que los compuestos nanoestructurados constituidos por NTC-metales o NTC-óxidos son buenos materiales para almacenar hidrógeno porque se logra incrementar la capacidad de almacenamiento y se mejora la cinética de adsorción ya que se consigue un estado de hibridación especial s-p-d, adicionalmente, en estos sistemas, los metales disocian la molécula de hidrógeno difundiendo el hidrógeno atómico hacia la superficie de los NTC por medio del fenómeno de spillover<sup>3-6</sup>. Para que este tipo de materiales tengan un buen desempeño en el almacenamiento de hidrógeno es indispensable que las nanopartículas metálicas se encuentren en la pared externa, también debe de existir un contacto íntimo entre el metal y la superficie de los NTC y que el metal se encuentre altamente disperso, lo cual lo determina en gran medida la técnica utilizada para depositarlos<sup>7,9,10</sup>. Los sistemas NTC-metal más estudiados son Ti, V, Pd y Pt<sup>6-10</sup>. Sin embargo, el sistema NTC-Ni ha sido muy poco estudiando a pesar de que se han reportado buenos resultados en el almacenamiento de hidrógeno y a las ventajas desde el punto de vista económico e industrial que ofrece el níquel<sup>11,12</sup>.

Experimentalmente resulta complicado dispersar metales sobre la superficie de los NTC que estén formados por aglomerados de unos cuantos átomos metálicos. Las técnicas convencionales para sintetizar CNT-metales son molienda mecánica, reducción en fase condensada, impregnación incipiente y microemulsión, los resultados publicados muestran que es difícil controlar la cantidad y la morfología final de las partículas y en algunos casos se destruye la estructura intrínseca de los NTC<sup>6-10</sup>.



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos para la formación de compuestos NTC-Ni utilizando la técnica de electroless como una ruta alterna de síntesis. Las condiciones de depósito convencionales para obtener recubrimientos metálicos de níquel se modificaron para depositar nanopartículas de níquel altamente dispersas en la superficie externa de los NTC. La capacidad de adsorción de hidrógeno de estos compuestos se analizó a baja temperatura (77 K) y presión atmosférica así como a presiones de 0.1-5 MPa y 303 K.

### 2.- Condiciones experimentales

Los NTC multiparedes se prepararon a partir de una mezcla de hidrocarburos-ferroceno en el interior de un tubo de cuarzo a 1123 K. Los hidrocarburos utilizados fueron tolueno y acrilonitrilo. La mezcla hidrocarburo-ferroceno se introdujo utilizando un flujo de argón de 1 L/min.

Los NTC se funcionalizaron por activación química con KOH en una relación en peso de 1 NTC: 4 KOH con un flujo de  $N_2$  de 150 cm<sup>3</sup>/min a 1073 K durante 30 minutos. Después del proceso de activación los NTC se lavaron con HCl (5M) y después con HNO<sub>3</sub> (3M), se enjuagaron varias veces con agua destilada y se dejaron secar en una estufa durante 8 h a 383 K.

Para depositar el níquel en los NTC se empleó la técnica de Electroless. Se utilizaron varios baños con diferentes concentraciones de la sal de níquel y se probaron dos agentes reductores. Las características de los baños utilizados y las condiciones experimentales para cada baño se muestran en la tabla I.

**Tabla I.** Componentes, concentraciones y condiciones experimentales de los baños de electroless

		DMAB			Baño con hidracina	
		A	B	C	g/L	
		g/L	g/L	g/L		
Fuente de Ni	NiSO <sub>4</sub> •6H <sub>2</sub> O	57.6	40	30	Ni(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O	29.86
Acomplejante	Na <sub>3</sub> (citrato)	44	30.7	23	Na <sub>2</sub> EDTA	5.96
Estabilizador	2MBT mg/L	12.5	8.7	5	Ácido láctico	13.51
Agente reductor	DMAB	23.6	15.3	3.9	Hidracina	12.82
					NaOH	7.5
Condiciones experimentales	pH	6			pH	9.6
	Temperatura	333-353 K			Temperatura	333-353 K
	Tiempo	5-60 min			Tiempo	5-60 min



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

Las concentraciones de los baños con DMAB (Complejo de dimetilaminoborano) se tomaron del trabajo realizado por Mallory and Hajdu<sup>13</sup> y el de hidracina del trabajo de Haag et al<sup>14</sup>. Estos baños fueron diseñados para recubrir con Ni superficies metálicas así que el proceso se modificó para promover el depósito sobre los NTC. Los baños de electroless se prepararon en un vaso de precipitado con agua tridestilada mezclando los reactivos siguiendo el orden mostrado en la tabla I. El baño de electroless se deja en agitación durante 24 horas antes de ser utilizado. Se colocaron 0.15 g de NTC en 100 mL de solución. Previo al depósito se dispersaron en ultrasonido y después se realizó el depósito a la temperatura y tiempo de inmersión deseados. Los nanotubos se separan del baño mediante filtración. Se enjuagan varias veces con agua destilada y se dejan secar al aire en una estufa a 383 K por 8 horas.

La morfología de los depósitos así como la dispersión de níquel se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) en un microscopio Jeol JSM-7401 así como por microscopía electrónica de transmisión (TEM) en un microscopio marca Philips modelo CM-200 con un voltaje de aceleración de 200 KV, estos aparatos se encuentran equipados con un sistema para espectroscopia de rayos-X (EDS) marca EDAX, el cual se utilizó para identificar las partículas de níquel.

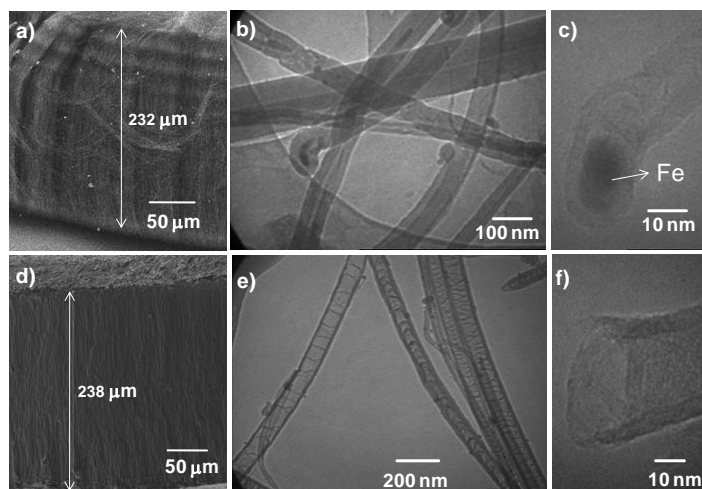
La evaluación de los parámetros texturales se realizó en el equipo Quantachrome Autosorb 1 mediante la adsorción de N<sub>2</sub> a 77 K y presiones relativas ( $P/P_0$ ) de 0.05 a 0.995. Previo a las mediciones, las muestras se desgasificaron a 573 K durante 3 h. El área superficial BET ( $A_{BET}$ ) se calculó a partir de la isoterma de adsorción aplicando la ecuación BET. El volumen total ( $V_T$ ) se determinó a 0.95  $P/P_0$ .

Las isotermas de adsorción de hidrógeno a presión atmosférica y 77 K se realizaron en el equipo Quantachrome Autosorb 1 en el intervalo de presiones relativas  $P/P_0$  de 0.05 a 0.995.  $P_0$  es casi igual a la presión atmosférica y corresponde a 87992 Pa para la ciudad de Chihuahua. La capacidad de almacenamiento de hidrógeno se calculó utilizando la ecuación de los gases ideales y el valor del volumen de hidrógeno adsorbido cuando  $P/P_0$  es de 0.995. Se utilizó hidrógeno de alta pureza para estas mediciones.

La evaluación de la adsorción de hidrógeno a altas presiones y 303 K se llevó a cabo en un sistema gravimétrico equipado con una microbalanza y levitación magnética PCTM-6000 (Techno System CO. LTD). Previo a las mediciones, las muestras se pre-trataron a 673 K por 2 horas en vacío. Las mediciones se realizaron a temperatura constante de 303 K y la presión se incrementó en el intervalo de 0.1 MPa a 5 MPa. La cantidad de hidrógeno adsorbida se calculó por el cambio de peso presentado en la muestra utilizando el software proporcionado por el proveedor.

## 3.- Resultados y discusión

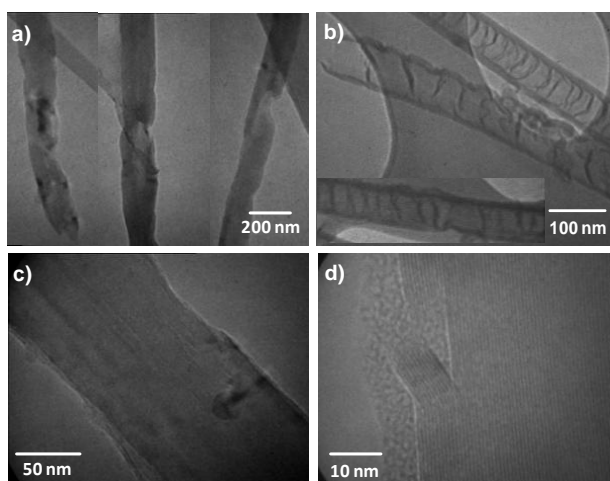
En la figura 1 se muestra la morfología de los NTC sintetizados con tolueno y acrilonitrilo. Los NTC multiparedes crecen de manera perpendicular sobre la superficie interna del tubo de cuarzo con una longitud aproximada de 230  $\mu\text{m}$  (Figura 1a y 1d). Su diámetro externo varía entre 30 y 80 nm.



**Figura 1.** Micrografías de los NTC a), b) y c) tolueno; d), e) y f) acrilonitrilo.

La principal diferencia entre los nanotubos sintetizados con tolueno y acrilonitrilo es el número de paredes internas. Los NTC de tolueno tienen muchas paredes internas, el diámetro interior es pequeño y la mayoría de los externos se encuentra tapados por átomos de Fe. En la figura 1e se puede apreciar que los NTC de acrilonitrilo presentan pocas paredes internas, el espesor de estas paredes es de aproximadamente 15 nm por ello su diámetro interior es grande, de alrededor de unos 70 nm, esta característica no es común en los NTC multiparedes convencionales sintetizados con fuentes de carbono como hexano, benceno o tolueno. Además, las puntas no se encuentran bloqueadas por átomos de Fe, la mayoría de estos átomos se localizan en las paredes externas en forma de nanopartículas esféricas.

La figura 2 ilustra la morfología de los NTC después de que se sometieron a activación química con KOH. Con este tratamiento se generan defectos sobre la superficie externa de los nanotubos además de que se quedan anclados grupos funcionales de oxígeno.



**Figura 2.** Micrografías de los NTC después del proceso de activación con KOH.

Aunque se generan una gran cantidad de defectos superficiales y parte de las paredes externas se desprenden los NTC conservan su forma tubular característica. En algunos casos los nanotubos se trozan. La mayoría del Fe se elimina con el tratamiento con ácidos aplicado después del proceso de activación y los extremos de los NTC de tolueno se destapan.

### 3.1. Dispersión de níquel por Electroless.

Para la dispersión de níquel por electroless se utilizaron dos agentes reductores el DMAB y la hidracina. Primero se hicieron varios experimentos utilizando NTC sin tratamiento. En todos los experimentos realizados no se deposita el níquel aún cuando la temperatura de depósito fue de 353 K y tiempos de inmersión de 60 minutos. En los trabajos<sup>15-17</sup> donde se han hecho depósitos de níquel por electroless, previo al depósito, los NTC se sometieron a un tratamiento de sensitización-activación de la superficie. Este tratamiento consiste en sensibilizar la superficie externa de los NTC con  $\text{SnCl}_2$  para posteriormente activarla depositando semillas de Pd, los cuales actúan como sitios donde inicia la reacción de electroless y se anclan los primeros átomos de níquel.

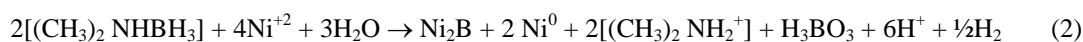
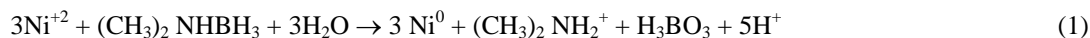
En los NTC activados con KOH (funcionalizados) se depósito níquel sin llevar a cabo el tratamiento de sensitización-activación. La principal diferencia entre los NTC sin tratamiento y los funcionalizados es que en la superficie de los funcionalizados, se encuentran anclados en la pared externa una gran cantidad de grupos  $\text{OH}^-$ , los cuales reaccionan con los iones de níquel del baño formando un hidróxido de níquel, éste queda

anclado en la superficie externa de los NTC, posteriormente, este hidróxido de níquel es reducido por el agente reductor (DMAB o hidracina) formando así las primeras semillas de níquel para la subsecuente formación de aglomerados de nanopartículas de níquel y si el tiempo de inmersión es prolongado los aglomerados van creciendo hasta formar una película de níquel (Figura 3).



**Figura 3.** Etapas del depósito de Níquel por electroless en los NTC.

Cuando se utiliza como agente reductor el DMAB algo del boro se co-deposita debido a la descomposición del agente reductor obteniéndose así una mezcla de fases Ni + Ni<sub>2</sub>B. La reacción de reducción involucra la formación de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> y el desprendimiento de 3 iones hidruro (H<sup>-</sup>), los cuales proporcionan el par de electrones para reducir los iones de níquel. La reducción de Ni<sup>+2</sup> con DMAB se describe de acuerdo a las reacciones 1 y 2<sup>13</sup>:



Cuando se utiliza la hidracina se obtienen depósitos sólo de níquel de alta pureza. La hidracina se oxida dando como productos de reacción N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y la reacción de reducción es la siguiente<sup>13</sup>:

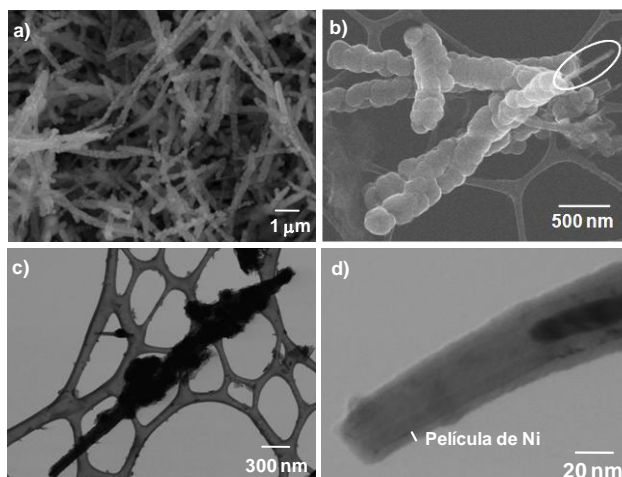


La hidracina se caracteriza por ser un poderoso agente reductor, la reacción anterior explica la eficiencia de la hidracina para reducir el ion Ni<sup>+2</sup> ya que lo reduce sin la necesidad de formar especies intermedias.

Con los baños DMAB se observó que ya sea a 353 K, 343 K ó 333 K si el tiempo de depósito es menor a 5 minutos no se deposita níquel. Las primeras semillas de níquel se depositan entre 8 y 10 minutos de tiempo de inmersión. Pero una vez que se han depositado esas semillas la velocidad de la reacción incrementa considerablemente, además, la reacción tiene un carácter autocatalítico, es decir, el níquel se deposita de



manera continua y el depósito no se detiene hasta que se agotan los iones  $\text{Ni}^{2+}$  ó se descompone por completo el agente reductor. Por ello, con los baños DMAB es muy complicado controlar la velocidad de la reacción y evitar que se recubran los NTC ya que una vez que se han depositado los primeros núcleos de níquel, se observó que en sólo unos cuantos minutos (entre 11 y 15 minutos de inmersión) se recubren por completos los NTC y el depósito se aprecia a simple vista. En la figura 4 se muestra la morfología de los depósitos de níquel en los NTC obtenidos con el baño DMAB-A y la temperatura de depósito de 353 K.



**Figura 4.** Micrografías de los depósitos de Ni con el baño DMAB-A a 353 K y 15 min de inmersión

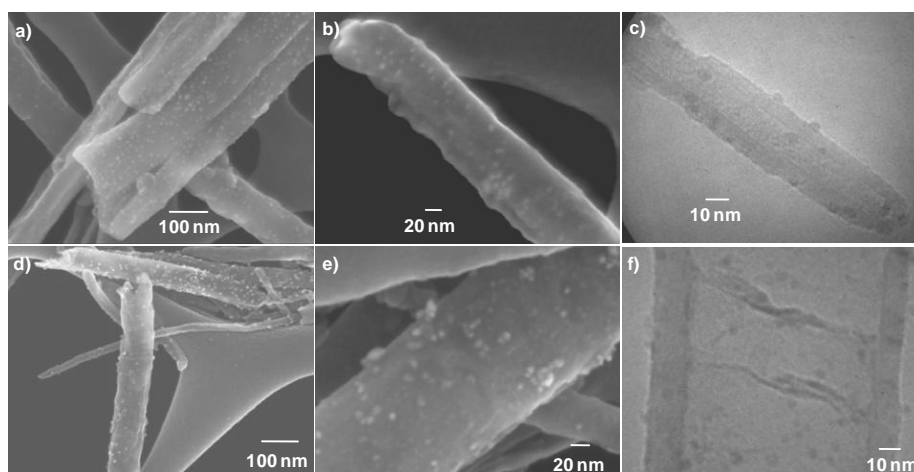
En la figura 4a se observa que los nanotubos se encuentran recubiertos por completo. Si se hace un acercamiento, en las figuras 4b, 4c y 4d es posible apreciar que la cantidad de níquel depositado es tanta que se forman esferas de níquel alineadas a lo largo de la pared externa de los NTC y que también hay zonas donde el recubrimiento es poco (figura 4d). Estos resultados no son deseables en aplicaciones para adsorción de hidrógeno ya que se bloquean los sitios preferenciales para la adsorción del hidrógeno y el acceso al interior de los NTC.

Para tratar de controlar la velocidad de la reacción y obtener nanopartículas de níquel se realizaron experimentos con este mismo baño disminuyendo la temperatura de depósito a 343 K, sin embargo, el resultado fue el mismo que a 353 K, es decir, rápidamente se recubren los NTC. Si la temperatura de depósito se baja más, a 333 K no es posible depositar níquel aún cuando el tiempo de inmersión sea mayor a 60 minutos. Lo anterior puede atribuirse a que la energía de activación para que se depositen las primeras



semillas de níquel es alta y que a 333 K no se alcanza la energía necesaria para iniciar la reacción. Por consiguiente, se consideró conveniente disminuir la concentración de la sal de níquel en el baño. Con el baño DMAB-B se observó un comportamiento muy similar al baño DMAB-A. Al disminuir más la concentración de la sal de níquel, baño DMAB-C no se consigue depositar el níquel aún cuando la temperatura de depósito es de 353 K y tiempos de inmersión largos.

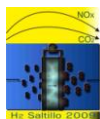
Por otra parte, con el baño de hidracina se consigue depositar nanopartículas de níquel en todas las condiciones probadas, a 333, 343 y 353 K con tiempos de inmersión entre 5 y 60 minutos, en ninguno de los experimentos se llegó a formar la película de níquel. La morfología de los depósitos se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Micrografías de los depósitos de Ni con el baño de hidracina a 333 K y 15 min de inmersión, a), b) y c) NTC de tolueno; d), e) y f) NTC de acrilonitrilo.

De acuerdo con el análisis EDS realizado en el MEB y TEM las esferas en la superficie externa de los NTC corresponden a los aglomerados de níquel depositado. Se aprecia que existe una buena dispersión de las nanopartículas y que su tamaño se encuentra en el rango de 3-9 nm. Al aumentar la temperatura de depósito solo se incrementa la cantidad de níquel y con tiempos de inmersión largos se promueve el crecimiento de los aglomerados.

### 3.2. Adsorción de hidrógeno.



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

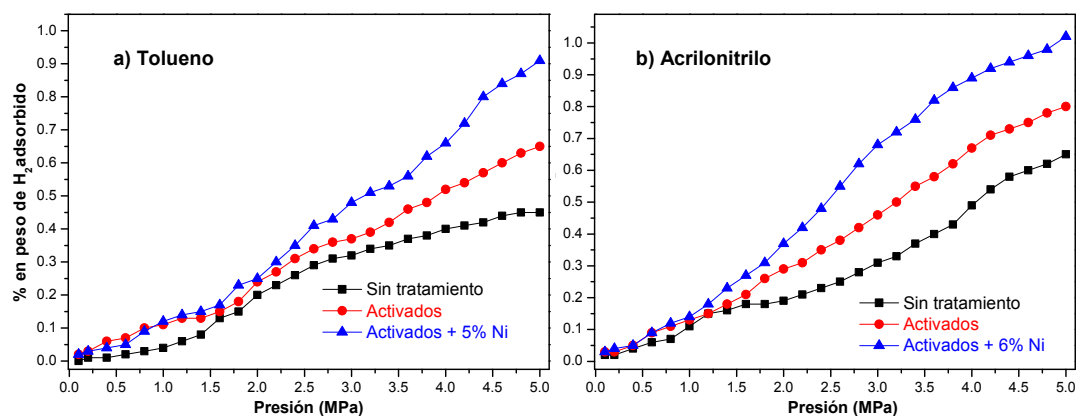
Las propiedades texturales y la capacidad de adsorción de hidrógeno a 77 K y presión atmosférica de los NTC sin tratamiento, funcionalizados y con níquel disperso se reportan en la tabla II. El área superficial de lo NTC sin tratamiento sintetizados con tolueno es de 25.2 m<sup>2</sup>/g y la de los de acrilonitrilo es casi el doble. Para ambos tipos de NTC se observa que el proceso de activación con KOH incrementa considerablemente el área superficial y aunado a ello un incremento de aproximadamente en triple en la capacidad de adsorción de hidrógeno. El incremento se atribuye a la gran cantidad de defectos superficiales generados por la activación química los cuales son sitios preferenciales para que se adsorba el hidrógeno<sup>18</sup>.

**Tabla II.** *Propiedades Texturales y adsorción de hidrógeno a 77 K y P atm.*

	Tratamiento	A <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	V <sub>T</sub> (m <sup>2</sup> /g)	%H <sub>2</sub>
Nanotubos de Tolueno	Sin tratamiento	25.2	0.042	0.04
	Funcionalizados	47.5	0.092	0.12
	Fun. con Ni	51.8	0.095	0.15
Nanotubos de Acrilonitrilo	Sin tratamiento	48.6	0.091	0.05
	Funcionalizados	144	0.361	0.16
	Fun. con Ni	145	0.363	0.17

También se aprecia que con la dispersión de níquel la cantidad de hidrógeno adsorbida es prácticamente la misma. De los resultados se infiere que las condiciones de medición no son las adecuadas para que se presente el fenómeno de spillover que permite la descomposición del hidrógeno y su difusión a la estructura de carbono, ya que para ello se requieren temperaturas mayores y presión, por lo tanto la adsorción de hidrógeno es únicamente por fisisorción aún cuando existe Ni presente.

Las isothermas de adsorción de hidrógeno a 303 K en función de la presión se muestran en la figura 6.



**Figura 6.** Por ciento en peso de  $H_2$  a 303 K y varias presiones.

La adsorción de hidrógeno en los NTC es una función lineal de la presión aplicada. A 5 MPa las muestras aún no se han saturado lo que sugiere que si se continúa incrementando la presión seguiría aumentando su capacidad de adsorción de hidrógeno. Para ambos tipos de NTC a presiones menores a 1.5 MPa no existe gran diferencia entre los NTC sin tratamiento, los funcionalizados y los que tienen Ni. La diferencia comienza a notarse a presiones a partir de 2 MPa.

Los NTC funcionalizados presentan una mayor adsorción de hidrógeno que los que no tienen tratamiento. En este caso, la adsorción de hidrógeno se da únicamente por fisisorción, presentándose la formación de una monocapa propiciada por la acción de la presión. El incremento en los NTC funcionalizados se debe a que los defectos superficiales generados incrementan el área superficial además de que son lugares preferenciales para la adsorción. Los NTC de tolueno sin tratamiento a 5 MPa adsorben 0.44 % de  $H_2$ , al funcionalizarlos adsorben 0.65 % de  $H_2$  y presentan un factor de incremento de 1.45, mientras que los de acrilonitrilo sin tratamiento adsorben 0.64 % de  $H_2$  y los funcionalizados 0.8 % de  $H_2$ , el factor de incremento es de 1.2 veces en comparación con los NTC sin tratamiento.

A 5 MPa los NTC de tolueno con Ni adsorben 0.92 % de  $H_2$  y los de acrilonitrilo 1.03 % de  $H_2$ , es decir, con níquel disperso se logra duplicar la adsorción de hidrógeno en comparación con el material sin tratamiento. Este aumento no puede atribuirse a las diferencias superficiales entre los NTC sin tratamiento y los que tienen níquel, ni tampoco a la adsorción del hidrógeno por el níquel. Aunque se asuma que el níquel se encuentre cien por ciento disperso y que cada átomo de níquel absorba 1 átomo de hidrógeno, para un 6 % en peso de níquel, el níquel por si mismo sólo adsorbería 0.03 % en peso de hidrógeno. Así que sumando las contribuciones individuales de los NTC y la del níquel el total de hidrógeno adsorbido sólo sería ligeramente mayor a la de los NTC sin níquel. Por lo tanto, el incremento en la cantidad de hidrógeno adsorbido se



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

atribuye a la adsorción por el mecanismo de spillover en donde la molécula de hidrógeno se disocia y migra hacia la superficie de los NTC, el hidrógeno atómico se difunde y se estabiliza en la red del grafito. Este aumento también está relacionado con la buena dispersión del níquel depositado por la técnica de electroless y a que los aglomerados son pequeños, existiendo de esta forma un excelente contacto entre el níquel y la superficie de los NTC lo que facilita la migración y absorción de los átomos de hidrógeno.

### 4.- Conclusiones

Los resultados muestran que la técnica de electroless es una ruta viable para depositar nanopartículas de níquel en un solo paso sobre la superficie externa de los NTC funcionalizados. Aglomerados pequeños de nanopartículas de níquel altamente dispersos se obtienen cuando se utiliza el baño de hidracina. A 77 K y presión atmosférica la funcionalización de los NTC favorece la adsorción por fisisorción incrementando hasta el triple la capacidad de adsorción de hidrógeno. La dispersión de nanopartículas de níquel promueve significativamente la adsorción de hidrógeno, incrementándose hasta 2 veces con respecto a los NTC sin tratamiento a 303 K y 5 MPa.

### 5.- Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo a través del proyecto No. 47776, a Roal Torres Sánchez y Manuel Román Aguirre de CIMAV por el apoyo técnico.

### 6.- Referencias.

- <sup>1</sup> Louis Schlapbahr and Andreas Züttler. *Nature* 414 (2001) 353.
- <sup>2</sup> Yuda Yürüm, Alpay Taralp, T. Nejat Veziroglu. *Int. J. Hydrogen Energ.* 34 (2009) 3784.
- <sup>3</sup> Elena David. *J. Mater. Process. Tech.* 162-163 (2005) 169.
- <sup>4</sup> R. Ströbel, J. Garche, P.T. Moseley, L. Jörissen, G. Wolf. *J. Power Sources* 159 (2006) 781.
- <sup>5</sup> Lueking A, Yang RT. *J Catal.* 206 (2002) 165.
- <sup>6</sup> Yildirim T, Ciraci S. *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 175501.
- <sup>7</sup> Zacharia R, Rather S-U, Hwang SW, Nahm KS. *Chem. Phys. Lett.* 434 (2007) 286.
- <sup>8</sup> Lueking A, Yang RT. *AIChE J.* 49 (2003) 1556.
- <sup>9</sup> M. Zielinski, R. Wojcieszak, S. Monteverdi, M. Mercy, M.M. Bettahar. *Int. J. Hydrogen Energ.* 32 (2007) 1024.
- <sup>10</sup> Sami-ullah Rather, Renju Zacharia, Sang Woon Hwang, Meharj-ud-din Naik, Kee Suk Nahm. *Chem. Phys. Lett.* 441 (2007) 261.
- <sup>11</sup> Hyun-Seok Kim, Ho Lee, Kyu-Sung Han, Jin-Ho Kim, Min-Sang Song, Min-Sik Park, Jai-Young Lee, and Jeung-Ku Kang. *J. Phys. Chem. B* 109 (2005) 8983.
- <sup>12</sup> Angela Lueking and Ralph T. Yang. *J. Catal.* 206 (2002) 165.
- <sup>13</sup> G. O. Mallory, J. B. Hajdu. *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, American Electroplaters and Surface Finishers Society (AESF), N. Y. (1990)
- <sup>14</sup> S. Haag, M. Burgard, B. Ernst. *Surf. Coat. Tech.* 201 (2006) 2166.



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

---

- <sup>15</sup> F.Z. Kong, X.B. Zhang, W.Q. Xiong, F. Liu, W.Z. Huang, Y.L. Sun, J.P. Tu, X.W. Chen. *Surf. Coat. Tech.* 155 (2002) 33.
- <sup>16</sup> Li-Ming Ang, T. S. Andy Hor, Guo-Qin Xu, Chih-hang Tung, Siping Zhao, and John L. S. Wang. *Chem. Mater.* 11 (1999) 2115.
- <sup>17</sup> Haijun Zhang, Xiangwei Wu, Quanli Jia, Xiaolin Jia. *Mater. Des.* 28 (2007) 1360.
- <sup>18</sup> Peng-Xiang Hou, Shi-Tao Xu, Zhe Ying, Quan-Hong Yang, C. Liu, Hui-Ming Cheng. *Carbon* 41 (2003) 2471.