

COMPARATIVE STUDY OF THE ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF VECALLOY B AND ALPHA PLUS COATINGS DEPOSITED BY THERMAL SPRAYING USING THE ELECTRIC ARC TECHNIQUE.

W. Flores^{a*}, W. González^b, E. Rodríguez^b, J.B. León^a, A. Scagni^c, M. Suárez^a.

^a Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

^b Departamento de Ciencias de los Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

^c Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

*Corresponding author, E-mail: williamsflores404@gmail.com, phone: +58424-202-4780.

Received: 15-07-2024

Accepted: 12-09-2024

Published: 27-03-2025

ABSTRACT

The present study aims to characterize microstructurally and evaluate the electrochemical behavior of Vecalloy B® and Alpha Plus®+SS420 metallic coatings deposited by thermal spraying using the electric arc technique. For the microstructural characterization of the coatings, X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM) and scanning electronic microscopy (SEM) techniques were used. Regarding the electrochemical behavior, potentiodynamic polarization tests were carried out, as well as electrochemical impedance spectroscopy tests. From the microstructural characterization, it was found that both coatings are mainly composed of lamellae, pores, oxides and unmolten particles. In the electrochemical tests, it was found that Vecalloy B coating has a higher resistance against corrosion by presenting a lower corrosion current density and nobler corrosion potential compared to Alpha Plus+SS420 coating, this probably due to a lower porosity and to the presence of some alloying elements that have a higher resistance against electrochemical attacks.

Keywords: Corrosion, Vecalloy B®, Alpha Plus®, Thermal Spraying, Electrochemical Impedance.

Estudio comparativo del comportamiento electroquímico de los recubrimientos Vecalloy B y Alpha Plus depositados mediante proyección térmica a través de la técnica de arco eléctrico

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar microestructuralmente y evaluar el comportamiento electroquímico de los recubrimientos metálicos Vecalloy B® y Alpha Plus®+SS420 depositados mediante proyección térmica a través de la técnica de arco eléctrico. Para la caracterización microestructural de los recubrimientos se emplearon las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB). En lo que respecta al comportamiento electroquímico, se realizaron ensayos de polarización potenciodinámica, así como también ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica. A partir de la caracterización microestructural, se encontró que ambos recubrimientos están conformados principalmente por lamelas, poros, óxidos y partículas no fundidas. En los ensayos electroquímicos, por su parte, se encontró que el recubrimiento Vecalloy B posee una mayor resistencia contra la corrosión al presentar una menor densidad de corriente de corrosión y un potencial de corrosión más noble en comparación con el Alpha Plus+SS420, debido probablemente a un menor porcentaje porosidad y a la presencia de algunos elementos de aleación que poseen mayor resistencia contra ataques electroquímicos.

Palabras claves: Corrosión, Vecalloy B®, Alpha Plus®, Proyección Térmica, Impedancia Electroquímica.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de recubrimientos metálicos obtenidos a través de proyección térmica se ha convertido en una técnica bastante importante y actualmente muy empleada sobre piezas industriales. A través de ello se buscan

satisfacer las exigencias marcadas por las condiciones de operación bajo servicio en un determinado proceso. Hoy en día la industria del recubrimiento busca adoptar el uso de nuevas aleaciones que brinden una excelente combinación entre calidad, eficiencia y economía, aspectos que

evidentemente se deben tener en cuenta sobre cualquier factor involucrado en el campo de la ingeniería. El comportamiento frente a la corrosión de los diferentes tipos de recubrimientos aplicados sobre piezas metálicas representa un punto de interés en el área de la integridad de materiales, considerando que dichas piezas o componentes normalmente trabajan bajo ambientes corrosivos y agresivos, como los suelos, por ejemplo, que, debido a sus altos contenidos de humedad, sales y materia orgánica en descomposición, atacan de forma acelerada a los materiales metálicos que se encuentran en contacto con los mismos. Otros ambientes corrosivos pueden ser representados también por las atmosferas marinas o sistemas con condiciones de temperaturas y presiones elevadas, los cuales, de igual manera, pueden causar daños considerables por corrosión [1].

El fallo de las piezas o componentes metálicos por problemas asociados a este fenómeno representa sin duda un aspecto económico negativo para grandes y pequeñas empresas del sector industrial, ya que muchas veces se ven obligadas a detener los procesos productivos y a sustituir las piezas en cuestión, conllevando evidentemente a un incremento en los gastos operativos y de producción. Por tal motivo, en vista de lo anteriormente expuesto, se ha considerado que la aplicación de recubrimientos superficiales a través de proyección térmica representa una de las posibles y mejores soluciones a estos problemas, tomando en cuenta además que actualmente existe un gran número de recubrimientos basados en distintas aleaciones, los cuales se aplican dependiendo de las propiedades que se quieran aportar a las piezas según las variables y condiciones reales de operación bajo servicio.

Se ha encontrado, según estudios previos, que los recubrimientos aplicados mediante las diferentes técnicas de proyección térmica presentan una elevada resistencia contra procesos corrosivos, debido principalmente a una estructura amorfa/nanocristalina carente de límites de granos, carburos o precipitados, que puedan representar sitios activos para ataques por corrosión localizada [2,3,4].

De la misma manera, se ha encontrado que la resistencia contra la corrosión de este tipo de recubrimiento aumenta también en gran medida con la adición de ciertos elementos aleantes que pueden ser resistentes electroquímicamente bien sea, por sus propiedades individuales, o bien, por la capacidad de formar películas pasivas estables con el oxígeno, como por ejemplo el cromo y el boro, las cuales impiden que se desarrolle un ataque corrosivo de mayor gravedad [5,6]. Asimismo, se ha obtenido que la porosidad juega también un papel importante en la resistencia contra la corrosión en recubrimientos depositados mediante proyección térmica. Según investigaciones previas, un mayor nivel de porosidad disminuye de forma significativa la resistencia contra la corrosión, ya que los poros tienden a actuar como vías o canales de difusión para la penetración del medio corrosivo hacia el interior de los recubrimientos [4].

En el presente estudio se pretende evaluar el comportamiento electroquímico de los recubrimientos Vecalloy B y Alpha Plus+SS420 depositados sobre un sustrato de acero AISI 1020, aplicados mediante proyección térmica a través de la técnica arco eléctrico. Para ello, se realizó en primer lugar una caracterización microestructural de los materiales en estudio a través de las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB). De la misma manera, se realizaron ensayos electroquímicos acelerados de polarización potenciodinámica y de espectroscopía impedancia electroquímica. Finalmente, se realizó una evaluación de los daños causados por las interacciones electroquímicas posterior a los ensayos a través de las técnicas de microscopía mencionadas previamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los recubrimientos en estudio fueron depositados sobre probetas rectangulares de acero AISI 1020, y las respectivas composiciones se muestran en las Tablas 1 y 2.

Las muestras a ensayar fueron cortadas a un área de 1 cm² y posteriormente sometidas a una preparación metalográfica bajo el procedimiento descrito por la Norma ASTM E3-01 [9] y utilizando la secuencia de discos recomendada por la compañía Struers [10].

Tabla 1. Composición química del recubrimiento Vecalloy B [7].

Elemento	%
Cr	13,2
Nb	6
B	4,2
Ni	5,5
Si	1,2
Mn	1,3
Al	2
Fe	Bal

Tabla 2. Composición química del recubrimiento Alpha Plus [8].

Elemento	%
Fe ₂ B	Base
Cr	~ 25

La caracterización microestructural se llevó a cabo en primer lugar a través de la técnica de microscopía óptica empleando un microscopio óptico marca Olympus modelo BX60, para lo cual las muestras fueron previamente atacadas con el reactivo Murakami a través del método de inmersión por un tiempo aproximado de 10 segundos. Las muestras fueron de igual manera analizadas a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido a través del microscopio electrónico marca Jeol modelo JSM-6390 acoplado a un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X, con el objetivo de realizar además un análisis químico semicuantitativo. Se realizó un estudio de difracción de rayos X con el fin de determinar las fases presentes en los materiales en estudio empleando un difractómetro marca Phillips modelo PW3830, para lo cual se empleó un rango de barrido de ángulo 2θ desde 20° hasta 75°, una velocidad

de barrido de 0,5 segundos por paso y una fuente de radiación de Cu-Kα ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$).

Los ensayos electroquímicos se llevaron a cabo a través de un potenciostato marca ACM Instruments modelo GuillAC 1260, empleando una celda electroquímica de cuatro electrodos conformada por un electrodo de referencia de Ag/AgCl, dos electrodos auxiliares de grafito puro y un electrodo de trabajo correspondiente a las muestras en estudio. Se realizaron ensayos de polarización potenciodinámica en soluciones de NaCl al 3,5% a cada sistema de recubrimiento a partir de los potenciales a circuito abierto (OCP), empleando un rango de potencial desde -250 mV vs. OCP hasta 500 mV vs. OCP con una velocidad de barrido de potencial de 30 mV/min. Finalmente, se realizaron ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica empleando un rango de frecuencias desde 0,19 kHz hasta 1 Hz con una amplitud de fase constante de 10 mV e igualmente en soluciones electrolíticas aireadas de NaCl al 3,5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los recubrimientos

Microscopía Óptica (MO)

En la Figura 1 se muestran las microestructuras superficiales de los recubrimientos Vecalloy B y Alpha Plus+SS420 respectivamente, obtenidas a través de microscopía óptica (MO). Se puede ver que para ambos recubrimientos la microestructura consiste principalmente en lamelas de color claro correspondientes a la matriz de los recubrimientos, intercaladas con poros que presentan morfologías variadas, óxidos que corresponden a la fase de color gris oscuro y partículas no fundidas, las cuales se observan con una morfología circular bien definida.

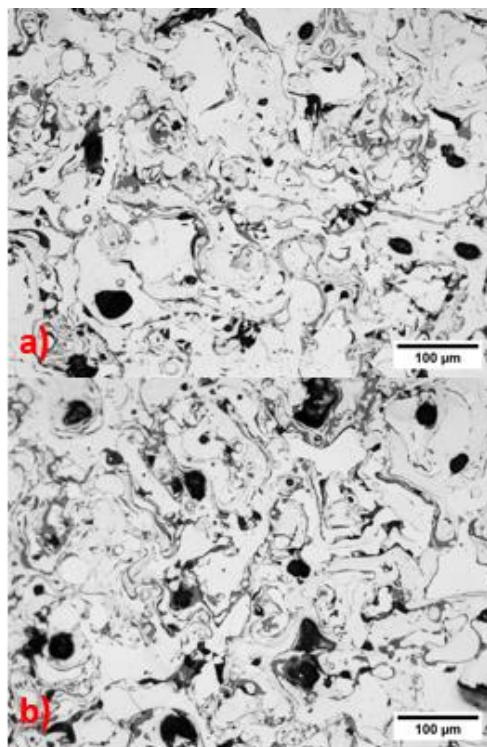


Figura 1. Microestructura superficial de los recubrimientos a través de MO con aumento de 200X: a) Vecalloy B y b) Alpha Plus+SS420.

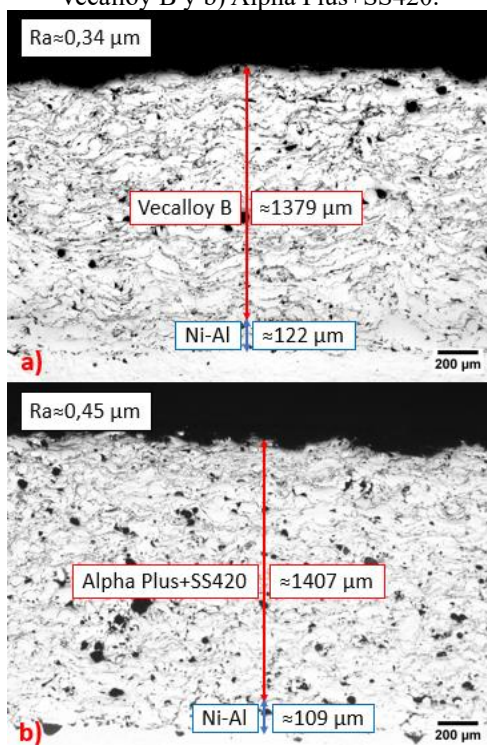


Figura 2. Micrografías de la sección transversal de los recubrimientos a través de MO a 50X: a) Vecalloy B y b) Alpha Plus+SS420.

En la Figura 2, por su parte, se observan las microestructuras correspondientes a las secciones transversales de los recubrimientos, donde se muestran los espesores promedios aproximados, así como también las respectivas rugosidades superficiales. De la misma manera, se observa en ambos casos la presencia de una película intermedia correspondiente en este caso a la aleación 75B® Ni-Al, la cual tiene como función principal en este caso proporcionar una mejor adherencia entre los recubrimientos y el sustrato sobre el cual fueron depositados.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

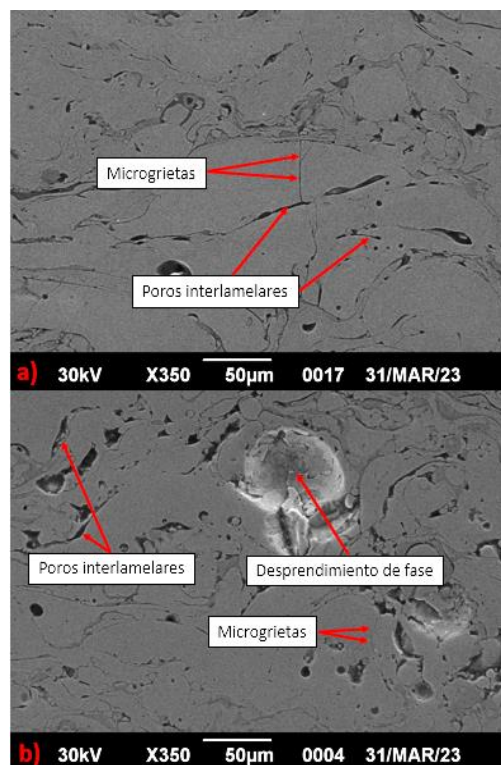


Figura 3. Micrografías de la sección transversal a través de MEB a 350X: a) Vecalloy B y b) Alpha Plus+SS420.

En la Figura 3 se observan, de igual manera, las micrografías de las secciones transversales de los recubrimientos obtenidas a través de microscopía electrónica de barrido (MEB). Se puede ver en ambos casos la presencia de poros interlamelares caracterizados por ubicarse entre las lamelas consecutivas y por presentar una

morfología alargada. De la misma manera, se observan algunas microgrietas posicionadas mayormente de forma vertical, las cuales se originan generalmente por la alta velocidad de enfriamiento de las lamelas durante la solidificación de los recubrimientos [11]. Asimismo, se puede observar específicamente en la Figura 3b, la marca de lo que se presume que sea el desprendimiento de alguna fase sobre el recubrimiento Alpha Plus+SS420, generado probablemente durante el proceso de preparación metalográfica realizado sobre la muestra analizada.

En vista de que la porosidad constituye un factor importante en el análisis del presente estudio, se determinaron los porcentajes de porosidad de cada uno de los recubrimientos a través del analizador de imagen ImageJ® a partir de las micrografías obtenidas mediante microscopía, y los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Porosidades internas y superficiales de los recubrimientos en estudio.

Recubrimiento	Porosidad interna (%)	Porosidad superficial (%)
Vecalloy B	3,20 ± 0,28	6,70 ± 0,99
AlphaP+SS420	5,27 ± 0,52	8,58 ± 0,58

Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)

En lo que respecta al análisis químico semicuantitativo, se muestran en las Figuras 4 y 5 los resultados obtenidos a través del estudio de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X para los recubrimientos Vecalloy B y Alpha Plus+SS420 respectivamente. Se observa la presencia de tres zonas en común para ambos recubrimientos; una zona D correspondiente al sustrato de acero AISI 1020, una zona C correspondiente a la capa de adherencia Ni-Al y una zona B caracterizada por una coloración gris oscura correspondiente a óxidos metálicos, posiblemente óxidos de hierro, óxidos de cromo u óxidos compuestos tipo espinela [6].

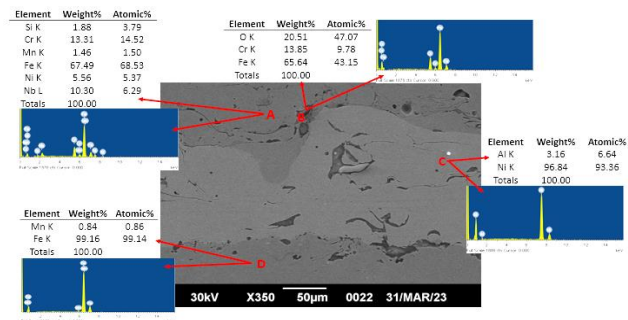


Figura 4. Análisis químico semicuantitativo del recubrimiento Vecalloy B realizado sobre la sección transversal a través de EDS.

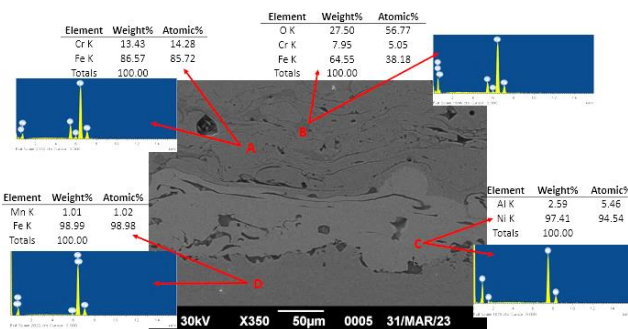


Figura 5. Análisis químico semicuantitativo del recubrimiento Alpha Plus+SS420 realizado sobre la sección transversal a través de EDS.

De la misma forma, se identifica en ambas muestras una zona A correspondiente a la matriz de cada recubrimiento, la cual está conformada por elementos como el hierro, cromo, niobio, níquel, silicio y manganeso en el caso del Vecalloy B, y por hierro y cromo en el caso del Alpha Plus+SS420, concordando estos resultados con las composiciones indicadas por los respectivos fabricantes de los recubrimientos [7,8]. Cabe destacar que el comportamiento observado en las Figuras 4 y 5 se mantuvo prácticamente constante para ambos recubrimientos en toda el área de las muestras analizadas, no observándose variaciones significativas en las respectivas composiciones químicas.

Difracción de Rayos X (DRX)

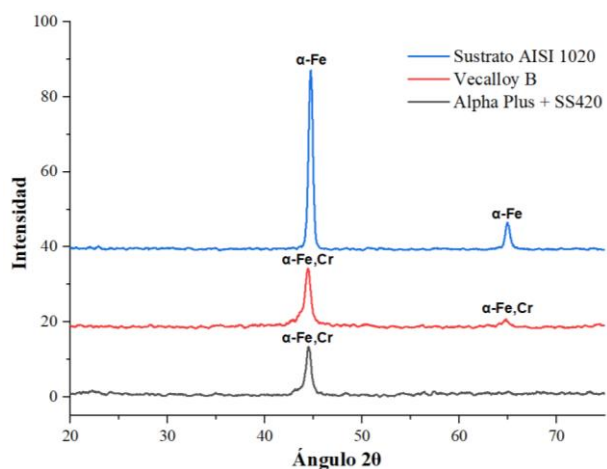


Figura 6. Patrones de difracción de rayos X (DRX) obtenidos para los materiales en estudio.

En la Figura 6 se muestran los difractogramas obtenidos a partir del estudio de difracción de rayos X. Según se observa, la única fase cristalina presente en los recubrimientos corresponde a la fase α -Fe,Cr, que consiste en una solución sólida de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) identificada con el símbolo de Pearson cI2 (cubic innercentered con 2 átomos), y la cual se forma normalmente en aleaciones Fe-Cr con distintos contenidos de cromo [12]. Otro aspecto importante que se observa corresponde a la baja intensidad y la mayor amplitud de los picos de difracción mostrados por ambos recubrimientos, lo que podría indicar, según investigaciones previas realizadas sobre recubrimientos base Fe-Cr [13,14], que la estructura de los mismos está conformada por una matriz principalmente amorfa con nanocristales incrustados de la fase α -Fe,Cr. Por otra parte, a diferencia de los recubrimientos, se observa que para el sustrato los picos de difracción obtenidos presentan mayor definición e intensidad, aspectos que son características de un material cristalino. Asimismo, se observa que la fase principal corresponde a la fase α -Fe, propia del AISI 1020 [15,16]. En la Tabla 4 se muestra el contenido de fase cristalina y fase amorfa de cada recubrimiento, los cuales fueron determinados a través del método del Índice de Cristalinidad [17,18]. Cabe destacar que los resultados

obtenidos concuerdan con resultados indicados previamente por otros investigadores, quienes indican que los recubrimientos depositados mediante proyección térmica pueden alcanzar un nivel de amorfismo entre 79 y 93% dependiendo de la técnica de deposición utilizada [19]. Ha sido considerado por algunos autores que la alta fracción de fase amorfa de este tipo de recubrimiento se debe principalmente a la alta velocidad de solidificación de las lamelas, la cual puede alcanzar hasta 10^5 K/s, así como también a la alta capacidad de formación de vidrio de los elementos aleantes (*glass forming ability*) [13,14].

Tabla 4. Índices de Cristalinidad obtenidos para los recubrimientos en estudio.

Recubrimiento	Índice de cristalinidad (%)	Fase amorfa (%)
Vecalloy B	13,91	86,09
AlphaP+SS420	12,51	87,49

Ensayos electroquímicos

Las curvas obtenidas a partir del ensayo de polarización potenciodinámica se muestran en la Figura 7. Se observa que los materiales mostraron un comportamiento activo a lo largo de todo el barrido de potencial. Los potenciales de corrosión obtenidos, así como las densidades de corriente de corrosión se pueden observar en la Tabla 5.

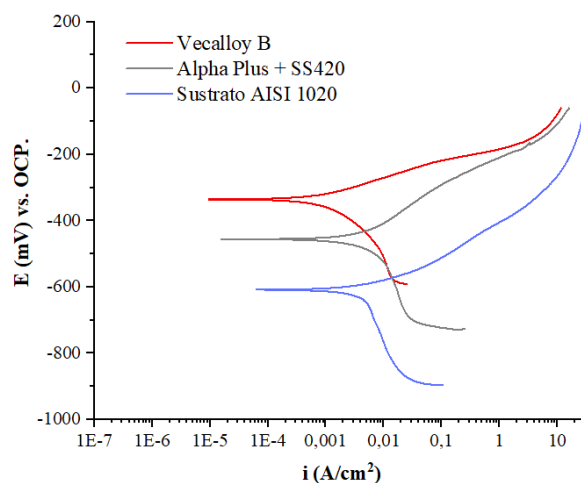
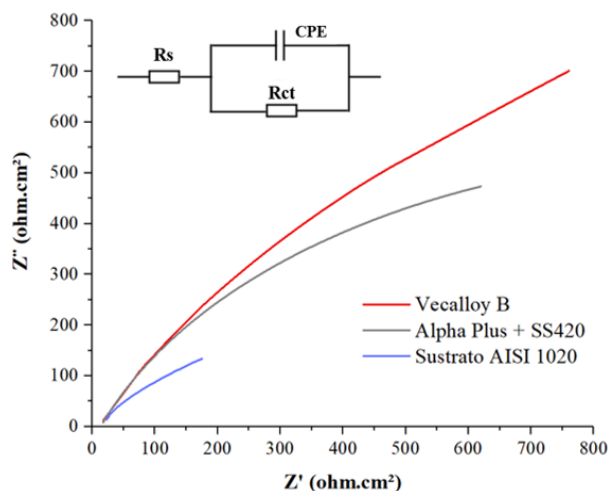


Figura 7. Curvas de polarización mostradas por los materiales en estudio en NaCl al 3,5%.

Tabla 5. Valores obtenidos a partir de las curvas de polarización de los materiales estudiados.

Material	E_{corr} (mV)	i_{corr} (mA/cm ²)
Vecalloy B	-341,66	1,13
AlphaP+SS420	-454,12	3,07
AISI 1020	-608,98	4,14

**Figura 8.** Diagramas de Nyquist mostrados por los materiales en estudio en NaCl al 3,5%.

Se observa que el recubrimiento Vecalloy B presenta el mejor comportamiento electroquímico al mostrar la menor densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}) más noble, lo que indica que este recubrimiento posee la mayor resistencia a la corrosión respecto a los demás materiales evaluados. El recubrimiento Alpha Plus+SS420, por su parte, muestra una menor resistencia a la corrosión en comparación al Vecalloy B, pero superior a la del sustrato AISI 1020, siendo este último material el que presenta la menor resistencia a la corrosión mostrando la mayor densidad de corriente de corrosión y el potencial de corrosión menos noble. Con el fin de corroborar los resultados obtenidos en el ensayo de polarización potenciodinámica, se realizó un ensayo de espectroscopía de impedancia electroquímica, cuyos diagramas de Nyquist obtenidos pueden ser visualizados en la Figura 8. Según se observa, el recubrimiento Vecalloy B muestra un semiarco de mayor diámetro en comparación con los demás materiales,

indicando que este recubrimiento posee una mayor resistencia a la transferencia de carga, y por ende también contra la corrosión, concordando efectivamente con lo mostrado anteriormente. Los resultados obtenidos a partir del ajuste correspondiente a través del circuito de Randles se muestran en la Tabla 6, donde R_{ct} corresponde a la resistencia a la transferencia de carga y CPE a la capacidad de almacenamiento de carga.

Tabla 6. Valores obtenidos a partir de los diagramas de Nyquist de los materiales estudiados.

Material	R_{ct} (Ω .cm ²)	CPE (μ F)
Vecalloy B	2409	169
AlphaP+SS420	2173	805
AISI 1020	721,4	1330

Para analizar los resultados obtenidos, se deben tener en cuenta algunos factores microestructurales importantes, siendo uno de ellos el nivel de cristalinidad presente en los materiales en estudio. Se ha encontrado en algunas investigaciones que la resistencia contra la corrosión en materiales metálicos disminuye considerablemente con el aumento del nivel de cristalinidad, esto debido principalmente a la presencia de límites de grano o límites de fase. Estos sitios, debido a su alta energía, suelen presentar una alta susceptibilidad a ser atacados electroquímicamente por medios corrosivos, causando en estos casos corrosión intergranular, la cual representa un mecanismo de corrosión que puede degradar a gran velocidad materiales metálicos bajo servicio [4,20].

Otro factor importante y favorable para los recubrimientos con bajo nivel de cristalinidad corresponde a la ausencia de carburos o precipitados. Se ha encontrado que estas estructuras cristalinas tienden a concentrar en su interior gran cantidad de elementos protectores o pasivantes como el cromo, boro o niobio, con lo cual, las zonas adyacentes a estos carburos o precipitados quedan desprovistas o empobrecidas de estos elementos, originando en estos casos nanoceldas galvánicas de corrosión en las cuales

dichas estructuras actúan catódicamente frente a las zonas adyacentes que lo hacen anódicamente [21,22,23].

En vista de lo anteriormente expuesto, y con base en los resultados mostrados en la Tabla 4, se puede considerar que el bajo nivel de cristalinidad presentado por ambos recubrimientos pudiera ser uno de los factores más influyentes en el mejor comportamiento electroquímico mostrado en comparación con el acero AISI 1020.

Por otra parte, uno de los factores importantes que puede explicar la mayor resistencia contra la corrosión presentada por el recubrimiento Vecalloy B corresponde evidentemente a la composición química. La presencia de ciertos elementos de aleación puede contribuir indudablemente a un aumento en la resistencia contra la corrosión en materiales metálicos. Altos porcentajes de cromo, así como también ciertas cantidades de boro y niobio, pueden ayudar a la formación de óxidos que suelen ser bastante estables bajo ambientes salinos [21,24,25]. Asimismo, el níquel se considera también un elemento coadyuvante en el comportamiento frente a la corrosión ya que permite obtener una matriz con menor porosidad como resultado de una mejor cohesión entre las lamelas. Adicionalmente, este último elemento puede también formar óxidos estables que protegen en cierto grado al recubrimiento contra ambientes corrosivos [26,27,28].

Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta al comparar el comportamiento observado entre los recubrimientos Vecalloy B y Alpha Plus+420 consiste en el porcentaje de porosidad. Los poros, al igual que las microgrietas, tienden a actuar como vías o canales de difusión a través de los cuales el medio electrolítico penetra hacia el interior del recubrimiento causando un ataque corrosivo mayor [4,23,29]. En este sentido, se considera que el menor porcentaje de porosidad presentado por el recubrimiento Vecalloy B, según se observa en la Tabla 3, pudiera ser otra de las razones de la mayor resistencia contra la corrosión mostrada por este último recubrimiento.

En la Figura 9 se muestran las secciones transversales de los recubrimientos posterior a los ensayos electroquímicos. Se observa que el recubrimiento Vecalloy B pareciera presentar menor daño en comparación con el recubrimiento Alpha Plus+SS420, para el cual se observa lo que pareciera ser un mayor ataque corrosivo con el posible desprendimiento de las lamelas del recubrimiento en la zona superficial y subsuperficial.

De la misma manera, se muestran en la Figura 10 las superficies de ambos recubrimientos. Se visualiza un ataque considerablemente menor en el recubrimiento Vecalloy B. En contraparte, el recubrimiento Alpha Plus+SS420 muestra un daño generalizado mucho mayor con una superficie con mayor rugosidad, indicando que efectivamente se produjo delaminación del recubrimiento en la superficie.

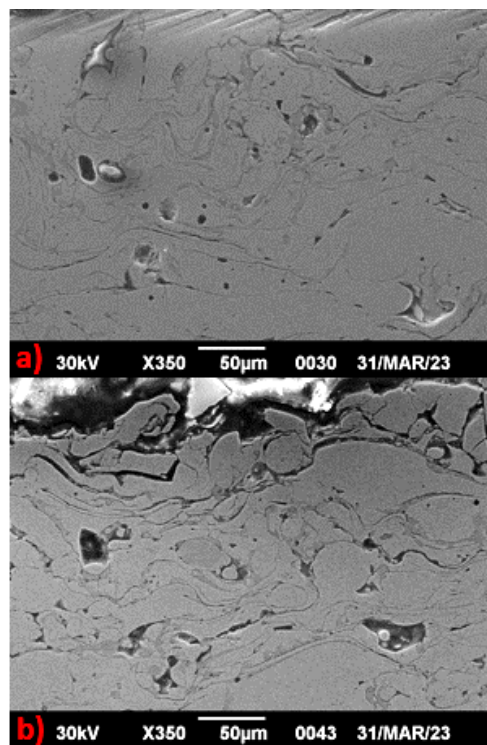


Figura 9. Sección transversal de los recubrimientos posterior a los ensayos electroquímicos a través de MEB a 350X: a) Vecalloy B y b) Alpha Plus+SS420.

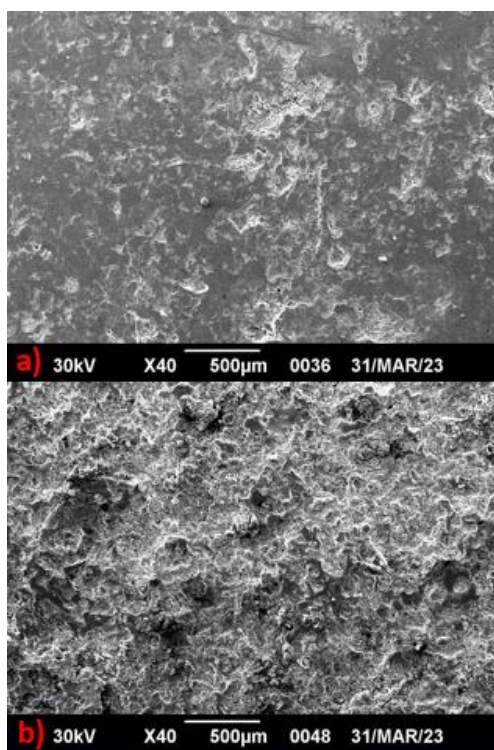


Figura 10. Superficie de los recubrimientos posterior a los ensayos electroquímicos a través de MEB a 40X: a) Vecalloy B y Alpha Plus+SS420.

CONCLUSIONES

La microestructura de los recubrimientos está conformada principalmente por lamelas, intercaladas con poros, óxidos y partículas no fundidas. Se observaron además algunas microgrietas y poros interlamelares entre las lamelas de los recubrimientos.

Los recubrimientos presentan una estructura principalmente amorfa entremezclada con nanocristales de la fase α -Fe,Cr, lo que se debe probablemente a la alta velocidad de enfriamiento de las lamelas que puede alcanzar hasta 10^5 K/s.

El recubrimiento Vecalloy B presentó la mayor resistencia contra la corrosión respecto a los demás materiales, posiblemente por su estructura amorfa, por la presencia de elementos aleantes resistentes a la corrosión y por su baja porosidad.

El ataque por corrosión presentado en el recubrimiento Vecalloy B parece ser de menor gravedad en comparación con el recubrimiento Alpha Plus+SS420, observándose

para este último el posible desprendimiento de las lamelas en la región superficial y subsuperficial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Nuevos Materiales y Corrosión (CENMACOR) y al Laboratorio de Electroquímica y Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, así como también al Laboratorio E de la Universidad Simón Bolívar. De la misma manera, se agradece a la empresa Plasmatec Ingenieros C.A. por el aporte en la obtención de los materiales estudiados.

REFERENCIAS

- [1] Páez, J., Rueda, O. (2012) "Evaluación electroquímica de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC aplicados por proyección térmica sobre un acero SAE-AISI 1015". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [2] Si, C., Duan, B., Zhang, Q., Cai, J., Wu, W. (2020) "Microstructure, corrosion-resistance, and wear-resistance properties of subsonic flame sprayed amorphous Fe-Mo-Cr-Co coating with extremely high amorphous rate" *Journal of Materials Research and Technology*. 9, pp. 3292- 3303.
- [3] Liu, W., Shieu, F., Hsiao, W. (2014) "Enhancement of wear and corrosion resistance of iron-based hard coatings deposited by high-velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spraying" *Surface & Coatings Technology*. 249, pp. 24-41.
- [4] Qiao, L., Wu, Y., Hong, S., Cheng, J., Wei, Z. (2019) "Influence of the high-velocity oxygen-fuel spray parameters on the porosity and corrosion resistance of iron-based amorphous coatings" *Surface & Coatings Technology*. 366, pp. 296-302.
- [5] Cheng, J., Wu, Y., Shen, W., Hong, S., Qiao, L., Wang, Y. (2020) "A study on hot corrosion performance of high velocity arc-sprayed FeCrNiAlMnB/Cr₃C₂ coating exposed to Na₂SO₄ + K₂SO₄ and Na₂SO₄ + NaCl" *Surface & Coatings Technology*. 397.

- [6] Kamal, S., Jayaganthan, R., Prakash, S. (2009) "Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr_3C_2 -25%NiCr coatings on nickel and iron-based superalloys" *Surface & Coatings Technology*. 203, pp. 1004-1013.
- [7] Polymet Corporation. (2022) "Vecalloy B Amorphous Alloy".
- [8] Arellana, S., Ferreira, R. (2014) "Evaluación de la resistencia al desgaste por abrasión de tres recubrimientos aplicados por termorociado por arco eléctrico". Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela.
- [9] ASTM International. (2017) "Norma ASTM E3: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens".
- [10] Struers, Ensuring Certainty. (2023).
- [11] Newbery, A., Grant, S., Neiser, R. (2005) "The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying" *Surface & Coatings Technology*. 195, pp. 91-101.
- [12] Baker, H., (2016) *Alloy Phase Diagrams, Metal Handbook*, USA, American Society for Metals, 3.
- [13] Cheng, J., Liang, X., Xu, B., Wu, Y. (2009) "Formation and properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloy coating prepared by wire arc spraying process" *Journal of Non-Crystalline Solids*. 355, pp. 1673-1678.
- [14] Lin, J., Wang, Z., Lin, P., Cheng, J. (2013) "Microstructure and Corrosion Resistance of Fe-Based Coatings Prepared by Twin Wires Arc Spraying Process" *Journal of Thermal Spray Technology*. 23, pp. 333-339.
- [15] Maharjan, N., Zhou, W., Wu, N. (2020) "Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere" *Surface & Coatings Technology*. 385.
- [16] Marulanda, D., Wongsangam, J., Jiménez, H. (2017) "Effects on hardness and microstructure of AISI 1020 lowcarbon steel processed by high-pressure torsion" *Journal of Materials Research and Technology*. 253.
- [17] Navarro, F., Martínez G., Martínez, A., Castaño, V., Rivera, J., Medellín, F., Velasco, C. (2013) "Effects on the Thermo-Mechanical and Crystallinity Properties of Nylon 6,6 Electrospun Fibres Reinforced with One Dimensional (1D) and Two Dimensional (2D) Carbon" *Materials*. 6, pp. 3494-3513.
- [18] Dinnebier, R., Kern, A. (2015) "Quantification of amorphous phases-teory". Institute For Solid State Research of Stuttgart.
- [19] Xie, L., Xiong, X., Zeng, Y., Wang, Y. (2019) "The wear properties and mechanism of detonation sprayed iron-based amorphous coating" *Surface & Coatings Technology*. 366, pp. 146-155.
- [20] Huang, Y., Guo, Y., Fan, H., Shen, J. (2012) "Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B amorphous coating with high corrosion resistance" *Materials Letters*. 89, pp. 229-232.
- [21] Bijalwan, P., Singh, C., Kumar, A., Sarkar, K., Rani, N., Laha, T., Banerjee, A., Mondal, K. (2021) "Corrosion behaviour of plasma sprayed Fe based metallic glass coatings in 3.5% NaCl solution" *Journal of Non-Crystalline Solids*. 567.
- [22] Koga, G., Ferreira, T., Guo, Y., Coimbra, D., Jorge Jr, A., Kiminami, C., Bolfarini, C., Botta, W. (2021) "Challenges in optimizing the resistance to corrosion and wear of amorphous Fe-Cr-Nb-B alloy containing crystalline phases" *Journal of Non-Crystalline Solids*. 555.
- [23] Cui, S., Zhai, H., Li, W., Fan, X., Li, X., Ning, W., Xiong, D. (2020) "Microstructure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coating prepared by detonation spray" *Surface & Coatings Technology*. 399.
- [24] Kumar, S., Jyothirmayi, A., Wasekar, N., Joshi, S. (2016) "Influence of annealing on mechanical and electrochemical properties of cold sprayed niobium coatings" *Surface & Coatings Technology*. 296, pp. 124-135.
- [25] Olaya, J., Hernández, W. (2013) "Producción y resistencia a la corrosión de multicapas de nitruro de niobio-niobio" *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 33.

- [26] Kazasidis, M., Yin, S., Cassidy, J., Volkov-Husovic, T., Vlahovic, M., Martinovic, S., Kyriakopoulou, E., Lupoi, R. (2020) “Microstructure and cavitation erosion performance of nickel Inconel 718 composite coatings produced with cold spray” *Surface & Coatings Technology*. 382.
- [27] Habib, K., Leal, D., Heredia, J., Serrano, J., Llopis, R., López, D., Mohammed, S. (2022) “Effects of thermal spraying technique on the remelting behavior of NiCrBSi coatings” *Surface & Coatings Technology*. 444.
- [28] Yoo, Y., Lee, S., Kim, J., Kim, J.S., Lee, C. (2008) “Effect of heat treatment on the corrosion resistance of Ni-based and Cu-based amorphous alloy coating” *Journal of Alloys and Compounds*. 461, pp. 304-311.
- [29] Guo, R., Zhang, C., Yang, Y., Peng, Y., Liu, L. (2012) “Corrosion and wear resistance of a Fe-based amorphous coating in underground environment” *Intermetallics*. 30, pp. 94-99.