

## RECUBRIMIENTOS PRODUCIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA POR ARCO PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA NAVAL

L.M. Dimaté <sup>(1)</sup>, M.F. Ortíz <sup>(1)</sup>, J.A. Morales <sup>(2)</sup>, J.J. Olaya <sup>(1)</sup>

(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia, COLOMBIA.

(2) Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial, COLOMBIA.

E-mail: [jjolaya@unal.edu.co](mailto:jjolaya@unal.edu.co)

### RESUMEN

*Recubrimientos de acero al carbono, inoxidable y nanocomposito de Fe-Nb-Cr-W fueron depositados sobre sustratos de acero mediante la técnica de proyección térmica por arco y se estudió la capacidad de dichos recubrimientos para mejorar las propiedades de piezas mecánicas utilizadas en la industria naval. Para ello, se caracterizó la microestructura antes y después de los ensayos para evaluar la resistencia a la corrosión y al desgaste y las propiedades de barrera térmica en los recubrimientos producidos. La resistencia a la corrosión fue evaluada mediante ensayos electroquímicos de polarización potenciodinámica utilizando un electrolito de NaCl al 3%; la resistencia al desgaste abrasivo fue medida utilizando un sistema de tres cuerpos siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G-65; y para estudiar el estado y control de calidad de las barreras térmicas se utilizó la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. Los recubrimientos fueron caracterizados microestructuralmente mediante microscopía electrónica de barrido, microscopía óptica y difracción de rayos X. La correlación entre los resultados de corrosión, desgaste y barrera térmica con la microestructura se presentan en el presente trabajo de investigación. Se concluyó que el recubrimiento que presenta mejores propiedades en cuanto a resistencia a la corrosión, dureza, resistencia al desgaste abrasivo y propiedades de barrera térmica es el recubrimiento de nanocomposito, seguido por el recubrimiento de acero inoxidable y por último el recubrimiento de acero al carbono.*

**Tópico 2:** Materiales Metálicos

**Palabras clave:** Proyección térmica por arco, desgaste abrasivo, barrera térmica, corrosión.

### 1. INTRODUCCIÓN

La proyección térmica como proceso de recuperación tiene su origen a principios del siglo XX con la invención del proceso de metalización de Schoop-Günther en 1917 [1]. Este proceso fue utilizado inicialmente para materiales de bajo punto de fusión como estaño o plomo, el cual fue extendido más adelante a metales refractarios y cerámicos. Es una de las técnicas más versátiles para la aplicación de materiales de recubrimiento utilizados para proteger componentes del desgaste por abrasión, adhesión, erosión y la corrosión (como la causada por el agua de mar) y la fatiga [2]. En el proceso de arco eléctrico, dos alambres del material a depositar son llevados simultáneamente hasta un punto de contacto, donde se encuentra un gas atomizado que proyecta el metal líquido en forma de gotas fundidas [3]. La proyección térmica por arco eléctrico es una de las técnicas más económicas para aplicar recubrimientos metálicos resistentes a la corrosión con buena calidad en cuanto adherencia y composición química [4]. Los bajos costos energéticos y las altas tasas de producción la hacen una técnica competitiva respecto a otros sistemas de proyección, como llama y plasma [5,6]. Adicionalmente, los parámetros en el sistema de proyección por arco (voltaje, corriente, presión del aire y distancia de proyección) pueden ser optimizados para aplicaciones específicas [7].

Ahora bien, debido a que los componentes marinos como los motores son sometidos constantemente a ambientes altamente corrosivos, a cargas cíclicas y desgaste durante su funcionamiento, se propone la aplicación de materiales de última tecnología como los nanocompositos, o de materiales tan comúnmente utilizados en la

industria naviera como los aceros inoxidables y los aceros al carbono. De esta manera, por medio de estos materiales es posible recuperar piezas cuyos repuestos no se producen en serie o dejaron de fabricarse; así como proteger piezas destinadas a ser sometidas a ambientes agresivos para asegurar mayor durabilidad y rendimiento. En el presente estudio se investigan recubrimientos para aplicaciones en la industria naval. Para ello, se presenta la resistencia al desgaste abrasivo, a la corrosión y propiedades de barrera térmica de los recubrimientos Fe 25Cr 5B 6Mo 15W 3Mg 4C 12Ni 2Si (nanocomposito 140 MXC), Fe 0.15C 0.8Mn 0.2Si (530 AS) y Fe 13Cr 1Mn 1Si 0,3C (560 AS). Estos recubrimientos fueron aplicados por la técnica de arco eléctrico sobre aceros AISI 4340 y 1045 para los recubrimientos 140MXC y 530 AS y AISI 316L para el recubrimiento 560 AS.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

**Obtención de los recubrimientos.** La Tabla 1 presenta un resumen de los recubrimientos aplicados sobre cada sustrato, la composición química y las pruebas realizadas de caracterización. Las probetas de las pruebas de desgaste y corrosión se realizaron con dimensión de 20x20x5 mm, excepto para el caso del acero 316L con dimensiones de 20x20x2 mm. Para el estudio de propiedades térmicas, se utilizaron probetas con 23,8 mm de diámetro y un espesor de 2 mm. La preparación de la superficie del sustrato mediante un disco abrasivo. Al poco tiempo, se depositaron los recubrimientos con el objetivo de evitar la oxidación de la superficie de las probetas. Posteriormente se aplicó un recubrimiento base de composición química 95Ni 5Al, que proporciona una rugosidad adecuada a la superficie para mejorar la adherencia del sistema. Finalmente se depositaron los recubrimientos utilizando los siguientes parámetros: presión de aire primaria 50 psi, voltaje 29 V, corriente 220 A y distancia de proyección 200 mm. Todos los recubrimientos fueron depositados con el equipo Eutronic ArcSpray 4.

**Tabla 1.** Pruebas realizadas por recubrimiento y sustrato

SUSTRATO	RECUBRIMIENTO		
	140 MXC Fe 25Cr 5B 6Mo 15W 3Mg 4C 12Nb 2Si	530 AS Fe 0.15C 0.8Mn 0.2Si	560 AS Fe 13Cr 1Mn 1Si 0.3C
<b>ACERO 4340</b> Fe 1.65Ni 0.7Cr 0.2Mo 0.4C 0.6Mn	DESGATE ABRASIVO CORROSIÓN	CORROSIÓN	
<b>ACERO 1045</b> Fe 0.45C 0.3Si 0.8Mn	CORROSIÓN	DESGATE ABRASIVO CORROSIÓN	
<b>ACERO 316L</b> Fe 0.03C 13Ni 2.3Mo 17.5Cr			DESGATE ABRASIVO CORROSIÓN
<b>ACERO 1020</b> Fe 0.2C 0.6Mn 0.04 P 0.05S	BARRERA TÉRMICA		

**Caracterización.** Los recubrimientos fueron estudiados estructuralmente mediante difracción de rayos x (DRX) con un equipo X-pert Pro Panalytical en modo haz rasante con la línea monocromática  $\alpha$  del cobre (1,540998Å) trabajando a 45 kV y 40 mA. La medición del espesor y la porosidad cualitativa se realizó con un microscopio óptico Leco de lentes convexas, por metalografía mediante corte transversal de los recubrimientos. Los recubrimientos se estudiaron superficialmente a través de microscopía electrónica de barrido (MEB) con un equipo FEI QUANTA 200 en alto vacío y a un voltaje de 30kV. El estudio químico se realizó antes y después de las pruebas electroquímicas con el mismo equipo (MEB) en modo EDS con un voltaje de 20kV.

**Pruebas de microdureza.** Se realizó un ensayo de microdureza Knoop sobre los tres recubrimientos, con una carga de 50 gr; las mediciones fueron realizadas desde la superficie del recubrimiento hacia el sustrato.

**Pruebas de desgaste.** La prueba de desgaste se realizó con un equipo diseñado bajo la norma ASTM G65, la cual determina el desgaste abrasivo por contacto entre arena seca y una rueda de caucho contra el material a ensayar [8]. Del ensayo se reportan la pérdida de peso en unidades de volumen ( $\text{mm}^3$ ) después de realizada la prueba. Los parámetros del ensayo fueron los siguientes: carga 130 N, tiempo 1 min, flujo de arena 300-400 g/min y revoluciones de la rueda 200 rpm.

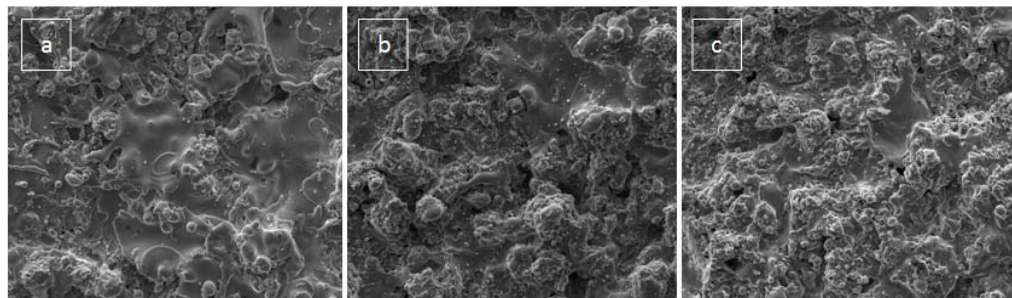
**Pruebas electroquímicas.** Las pruebas potenciodinámicas se realizaron con un equipo GAMRY Reference 600 Potenciostat/Galvanostat/ZRA utilizando un contraelectrodo de grafito de alta pureza y un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE) y se siguieron las recomendaciones de la norma ASTM G5 [9]. El área expuesta a dicha solución fue de  $0,79\text{cm}^2$  en un electrolito de NaCl al 3%. El barrido se realizó entre -0,3 y 1,0

V con respecto al potencial de reposo, con una variación de 0,5m V/s. Para las pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica el barrido se realizó con una frecuencia inicial y final de 10mHz y 100kHz respectivamente, empleando una perturbación de 10 mV.

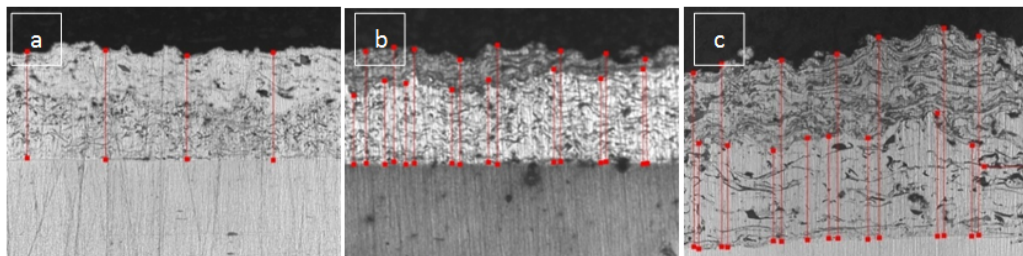
**Estudio de las propiedades térmicas.** Los recubrimientos fueron sometidos a tratamientos térmicos a 600° C, 800° C y 1000° C durante 4h y a 1000° C durante 24h. Después se les realizaron pruebas electroquímicas mediante espectroscopía de impedancia electroquímica, a temperatura ambiente y utilizando un electrolito de 0,01M de  $(K_3Fe(CN)_6)/K_4Fe(CN)_3 \cdot 3H_2O$  [10]. Previo a la medición se esperó un tiempo de 45 minutos antes para permitir la estabilización del potencial de circuito abierto y asegurar la penetración del electrolito a través de los poros abiertos. El área expuesta a dicha solución fue de 0,79cm<sup>2</sup>; el barrido se realizó con una frecuencia inicial y final de 10 mHz y 100 kHz respectivamente, con un voltaje de perturbación en la señal de 10 mV. Posteriormente los recubrimientos fueron estudiados con MEB para observar el cambio microestructural y DRX para determinar los óxidos formados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Análisis microestructural y análisis químico.** En la Figura 1 se presentan las micrografías SEM de la superficie de cada uno de los recubrimientos. En general, en los recubrimientos se evidencia la formación de estructuras de forma lenticular, típica de estos recubrimientos, también se observa bajos valores de rugosidad en el recubrimiento, de igual modo aparenta tener un bajo contenido de óxidos y poros. Posteriormente se midió la rugosidad con un rugosímetro de punta de diamante, obteniendo rugosidades de  $R_a = 5.1, 5.44$  y  $6.23 \mu m$  para los recubrimientos 140 MXC, 530AS y 560 AS respectivamente. Para la medición del espesor se realizaron cortes transversales a las probetas y se observaron con micrografía óptica; se realizaron 10 mediciones para sacar el promedio Figura 1. En las micrografías se observa que hay menos presencia de poros y óxidos en el recubrimiento 140 MXC que en los recubrimientos 530 AS y 560 AS, lo cual condice con las especificaciones del fabricante. Los espectros de DRX para los recubrimientos 530 AS y 560 AS evidencian principalmente formación de óxidos tales como FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> que probablemente se forman cuando las partículas se funden y reaccionan con el medio ambiente antes de depositarse con el sustrato y solidificarse. A su vez, en el recubrimiento 560 AS se formaron óxidos de cromo y compuestos Fe-Cr. Para el caso del nanocomposito 140 MXC se realizó primero un espectro del alambre del recubrimiento, en donde se encontró Fe. De esta forma se puede pensar que la fase amorfa para formar el nanocomposito se encuentra en el polvo. Los espectros se observan en la Figura 7, 8 y 9 a temperatura ambiente.

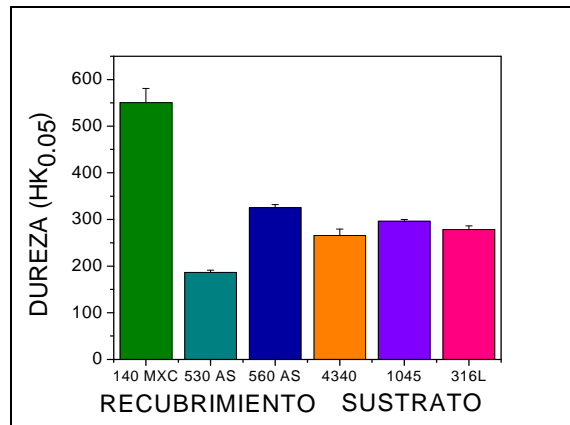


**Figura 1.** Micrografía SEM a 500X de los recubrimientos (a) 140 MXC (b) 530 AS (c) 560 AS



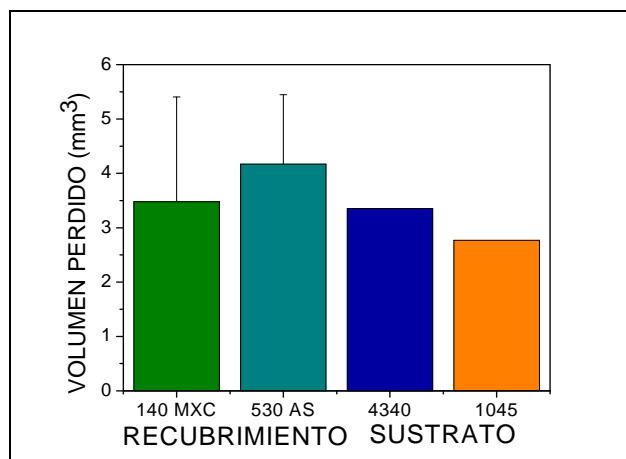
**Figura 2.** Micrografía óptica a 100X de los recubrimientos (a) 140 MXC (b) 530 AS (c) 560 AS

**Medición de microdureza** Los resultados del ensayo de microdureza Knoop se presentan en la Figura 3. La mayor dureza se presentó en el nanocomposito debido posiblemente a la presencia de elementos duros a base de tungsteno, niobio y cromo [11]. También se observa un aumento en la dureza en los recubrimiento de 560 AS por la presencia de la fase martensita [12], mientras que en el caso del recubrimiento de medio carbono se presenta la menor microdureza debido a la carencia de elementos aleantes y la cantidad de óxidos formados [13,14], lo cual lo hace un recubrimiento poco recomendable para aplicaciones donde la pieza será sometida a desgaste, es decir, se recomienda su aplicación para casos de recuperación dimensional.



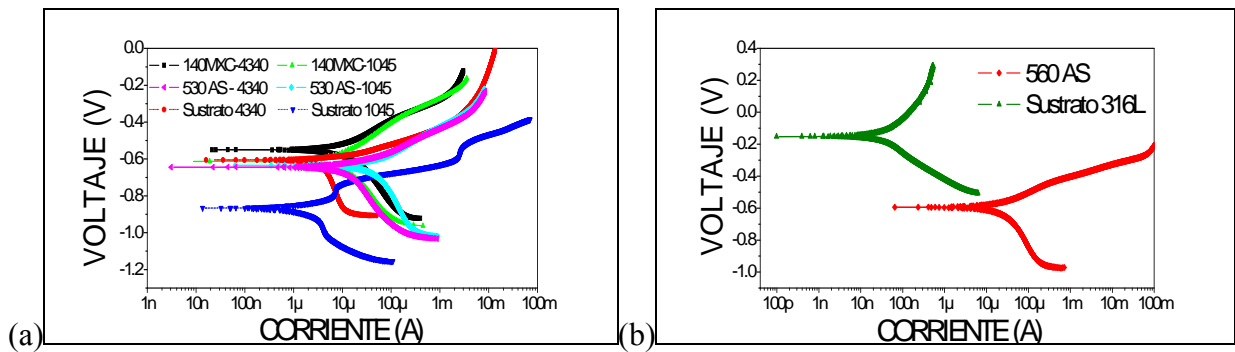
**Figura 3.** Valores de la microdureza los recubrimientos y los sustratos

**Prueba de desgaste abrasivo** Los valores obtenidos de pérdida de volumen se presentan en la Figura 4. En este caso, para el recubrimiento 560 AS no se realizó ensayo de desgaste abrasivo, debido a que el espesor de la probeta no era el suficiente para montarlo sobre el portabroquetas de la máquina de desgaste. Se observa que el recubrimiento 140 MXC perdió menos volumen durante la prueba, lo que concuerda bien con los mayores valores de dureza. Esto seguramente es posible por la formación de una microestructura de buenas propiedades mecánicas, que está formada a base de una matriz amorfa compuesta por elementos cromo, niobio y molibdeno [13]. Estas mediciones deben ser corroboradas con un estudio más completo de microscopía electrónica de transmisión. Después de realizadas estas pruebas, las muestras fueron analizadas en MEB, donde se observó que se presentaban signos de un mecanismo de desgaste por ralladura y deformación plástica. Al determinar la composición química se observaron trazas de silicio, oxígeno y carbono; el primero debido al silicio aportado por la arena del material abrasivo de la prueba, y los últimos seguramente por la interacción del recubrimiento con el ambiente.



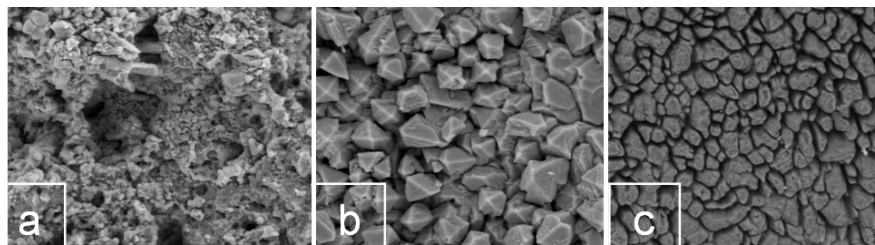
**Figura 4.** Volumen perdido de los recubrimientos 140 MXC y 530 AS, y de los sustratos SAE 4340 y 1045

**Polarización potenciodinámica.** En la Figura 5 se pueden observar las curvas de polarización Tafel en todos los recubrimientos y para los sustratos sin recubrimiento. El recubrimiento 140 MXC se depositó sobre dos sustratos (acero SAE 1045 y 4340) para poder observar el efecto del sustrato frente a la resistencia a la corrosión. En estos recubrimientos se observa que el recubrimiento efectivamente le proporciona un mejoramiento en la resistencia a la corrosión para ambos sustratos, es decir, los valores del potencial de corrosión son más positivos y tiene un menor valor de la resistencia a la corrosión. Estas observaciones son acordes con su composición química pues la presencia de niobio y cromo, así sea en pequeñas proporciones, mejoran la resistencia a la corrosión [15]. El recubrimiento 530 AS también se depositó sobre estos dos sustratos. En este caso se encontró que el recubrimiento mejora la resistencia a la corrosión cuando se aplica sobre sustrato 1045; pero en el caso de que el sustrato sea acero SAE 4340 no mejoró el comportamiento electroquímico, demostrándose así la importancia de la selección del sustrato. El recubrimiento 560 AS se depositó sobre el acero inoxidable 316L. Se observó que el sustrato tiene un comportamiento más favorable frente a la resistencia a la corrosión que depositado con el recubrimiento, esto posiblemente debido a que el recubrimiento inoxidable es martensítico y el sustrato es totalmente austenítico. Sobre la superficie de un acero inoxidable austenítico 316 se forma una capa aislante y que pasiva al acero, mejorando así la resistencia a la corrosión [16]. Por esta razón, se recomienda aplicar este sistema en aplicaciones de sinergismo donde hay presencia de fenómenos de a la corrosión y desgaste.



**Figura 5.** Curva de polarización potenciodinámica de los recubrimientos (a) 140 MXC y 530 AS sobre sustratos de aceros SAE 1045 y 4340 (b) 560 AS sobre acero 316L.

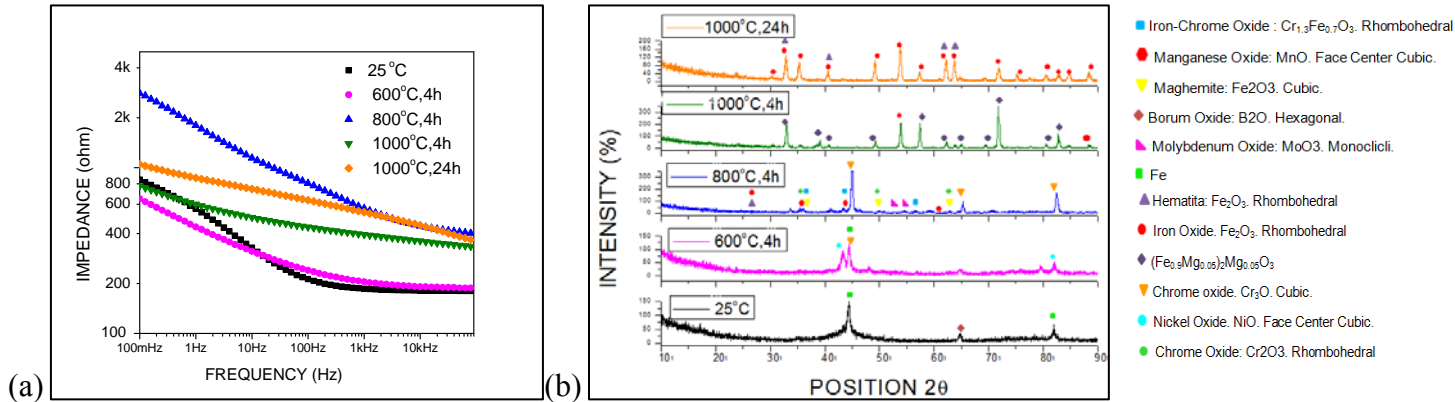
**Comportamiento de barrera térmica.** Las micrografías de la Figura 6 se muestran la degradación de los recubrimientos por efecto del tratamiento térmico a 1000°C durante 4h [17], lo cual se hace evidente al compararlo con la Figura 1.



**Figura 6.** Micrografía MEB a 1600X de los recubrimientos tratados térmicamente a 1000°C durante 4h (a) 140 MXC (b) 530 AS (c) 560 AS

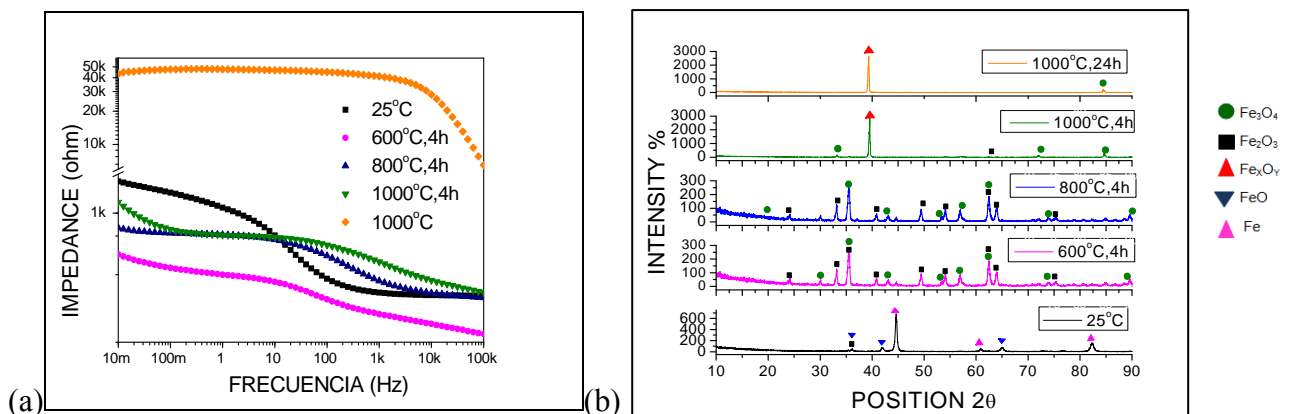
En la Figura 7 se presenta la curva de impedancia y el difractograma DRX para el nanocomposito 140MXC. Se observó un aumento significativo del módulo de impedancia en las probetas tratadas térmicamente al compararlas con el recubrimiento sin tratamiento. A su vez, se pudo observar un aumento de la impedancia del sistema tras la oxidación isoterma que parece estar relacionado con la degradación térmica tras la aparición de óxidos.

Después de 800° C a 4h, los resultados describe algunas variaciones, por ejemplo, el solapamiento de la curva de y 1000° C a 24h a bajos valores de frecuencia. Ahora bien, se esperaba que bajo tratamiento a altas temperaturas durante largos períodos se incrementara la concentración de óxidos; sin embargo, esta tendencia no fue observada, tal como se observa a 800° C donde se forma una mayor concentración de óxidos que pueden actuar como barrera térmica, tales como el óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) de estructura cristalina romboédrica, el óxido de Manganese ( $\text{MnO}$ ) de estructura cúbica centrada en las caras, y el Óxido de Molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ) de estructura monoclinica. En las probetas sometidas al tratamiento a 1000° C durante 4 y 24h presentaron óxidos ferrosos los cuales no son recomendados para aplicaciones de aislante térmico [18].



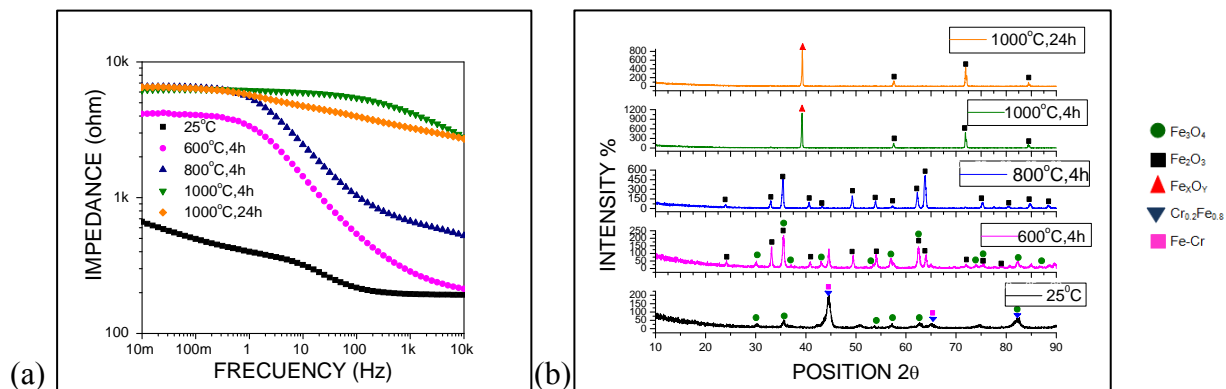
**Figura 7.** (a) EIS para el recubrimiento 140 MXC tratado térmicamente a 600°C, 800°C y 1000°C durante 4 horas y 1000°C durante 24 horas (b) Espectros de XRD para el recubrimiento 140 MXC a temperatura ambiente y a 600°C, 800°C y 1000°C durante 4h y 24 h.

En la Figura 8 se presentan las curvas de impedancia y difractogramas DRX obtenidas para el recubrimiento 530 AS, donde se observa que el módulo de impedancia es significativamente más elevado para el tratamiento térmico a 1000° C durante 24h lo que supone una elevada formación de óxidos [19]. Los espectros de DRX para el recubrimiento 530 AS muestran que a temperatura ambiente la formación del óxido  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [18].



**Figura 8.** (a) EIS para el recubrimiento 530 AS tratado térmicamente a 600°C, 800°C y 1000°C durante 4h y 1000°C durante 24 h (b) Espectros de XRD para el recubrimiento 530 AS temperatura ambiente y tratados

En la Figura 9 se presenta el diagrama de Bode y el difractograma DRX para el recubrimiento 560 AS. Se puede apreciar solapamiento de las curvas para los valores de frecuencia más bajos en los tratamientos más agresivos. A su vez, el tratamiento a 800° C decrece drásticamente los valores de impedancia, lo que hace suponer una formación de óxidos. En los espectros de DRX no se observa un mayor cambio en la formación de las fases de los óxidos con el aumento de temperatura en los tratamientos térmicos. Ahora bien, las fases del cromo, un elemento esencial del recubrimiento, solo se observan en el recubrimiento sin tratamiento térmico [20]. Para temperaturas por encima de 800° C se observa bien la presencia del óxido Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y para tratamientos por debajo de esta temperatura se presentan los óxidos Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [21].



**Figura 9.** (a) EIS para el recubrimiento 560 AS tratado térmicamente a 600°C, 800°C y 1000°C durante 4h y 1000°C durante 24 h (b) Espectros de XRD para el recubrimiento 560 AS temperatura ambiente y tratados

#### 4. CONCLUSIONES

En general, los recubrimientos utilizados en este trabajo puede mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste abrasivo de los aceros al carbono, sin embargo, la eficiencia de dicha protección depende en gran medida de los defectos de la microestructura del recubrimiento, así como del ambiente corrosivo y de desgaste. Por otro lado, los recubrimientos estudiados son una alternativa viable para ser utilizados en la industria naval, según a los esfuerzos y condiciones a que se encuentre sometida la pieza se debe escoger el recubrimiento. Ahora bien, de la caracterización microestructural, la evaluación térmica y la resistencia a la corrosión y al desgaste de los recubrimientos producidos se puede concluir lo siguiente:

En relación a las pruebas realizadas con los recubrimientos de marcas comerciales 140 MXC, 530 AS y 560 AS aplicados con la técnica de proyección térmica de arco eléctrico sobre sustratos utilizados en la industria naval, se encontró que el recubrimiento de mejor desempeño, es decir, el que presentó la mejor combinación de propiedades en cuanto a resistencia a la corrosión, microdureza, resistencia al desgaste abrasivo y propiedades de barrera térmica es el recubrimiento 140 MXC, después se encuentra el recubrimiento 560 AS y finalmente el recubrimiento 530 AS. Se pudo determinar la importancia del sustrato para las pruebas de corrosión, para ello, es importante utilizar materiales de acero inoxidable los cuales tienen una capa de pasivación que mejoran el comportamiento electroquímico del conjunto. En cuanto a las propiedades de los recubrimientos como aislante térmico sería necesario hacer más pruebas para determinar la posible viabilidad del recubrimiento de nanocomposito 140 MXC a temperaturas menores de 800° C, los recubrimientos 530 AS y 560 AS se descartan.

#### REFERENCIAS

1. E. Lashreras, J. María. Tecnología del acero. Ediciones Cedel. Tercera edición, Barcelona. España. 1978. (libro)
2. I. Gedzevicius, A. Valiulis. Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties. Journal of Materials Processing Technology. 2006. (libro)
3. Handbook of Hard Coatings. Tomo 3. Thermal Spraying and Detonation Gun Processes. 2003. (libro)

4. J. Marulanda. El Rociado Térmico y sus Aplicaciones. Publicación Universitaria. 2000. (*publicación universitaria*)
5. K. Dobler. Reconditioning Power Generation Components with Thermal Spray Welding Journal. 2006. (*paper*)
6. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Thermal spraying: New construction and Maintenance. EM 1110-2-3401. Washington, DC 20314-1000. 2005. (*Manual*)
7. K Cooke, G. Oliver, V. Buchanan, N. Palmer. Optimisation of the electric wire arc-spraying process for improved wear resistance of sugar mill roller shells. Surface & Coatings Technology 202 .2007. pag. 185–188. (*paper*)
8. ASTM Designation: G65. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 2001. (*norma*)
9. ASTM G5 – 94. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. 2004. (*norma*)
10. J. García, A. Salazar, C.J. Múnez, V. Utrilla y P. Poza. “Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica por espectroscopía de impedancia electroquímica”. Revista Cerámica y Vidrio, 2005 pag. 232-239. (*paper*)
11. Georgieva, P, Thorpe, R. Yanski, A. Seal. “Nanocomposite materials: an innovative turnover for the wire arc spraying technology”. University of Central Florida, Mechanical, Materials and Aerospace Engineering Department. 2006. (*paper*)
12. G. Krauss. Heat Treatment and Processing Principles. Eds, ASM International. 1989. (*libro*)
13. W. Smith. Structure and Properties of Engineering Alloys. Mc Graw Hill International Editions. 1993. (*libro*)
14. G. Jandin, H. Liao, Z.Q. Feng, C. Coddet. Correlations between operating conditions, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings. Materials Science and Engineering 2003. Pag. A349 298/305. (*paper*)
15. Z. Zhou, L. Wang, F. Wang, Y. Liu. “Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings prepared by detonation gun spraying”. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2009. Pag. S634-s638. (*paper*)
16. ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. 2005. (*norma*)
17. A. Abedini, A. Pourmousa, S. Chandra , J. Mostaghimi. “Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying”. Surface & Coatings Technology. 2006 pag 201 3350–3358. (*paper*)
18. S.-H. Songa, P. Xiao, L.-Q. Weng. “Evaluation of microstructural evolution in thermal barrier coatings during thermal cycling using impedance spectroscopy”. Journal of the European Ceramic Society 2005 pag 1167–1173. 25. (*paper*)
19. O. Culhaa, M. Toparlia, S. Sahinb, T. Aksoya. Characterization and determination of FexB layers mechanical properties”. Journal of Materials Processing Technology. 2008 pag 206 231–240. (*paper*)
20. G. Jin, B.S Xu, H. D Wang, Q. F Li, S.C Wei. Microstructure and tribological properties of stainless steel coatings sprayed by two methods based on spraying. Surface & Coatings Technology. 2007. pag 201 5261–5263. (*paper*)
21. M. Amokrane, N. Bounarb, A. Benabbasb, A. Atia. “Study of microstructure, phases and microhardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray”. Journal of Materials Processing Technology. 2008 pag 200 410–415. (*paper*)

