

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS  
DEL SISTEMA  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  MICROMÉTRICOS DEPOSITADOS MEDIANTE  
PROYECCIÓN TÉRMICA

ANGIE VANESSA PINZÓN MORA  
KAREN JULIETH URREGO ROA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2017

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS  
DEL SISTEMA  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  MICROMÉTRICOS DEPOSITADOS MEDIANTE  
PROYECCIÓN TÉRMICA

ANGIE VANESSA PINZÓN MORA  
KAREN JULIETH URREGO ROA

Trabajo de grado (modalidad: proyecto de investigación) para optar al título de  
Ingeniera Metalúrgica

Director

MAURICIO RINCÓN ORTIZ  
Doctor en ciencia de materiales

Codirector

ANDRES GIOVANNI GONZALEZ HERNANDEZ  
Doctor en ciencia de materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2017

## DEDICATORIA

*A Dios por acompañar a mi familia en cada uno de los momentos de nuestras vidas, por siempre estar a mi lado dándome fuerzas y sabiduría, por la oportunidad de culminar esta meta, ser la razón de mi existencia y manifestarme su amor infinito.*

*A mis padres, Ana Rosa y Danilo, por ser mi motor y guía, por brindarme todo su amor, sus grandes enseñanzas y conocimientos, por estar siempre para mí, apoyándome en cada instante de mi vida, por sus grandes esfuerzos a pesar de las adversidades. A ellos, quienes son mi mayor ejemplo de vida y quienes han hecho de mí lo que soy y seré. Gracias papitos.*

*A mi hermano Nicolás, mi primer amigo, quien siempre ha estado a mi lado, con quien crecí y disfruté los mejores juegos y alegrías, por brindarme su inmenso cariño a pesar de todos esos momentos difíciles, quien me motiva a dar lo mejor de mí para ser su ejemplo y guía.*

*A toda mi familia, quienes, de una u otra manera, con sus consejos y sus palabras de aliento hicieron que este sueño sea posible, pero especialmente a mi abuela Ofelina, quien siempre confió en mí, me llenó de amor y me enseñó que todo es posible.*

*A la familia que se escoge, aquellos amigos que la vida me ha prestado, a los que siguen a mi lado sin importar las circunstancias, Karen, Catalina y todos quienes me apoyaron y me brindaron su amistad durante esta etapa de nuestras vidas. Especialmente a mi gran amigo y amor José, que con su cariño y alegría me ha animado en los momentos de dificultad, ha sido mi apoyo incondicional llenándome de fuerzas y sabiduría, quien me ha dedicado estos últimos años en los en los que hemos crecido juntos de la mano.*

*Angie Vanessa Pinxón Mora*

*A Dios, le debo todo lo que soy y lo que tengo, sin él en mi vida nada hubiese sido posible, cada sueño y meta que me he propuesto, junto a él lo he logrado, como la oportunidad que me ha brindado para poder culminar esta etapa y sé que con él en mi vida todo es más fácil puesto que siempre me manifiesta su infinito amor hacia mi familia y siempre deseo estar con él, para así poder llevar a cabo los siguientes retos que vienen para mi vida.*

*A mis maravillosos padres y hermano que siempre han sido mi mayor inspiración para ser mejor persona cada día y para esforzarme cada vez más, por ellos soy quien soy, le debo tanto a ellos, sus esfuerzos, consejos, su amor incondicional hacia mí, porque siempre deseare ser para ellos su mayor orgullo.*

*A mi especial y única familia, gracias por confiar en mí, por darme siempre la voz de aliento que tanto necesitaba para poder seguir adelante con mis metas.*

*A mi compañero de vida Andrés López, por siempre estar hay para mí, en todo momento, por acompañarme desde el inicio y por nunca dudar de mí por darme todo el apoyo que en ocasiones necesitaba, por su paciencia, respeto, por ser mi mejor amigo y su amor único e incondicional conmigo y con los míos.*

*A mis mejores amigos Angie, Catalina, Carlos, y todos aquellos quienes me brindaron su amistad, sin ellos el paso por la universidad no hubiera sido igual, gracias por tanta paciencia, por su inmenso apoyo, por sus innumerables consejos, por esos momentos de risas y tristezas, siempre le daré las gracias a Dios por ponerlas en mi camino, no se logran imaginar cuanto los quiero y los admiro, deseo inmensamente que siempre estemos unidos, a pesar de las cosas maravillosas que están por venir.*

*Karen Julieth Urrego Roa*


## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar una tesis y con ella una etapa de la vida, es inevitable llenarse de felicidad y de orgullo, pero nada de eso sería posible sin la ayuda de personas que de una u otra manera aportaron parte de sí para la ejecución de tan anhelado sueño.

A nuestro director Dr. Mauricio Rincón y nuestro codirector Dr. Andrés González por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto de grado, por confiar en nosotras, brindarnos su apoyo, sus valiosas enseñanzas y acompañamiento en este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por habernos abierto sus puertas y brindarnos una formación integral. Al Laboratorio de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico Guatigará y su personal. A toda la familia UIS que hizo parte de nuestro proceso de formación personal y profesional. Y en especial a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales y sus técnicos por la ayuda y servicios prestados en la realización de nuestra tesis.

Al departamento de Ingeniería de Materiales y al Grupo de investigación GIMACYR y GIPIMME de la Universidad de Antioquia quienes nos acogieron y brindaron su apoyo en la elaboración de los recubrimientos y pruebas de caracterización, contribuyendo de manera significativa en la realización de este proyecto.

Agradecimientos al FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGIA Y LA INNOVACIÓN “FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS” COLCIENCIAS, por  su apoyo en la financiación de este trabajo, bajo el proyecto: “Recubrimientos cerámicos nanoestructurados depositados mediante proyección térmica, una alternativa para la sustitución de tecnologías convencionales como el cromado” bajo contrato de financiamiento de recuperación contingente No. FP44842-302-2016.

Finalmente agradecemos a todas y cada una de las personas que contribuyeron a hacer de este proyecto un gran éxito. A todos ellos, muchas gracias.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	19
1. ANTECEDENTES .....	21
2. OBJETIVOS .....	23
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	23
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL.....	24
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS .....	25
3.2 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO .....	25
3.3 APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA.....	26
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	28
3.4.1 Caracterización físico-química.....	28
3.4.2 Caracterización electroquímica.....	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	31
4.1.1 Sustrato .....	31
4.1.2 Polvos .....	31
4.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	32
4.3 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA.....	35

4.4 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL, RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN Y ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.	40
4.5 DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES CRÍTICOS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTOS $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ UTILIZANDO MEDICIONES DE POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO Y CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICAS. ....	44
5. CONCLUSIONES.....	46
6. RECOMENDACIONES .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS.....	55

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Condiciones proyección térmica con llama oxiacetilénica.	26
Tabla 2. Especificaciones de la codificación de las muestras comparadas con las condiciones del tipo de llama, y los polvos empleados para la aplicación en el sustrato.	27
Tabla 3. Rugosidades del sustrato y recubrimientos.	28
Tabla 4. Condiciones de trabajo de las pruebas electroquímicas.	30
Tabla 5. Composición química del acero AISI/SAE 1020 en estudio y comercial.	31
Tabla 6. Composición química de los polvos analizada por FRX.	32
Tabla 7. Espesor de la capa del recubrimiento del sistema de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .	34
Tabla 8. Porosidad de la capa del recubrimiento del sistema de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .	35
Tabla 9. Valores de $R_p$ obtenidos según el circuito equivalente de los resultados de impedancia de los recubrimientos a diferentes tiempos de exposición en solución.	38
Tabla 10. Datos obtenidos de la técnica de extrapolación de Tafel a 7 días de exposición.	42
Tabla 11. Datos de la técnica de Polarización Lineal a 7 días de exposición.	42
Tabla 12. Datos de la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 7 días de exposición.	42

Tabla 13. Datos de la técnica de Polarización Lineal 1 día de exposición.	56
Tabla 14. Datos de la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 1 día de exposición.	56

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología experimental de la investigación.	24
Figura 2. Medidas de la rugosidad, empleando el Rugosímetro Mitutoyo SJ-201.	26
Figura 3. Aplicación de los recubrimientos en la cámara de proyección térmica Areste.	27
Figura 4. Montaje experimental para el ensayo de corrosión compuesto de: a) Potenciostato y celda de Faraday, b) Celda electroquímica y c). Esquema del montaje.	29
Figura 5. Análisis morfológicos de los polvos: a) polvos SG 107, b) polvos SG 108.	32
Figura 6. Morfología de la superficie de los recubrimientos a) R7O, b) R8O, c) R7N y d) R8N.	33
Figura 7. Morfología de la sección transversal de los recubrimientos a) R7O, b) R8O, c) R7N y d) R8N.	33
Figura 8. Circuito equivalente.	35
Figura 9. Diagrama de Nyquist: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.	36
Figura 10. Diagrama Log Modulo vs Log Frecuencia: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.	40

Figura 11. Curvas de Extrapolación de Tafel del sistema de recubrimiento $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl a 7 días de exposición.	43
Figura 12. Potenciales de corrosión medidos en un periodo de tiempo de una hora: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.	44
Figura 13. Morfología de la sección transversal del recubrimiento de cromo duro.	55
Figura 14. Curvas de Extrapolación de Tafel a partir de 10 mv de la región catódica del sistema de recubrimiento, acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl a 7 días de exposición.	57
Figura 15. Curvas resistencia a la polarización del sistema de recubrimiento, acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.	58

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Caracterización físico química del cromo duro.	55
ANEXO B. Velocidad de corrosión del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , acero AISI/SAE 1020 y cromo duro.	56
ANEXO C. Curvas de la técnica de Extrapolación de Tafel a partir de 10 mV de la región catódica.	57
ANEXO D. Curvas de la técnica de resistencia a la polarización.	58

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEL SISTEMA  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  MICROMÉTRICOS DEPOSITADOS MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA\*

**AUTORES:** Pinzón Mora, Angie Vanessa\*\*  
Urrego Roa, Karen Julieth\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Cromo duro, proyección térmica oxiacetilénica, recubrimientos cerámicos del sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , resistencia a la corrosión.

**DESCRIPCIÓN:** El aumento en la demanda de materiales con mejores propiedades físicas, químicas y mecánicas para aplicaciones en procesos industriales ha generado avances en el campo de la ingeniería de superficies, donde el cromado es uno de los recubrimientos más empleados dadas sus ventajas estéticas y técnicas, no obstante, uno de los desechos de este proceso que provienen directamente del cromo, exigen un manejo ambiental riguroso, ya que es altamente perjudicial para la vida humana y para el medio ambiente. Por estos motivos se han desarrollado alternativas técnicas, económicas y ambientalmente favorables que sustituyan a los procesos del cromado, como los recubrimientos cerámicos fabricados por proyección térmica, los cuales han tenido una particular atención por su novedoso desempeño en las diversas aplicaciones industriales ya que han mostrado mejoras en algunas de las propiedades que poseen los recubrimientos convencionales. En la presente investigación se elaboraron recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$  mediante proyección térmica oxiacetilénica empleando condiciones de llama oxidante y neutra. Posteriormente, se evaluó la morfología de los recubrimientos obtenidos por microscopía electrónica de barrido y luego se evaluó la resistencia a la corrosión en soluciones de NaCl 3,5% p/p a diferentes tiempos de exposición (1 y 7 días), empleando las técnicas electroquímicas de extrapolación de Tafel, espectroscopia de Impedancia Electroquímica y resistencia a la polarización. Los resultados mostraron que el recubrimiento compuesto por  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  (R7O) elaborado con una llama oxidante es una alternativa para la sustitución del cromado ya que tuvo un mejor comportamiento, presentando las velocidades de corrosión más bajas comparadas con los otros recubrimientos evaluados, incluido el cromo duro. Lo anterior, se debe a que su microestructura posee una mejor fusión y empaquetamiento de las partículas, impidiendo el transporte de la solución hacia el sustrato, evitando su ataque como sucedió en con los otros recubrimientos.

---

\*Proyecto de Grado. Modalidad: Proyecto de Investigación.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en ciencia de materiales. Codirector: Andrés Giovanni Gonzalez Hernandez, Doctor en ciencia de materiales.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE OF  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  SYSTEM COVERINGS DEPOSITED THROUGH THERMAL SPRAY \*

**AUTHORS:** Pinzón Mora, Angie Vanessa\*\*  
Urrego Roa, Karen Julieth\*\*

**KEYWORDS:** Hard- chromium, oxyacetylene thermal spray, ceramic coatings of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  system, resistance to corrosion.

**DESCRIPTION:** The increase in the demand for materials with better physical, chemical and mechanical properties for applications in industrial processes has generated advances in the field of surface engineering, where chromium is one of the most used coatings given its aesthetic and technical advantages, however, the waste from this process and that come directly from of chromium, which is hexavalent chromium ( $\text{CrO}_3$ ), require a rigorous environmental management, as it is highly detrimental to human life and the environment. For these reasons, technical, economical and environmentally friendly alternatives have been developed to replace chromed processes. In recent years ceramic coatings were manufactured by thermal spray, it has been particularly attention for their novel performance in various industrial applications since they have shown improvements in some of the properties that possess the conventional coatings. In the present investigation ceramic coatings of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  (Ref. SG 107) and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$  (Ref. SG 108) were elaborated by thermal spray by oxyacetylene combustion using oxidative and neutral flame conditions. Subsequently, the coatings were evaluated the morphology of they obtained by scanning electron microscopy and the corrosion resistance in 3.5% w / w NaCl solutions was evaluated at different exposure times (1 and 7 days), using The electrochemical techniques of Tafel extrapolation, Electrochemical Impedance spectroscopy and polarization resistance. The results showed that the coating composed of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  (R7O) made with an oxidizing flame by means of thermal spray is an alternative for the replacement of the hard chromium because it had a better performance, presented the lower corrosion rates compared to the other coatings evaluated, including hard chromium. This is because its microstructure has a better fusion and packing of the molten particles, preventing the transport of the solution to the substrate avoiding its attack as happened with the other coatings.

---

\* Degree project. Modality: Research project.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en ciencia de materiales. Coadviser: Andrés Giovanni Gonzalez Hernandez, Doctor en ciencia de materiales

## INTRODUCCIÓN

El cromado es considerado como una práctica de vital importancia en las actividades industriales tanto en Colombia como a nivel mundial, principalmente en la industria automotriz, aeronáutica, textil y en la industria del papel, así como en la industria maderera, entre otras, dado a que brinda ventajas estéticas y técnicas en cada una de las aplicaciones en las que es implementado, mejorando el acabado superficial de las piezas y otorgándoles una mayor resistencia, durabilidad y protección frente a las diferentes condiciones atmosféricas a las que se es expuesto [1].

Sin embargo, es una técnica que requiere un exigente control ya que, durante la aplicación de este recubrimiento, se generan desechos nocivos por la presencia de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ), el cual es altamente perjudicial tanto para el medio ambiente como para la vida humana a tal punto que la legislación a nivel mundial, los organismos de seguridad industrial, ambiental y el campo de la medicina han divulgado sus fatales efectos. En el área de la medicina puede ocasionar alteraciones en la piel al estar en contacto con una alta concentración del cromo hexavalente, además de problemas en el sistema respiratorio, digestivo y hematológico generando en algunos casos efectos carcinogénicos de acuerdo con las investigaciones realizadas por la United States Environment Protection Agency (EPA) y la International Agency for Research on Cancer (IARC), a su vez en el año 1999 estudios de un grupo de pediatras y ginecólogos de Firmat afirman que el compuesto tiene incidencia sobre los abortos espontáneos y malformaciones en bebés. De igual manera a nivel ambiental centros de investigación europeos y norteamericanos reportan al cromo hexavalente como principal causante de contaminación del aire y del agua [1,2].

Es por ello que se quieren implementar alternativas como los recubrimientos de Ni-WC los cuales se elaboran mediante proyección térmica, que sustituyan el cromado, a pesar de que estos recubrimientos son en primera instancia los más utilizados para sustituir el cromado duro y decorativo, no son económicamente viables debido a que el precio del níquel fluctúa de manera considerable ocasionando la búsqueda de materia prima que cumplan con los requerimientos técnicos y económicos. Una solución económica y ambientalmente factible a ello son los recubrimientos elaborados mediante proyección térmica por combustión oxiacetilénica a partir de materiales cerámicos empleando un aglomerado de partículas con tamaño micrométrico que poseen excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión idóneas para este tipo de aplicaciones, los cuales han tenido una amplia utilización en el ámbito industrial, el 64% de los usos dados a este tipo de recubrimientos ha estado destinado a la protección de componentes de motores, el 17 % a aumentar la vida útil de herramientas de corte y el 14,6 % para protección de diversos componentes expuestos a condiciones de desgaste severo y el porcentaje restante ha sido utilizado en múltiples aplicaciones [1,3,4,5].

Finalmente con base en lo anterior, el presente trabajo de grado de investigación pretende evaluar el comportamiento frente a la corrosión de recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$  elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica con condiciones de llama tanto oxidantes como neutras, con el fin de que sean una alternativa técnica, económica y ambientalmente favorable para remplazar el cromo duro, utilizando técnicas electroquímicas de extrapolación de Tafel, Espectroscopía de Impedancia Electroquímica y Resistencia a la polarización en una solución de NaCl al 3,5% p/p, a diferentes tiempos de exposición (1 y 7 días).

## 1. ANTECEDENTES

La Environmental Protection Agency -EPA- de Estados Unidos en 1994 y la Restriction of Hazardous Substances Directive -RoHS- de la comunidad europea en el 2006 (para las aplicaciones en la industria eléctrica, electrónica) y en el 2007 (para la industria automotriz), restringieron los procesos de cromado que usan cromo hexavalente debido a los factores nocivos. [6] Es por ello que desde la década de los noventa se ha motivado la búsqueda de nuevas alternativas para la sustitución de los procesos de cromado [7].

Los recubrimientos elaborados mediante proyección térmica por llama de baja velocidad (Flame Spray) a partir de partículas cerámicas es considerada una técnica prometedora para combinar las ventajas del sustrato metálico y los recubrimientos cerámicos, siendo estas una alternativa técnica, económica y ambientalmente favorable para reemplazar el cromo duro en los procesos industriales que requieren proteger piezas expuestas a condiciones severas de desgaste y corrosión, satisfaciendo simultáneamente las propiedades mecánicas y químicas necesarias para la aplicación [6, 7, 8].

Las regulaciones impuestas al uso de cromo hexavalente generado en la elaboración de recubrimientos de cromo duro y cromado decorativo han jugado un papel importante en el desarrollo y demanda de la proyección térmica como una alternativa para la sustitución del cromado. Existe así un aumento exponencial en la implementación de esta técnica y por ende una mayor demanda en los polvos utilizados como materia prima para la elaboración de los recubrimientos, así como en los equipos empleados, hasta el punto que el mercado de los polvos en el 2011 fue superior a los 100 millones de dólares y el de los equipos excedió los 70 millones de dólares [9].

A pesar de ello existen pocos estudios relacionados con la elaboración de recubrimientos empleando proyección térmica oxiacetilénica, algunos de ellos tratan por separado el estudio de la corrosión y resistencia al desgaste, las cuales son propiedades que se requieren para obtener un idóneo recubrimiento por proyección térmica que tenga la capacidad de sustituir el cromo duro. Uno de los trabajos más recientes publicado por N. Espallargas *et al.* [10] en el año 2007 establece que la ausencia de poros y grietas de tamaño micro y nanométrico son muy importantes cuando se requiere resistencia a la corrosión debido a que el electrolito penetra a través de estos defectos para llegar al sustrato, ocasionando así el deterioro del sustrato.

Por otro lado, F. Vargas *et al.* [11], investigaron las propiedades tribológicas y mecánicas de los recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  elaborados por proyección térmica por combustión y plasma, al igual que la penetración de una solución salina en los recubrimientos  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  elaborados por rociado de plasma atmosférico [11]. Donde dichos autores encontraron que aquellos recubrimientos con una estructura más compacta obtenida con un tamaño de partícula más pequeño proporcionan una mejor protección contra la corrosión en una solución de agua salada que estructuras de recubrimientos más gruesos, disminuyendo la tasa de corrosión con el tiempo de exposición debido al agotamiento de los cloruros disponibles en los revestimientos para reaccionar electroquímicamente con el sustrato superficial. [12]

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento frente a la corrosión de los recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$  elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica expuestos a una solución de 3,5% p/p de NaCl a diferentes tiempos de exposición usando técnicas electroquímicas y de caracterización microestructural.

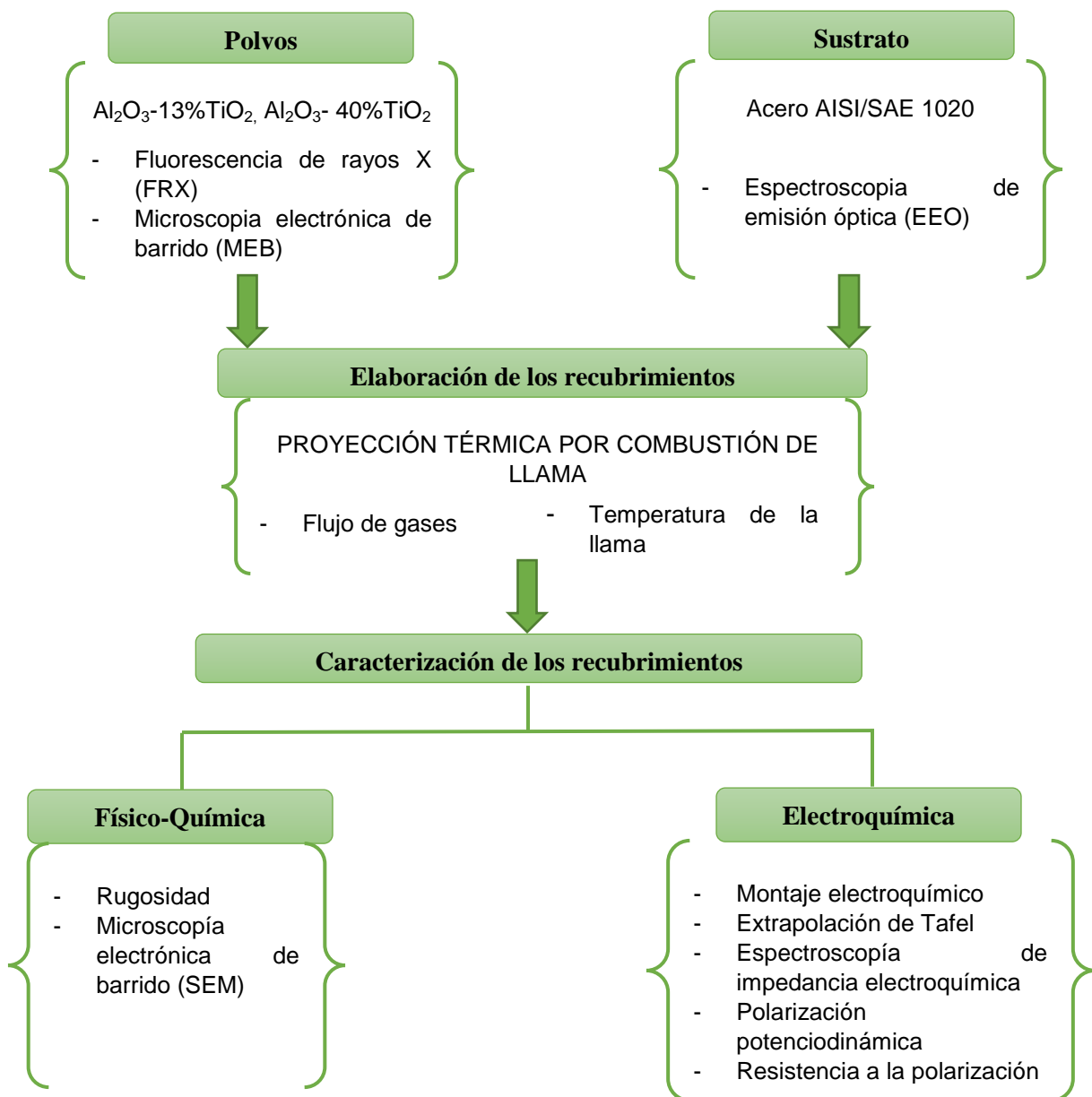
### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar dos relaciones de gases ( $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$ ) en el proceso de proyección térmica y su efecto en la resistencia en la corrosión de los recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$ , empleando las técnicas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), Extrapolación de Tafel y Microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Determinar las velocidades de corrosión de los recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$  empleando las técnicas de extrapolación de Tafel y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.
- Determinar los potenciales críticos del sistema sustrato–recubrimientos  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$  elaborado mediante proyección térmica oxiacetilénica en solución de 3,5% p/p de NaCl a diferentes tiempos de exposición utilizando mediciones de potencial a circuito abierto y curvas de polarización potenciodinámicas.

### 3. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El esquema mostrado en la Fig. 1 representa el desarrollo experimental seguido para la realización del presente trabajo.

**Figura 1.** Descripción experimental de la investigación.



La metodología experimental se llevó a cabo mediante las etapas que se describen a continuación, buscando obtener información que conduzca a establecer si los recubrimientos cerámicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40\%TiO}_2$  depositados mediante proyección térmica oxiacetilénica, tienen la capacidad de aumentar la resistencia a la corrosión respecto a los recubrimientos de cromo duro.

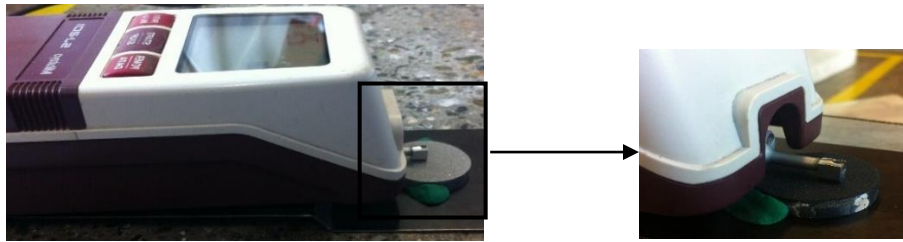
### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS**

Se realizó un análisis químico mediante fluorescencia de Rayos X (FRX) a los materiales empleados para la elaboración del recubrimiento, con el fin de corroborar la composición de los polvos de referencia Saint Gobain 107 y 108. Además, se realizó el análisis morfológico mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) que permitirá identificar la forma y tamaño de las partículas.

### **3.2 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO**

Las muestras a recubrir fueron fabricadas con una barra de acero AISI/SAE 1020 con un diámetro de 2,54 cm (1 pulg.) y 1,9 cm (3/4 pulg.). La caracterización química del material de fabricación de las probetas se realizó mediante espectroscopía de emisión óptica (EEO). Finalmente, las probetas fueron preparadas superficialmente mediante un chorro abrasivo con partículas de corindón, donde se obtuvieron rugosidades promedio (Ra) superiores a 5  $\mu\text{m}$  medidas con el rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (Fig. 2), con el fin de eliminar óxidos, grasas y otras impurezas de la superficie a recubrir, además de obtener una buena adherencia entre el recubrimiento y el acero. Posteriormente los sustratos fueron limpiados en baño de ultrasonido con etanol con el fin de retirar los residuos de la preparación superficial y contaminantes orgánicos.

**Figura 2.** Rugosímetro Mitutoyo SJ-201.



### 3.3 APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

Los recubrimientos cerámicos elaborados por proyección térmica a partir de una llama oxiacetilénica se realizaron a través del uso de una antorcha Eutectic-Castolin referencia Terodyn 2000, con una mezcla de oxígeno y acetileno como gas combustible. Adicionalmente se aplicó una presión de aire de 30 psi. Posteriormente se precalentó el sustrato hasta una temperatura de aproximadamente 300°C, para finalmente depositar las capas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> con dos condiciones de llama (oxidante y neutra).

Las condiciones de proyección de los recubrimientos cerámicos se describen en la Tabla 1. A su vez, con el fin de identificar las muestras elaboradas de una manera más sencilla, estos cuatro tipos de recubrimientos fueron codificados tal como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Condiciones proyección térmica con llama oxiacetilénica.

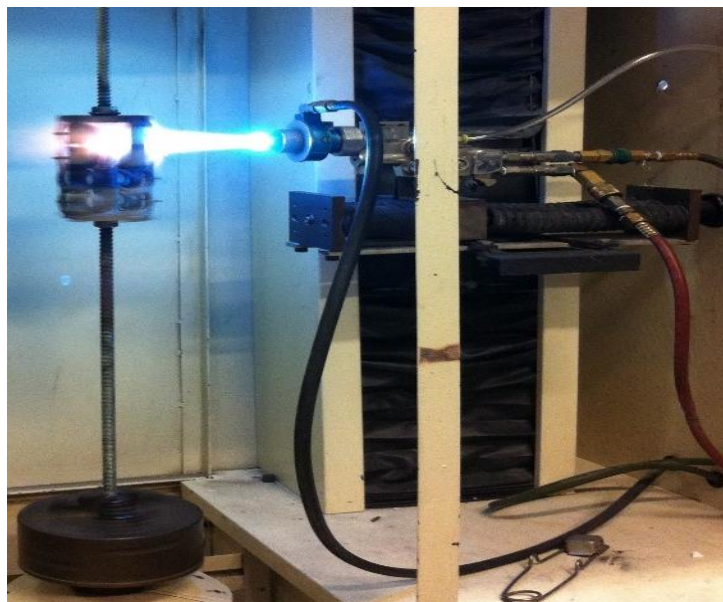
Condiciones		Oxidante		Neutra	
Polvos cerámicos		SG 107	SG 108	SG 107	SG 108
T precalentamiento [°C]		341	307	273,2	278
Presión de aire [Psi]		30	30	30	30
Distancia proyección [cm]		9,5	9,5	9,5	9,5
Flujo de gases [L/min]	O <sub>2</sub>	70	70	37	37
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	22	22	22	22

**Tabla 2.** Especificaciones de la codificación de las muestras comparadas con las condiciones del tipo de llama, y los polvos empleados para la aplicación en el sustrato.

Tipo de llama	Polvo empleado	Codificación de las muestras
Oxidante	SG 107	R7O
	SG 108	R8O
Neutra	SG 107	R7N
	SG 108	R8N

En la Fig. 3 se observa la aplicación de los recubrimientos en la cámara de proyección térmica Areste 1 sobre los sustratos metálicos de forma cilíndrica. En este proceso la energía cinética que se le imparte a las partículas gracias al flujo de los gases que genera la combustión (oxígeno y acetileno).

**Figura 3.** Cámara de proyección térmica Areste.



### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

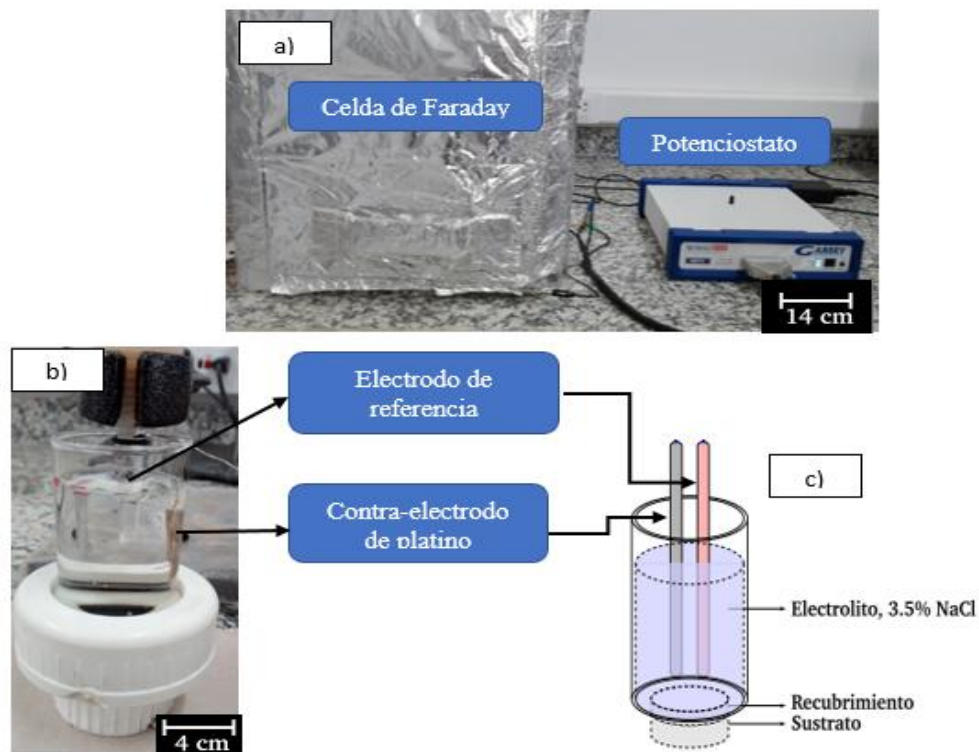
**3.4.1 Caracterización Físico-Química.** La rugosidad superficial de los recubrimientos fue medida con el rugosímetro Mitotoyo SJ-201 para determinar la topografía de la superficie antes y después de la aplicación de los recubrimientos que se muestran en la Tabla 3. Esta medida de rugosidad proporciona una idea del estado de fusión de las partículas que llegan al sustrato, es decir, a mayor rugosidad, menor grado de fusión de las últimas partículas que llegaron a la superficie del recubrimiento tal como se muestra en el recubrimiento R8N, el cual posee una rugosidad de 12,09  $\mu\text{m}$ . Posteriormente se realizó un montaje en resina y corte transversal a cada una de las probetas con una cortadora ISOMET 1000, seguidamente las probetas fueron llevadas a un proceso de desbaste realizado con papel abrasivo de SiC de grado 100, 220, 320, 400, 600, 1200 y el pulido en paño con pasta de diamante según la norma ASTM E1920 [16]. Con el fin de evaluar la morfología, espesor y porosidad de los recubrimientos obtenidos, se realizó el análisis microestructural de cada uno de ellos empleando la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectrometría de energía dispersiva (EDS). Para el análisis de la porosidad de los recubrimientos fueron tomadas de la sección transversal pulida de cada recubrimiento tres (3) imágenes de microscopía electrónica de barrido a 500X. El software Image J fue usado para transformar las imágenes de color en blancos y negros, para así realizar las mediciones de los espesores de los recubrimientos y posteriormente cuantificar su porosidad.

**Tabla 3.** Rugosidades del sustrato y recubrimientos.

	R7O [ $\mu\text{m}$ ]	R8O [ $\mu\text{m}$ ]	R7N [ $\mu\text{m}$ ]	R8N [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Sustrato</b>	6,65	6,61	6,53	6,57
<b>Recubrimiento</b>	5,81	9,69	10.10	12,09

**3.4.2 Caracterización electroquímica.** Para evaluar la resistencia a la corrosión en los recubrimientos cerámicos del sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica y el recubrimiento de cromo duro sobre el acero AISI/SAE 1020, se preparó una solución de 3,5% p/p de NaCl en un matraz aforado de un litro. El respectivo montaje electroquímico incluyó una celda de Faraday, tres electrodos, electrodo de trabajo (sustrato – recubrimiento de  $\frac{3}{4}$ ”), contraelectrodo (Pt) y electrodo de referencia (Calomel saturado ECS) inmersos en una solución de 3,5% p/p de NaCl aireada con área expuesta a la solución de  $1\text{cm}^2$ , como se muestra en la Fig. 4 formando de esta manera una celda convencional. Las medidas electroquímicas se realizaron para tiempos de exposición de 1 y 7 días empleando un potenciostato/galvanostato GAMRY Interface 1000.

**Figura 4.** Montaje experimental para el ensayo de corrosión compuesto de: a) Potenciostato y celda de Faraday, b) Celda electroquímica y c). Esquema del montaje.



Para la determinación de las velocidades de corrosión se emplearon las medidas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) realizadas bajo especificaciones de la norma G3-89 [17] y para el ajuste de los datos experimentales se usó el software EC-LAB. También se evaluaron los recubrimientos mediante las técnicas de extrapolación de Tafel y Polarización Lineal que se llevaron a cabo bajo las normas ASTM G3-14 [18] y ASTM G3-89, respectivamente [17].

Cada una de las pruebas electroquímicas se realizó por duplicado para tener reproducibilidad en los resultados y sus condiciones de trabajo se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de trabajo de las pruebas electroquímicas.

<b>Potencial a Circuito abierto</b>	Tiempo de barrido: 3600 s Estabilidad: 0 mV/s
<b>Espectroscopía de Impedancia Electroquímica</b>	Voltaje AC: 10 mV Frecuencia inicial:100000 Hz Frecuencia final:0,01 Hz Puntos por década: 10 Tiempo de estabilización: 3600 s
<b>Resistencia de la Polarización Lineal</b>	Potencial inicial: -0,02 V vs. $E_{corr}$ Potencial final: 0,02 V vs. $E_{corr}$ Velocidad de barrido: 0,167 mV/s Beta Anódica: 0,12 [V/Dec] Beta Catódica.: 0,12 [V/Dec] Tiempo de estabilización: 900 s
<b>Extrapolación de Tafel</b>	Potencial inicial: -0,3V vs. $E_{corr}$ Potencial final: 0,3 V vs. $E_{corr}$ Velocidad de barrido: 0,167 mV/s Tiempo de estabilización: 300 s
<b>Curva de Polarización Anódica</b>	Potencial inicial: 0.01V vs. $E_{corr}$ Potencial final: 1.5 V vs. $E_{corr}$ Velocidad de barrido: 0,167 mV/s Tiempo de estabilización: 300 s

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO Y LOS POLVOS

**4.1.1 Sustrato.** Según el resultado del análisis químico realizado mediante Espectroscopía de emisión óptica al sustrato se puede corroborar que este corresponde al acero AISI/SAE 1020 como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Composición química del acero AISI/SAE 1020 en estudio y comercial.

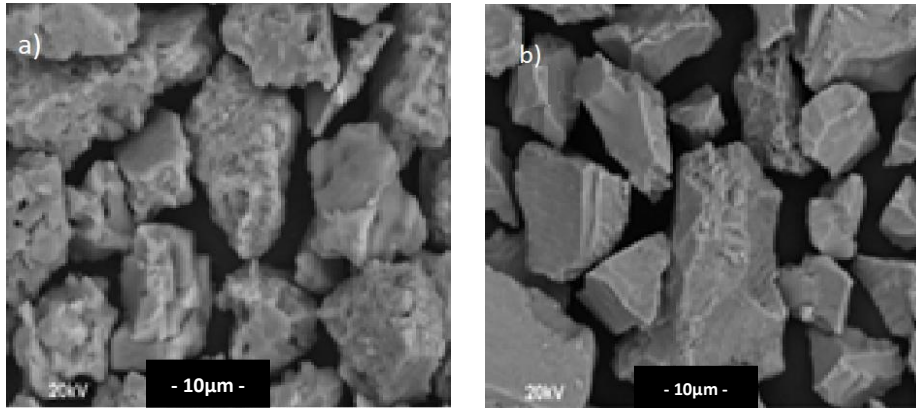
ACERO AISI/SAE 1020	Elemento (%p/p: Porcentaje en peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
En estudio	0,18	0,26	0,87	0,026	0,01	0,07	0,006	0,06	0,07
Comercial	0,18- 0,23	0,07- 0,6	0,3- 0,6	≤ 0,03	≤ 0,05	--	--	--	--

**4.1.2 Polvos.** En el presente trabajo se seleccionaron 2 tipos de polvos de referencia Saint Gobain 107 (SG 107) con una composición de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  y 108 (SG 108) con  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40% $\text{TiO}_2$  empleados para la obtención de los recubrimientos, cuyas composiciones químicas se muestran en la Tabla 6. En la imagen de la Fig. 5 se muestran los análisis morfológicos realizados a las muestras, estableciendo que las partículas de alúmina como los de óxido de titanio posee una geometría irregular con una distribución de tamaño que oscilan entre 5 y 30  $\mu\text{m}$  para el polvo SG107, mientras que para el polvo SG108 varía entre 10 y 60  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 6.** Composición química de los polvos analizada por FRX.

POLVO	Compuestos [%p/p: Porcentaje en peso]							
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO
SG 107	84,74	14,32	0,386	0,188	0,0987	0,100	0,0387	0,0639
SG 108	50,27	47,68	0,659	0,60	0,253	0,168	0,143	0,0611

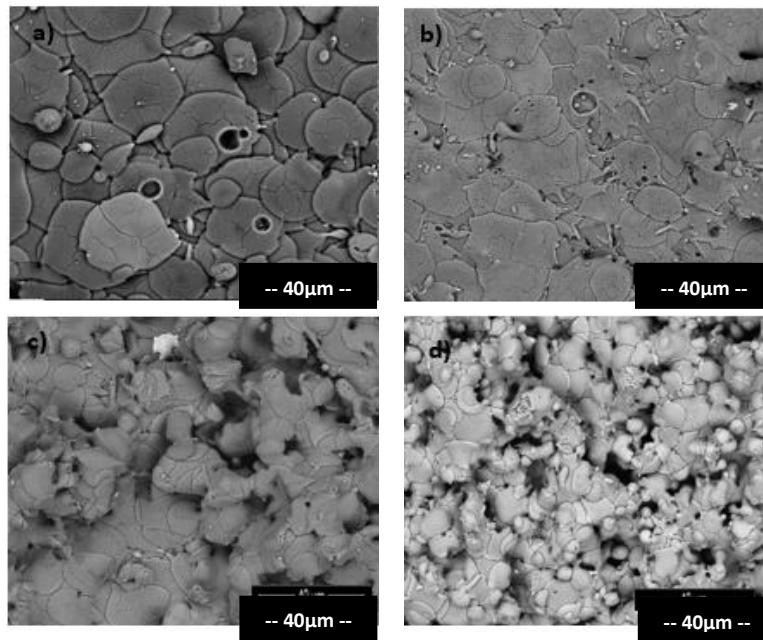
**Figura 5.** Micrográficas electrónicas de barrido de los polvos: a) polvos SG 107, b) polvos SG 108.



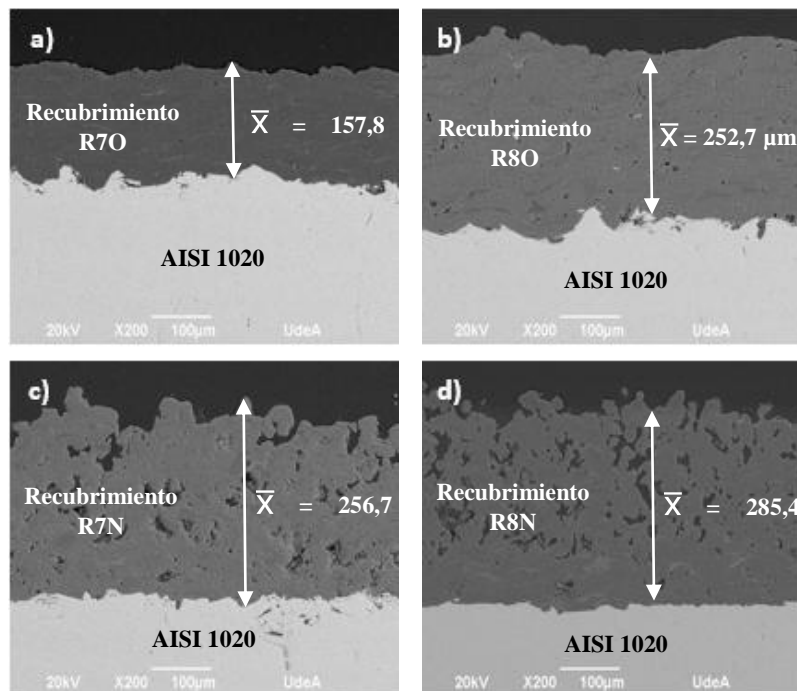
#### 4.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS

En las Fig. 6 y 7 se muestran la morfología superficial de los recubrimientos y la sección transversal respectivamente. De acuerdo a la Fig. 6, los recubrimientos en su superficie poseen una estructura laminar típica que se forma por el apilamiento de las partículas individuales en estado fundido o semifundido (splats), tal como A. Gonzalez [13, 14], lo reportó en sus investigaciones.

**Figura 6.** Micrográficas electrónicas de barrido de la superficie de los recubrimientos a) R7O, b) R8O, c) R7N y d) R8N.



**Figura 7.** Micrográficas electrónicas de barrido de la sección transversal de los recubrimientos a) R7O, b) R8O, c) R7N y d) R8N.



Durante la elaboración de los recubrimientos, la energía que se le imparte a las partículas se debe a la relación del flujo de gases ( $C_2H_2-O_2$ ) y a la presión de aire, en donde la condición oxidante presentó una mayor relación comparada con la condición neutra, lo cual generó una mayor temperatura de llama logrando así que las partículas se fundieran, alcanzando su estado plástico y un mejor aspecto de la superficie, tal como se muestra en la Fig. 6a y 6b. Teniendo en cuenta que los recubrimientos se hicieron bajo las mismas condiciones (exceptuando la composición de los polvos), el alto grado de fusión de las partículas y la alta homogeneidad del recubrimiento R7O (Fig. 6a y 7a) se ve reflejado en el bajo espesor de la muestra (157,8  $\mu m$ ) y baja porosidad (0,53%) cuyos valores son menores a los de los demás recubrimientos, tal como se puede comparar en las Tabla 7 y 8.

En el caso contrario, las muestras R7N y R8N (Fig. 6c y 6d) presentaron una superficie no homogénea debido a la baja temperatura de la llama que a su vez generó una baja fusión de las partículas y espacios entre ellas, ocasionado por el bajo grado de apilamiento. La estructura de la sección transversal de los recubrimientos R7N y R8N (Fig. 7c y 7d) también evidencian el bajo apilamiento de las partículas, lo que se ve reflejado en su alta porosidad (10,19% y 12,17% respectivamente, Tabla 8) y su alto espesor (256,7  $\mu m$  y 285,4  $\mu m$ , Tabla 7) respecto a las muestras elaboradas con llama oxidante, lo cual se presume fue generado por la temperatura de llama, al igual que la baja velocidad de enfriamiento del material fundido durante la formación del recubrimiento y el mayor tamaño de partícula.

**Tabla 7.** Espesor de la capa del recubrimiento del sistema de  $Al_2O_3-TiO_2$ .

Recubrimiento	R7O	R8O	R7N	R8N
<b>Espesor [<math>\mu m</math>]</b>	157,8	252,7	256,7	285,4

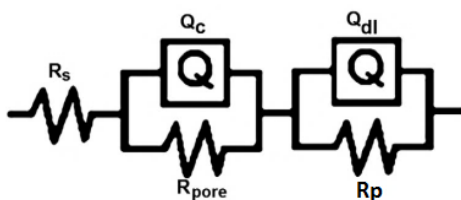
**Tabla 8.** Porosidad de la capa del recubrimiento del sistema de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .

Recubrimiento	R7O	R8O	R7N	R8N
Porosidad [%]	0,53	1,59	10,19	12,17

### 4.3 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

Los resultados experimentales obtenidos en el estudio de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica se ajustaron correctamente al circuito equivalente que se muestra en la Fig. 8. Este circuito contiene elementos de fase constante referentes al sustrato y al recubrimiento ( $Q_{dl}$  y  $Q_c$ ) en lugar de capacitores ideales, con el fin de mejorar el ajuste en la respuesta de la simulación realizada, debido a las heterogeneidades en la microestructura presentes en este tipo de recubrimientos, de igual manera se emplearon resistencias que corresponden a la resistencia de la solución ( $R_s$ ), resistencia al flujo de corriente a través del poro ( $R_{pore}$ ) y la resistencia a la transferencia de carga ( $R_p$ ).

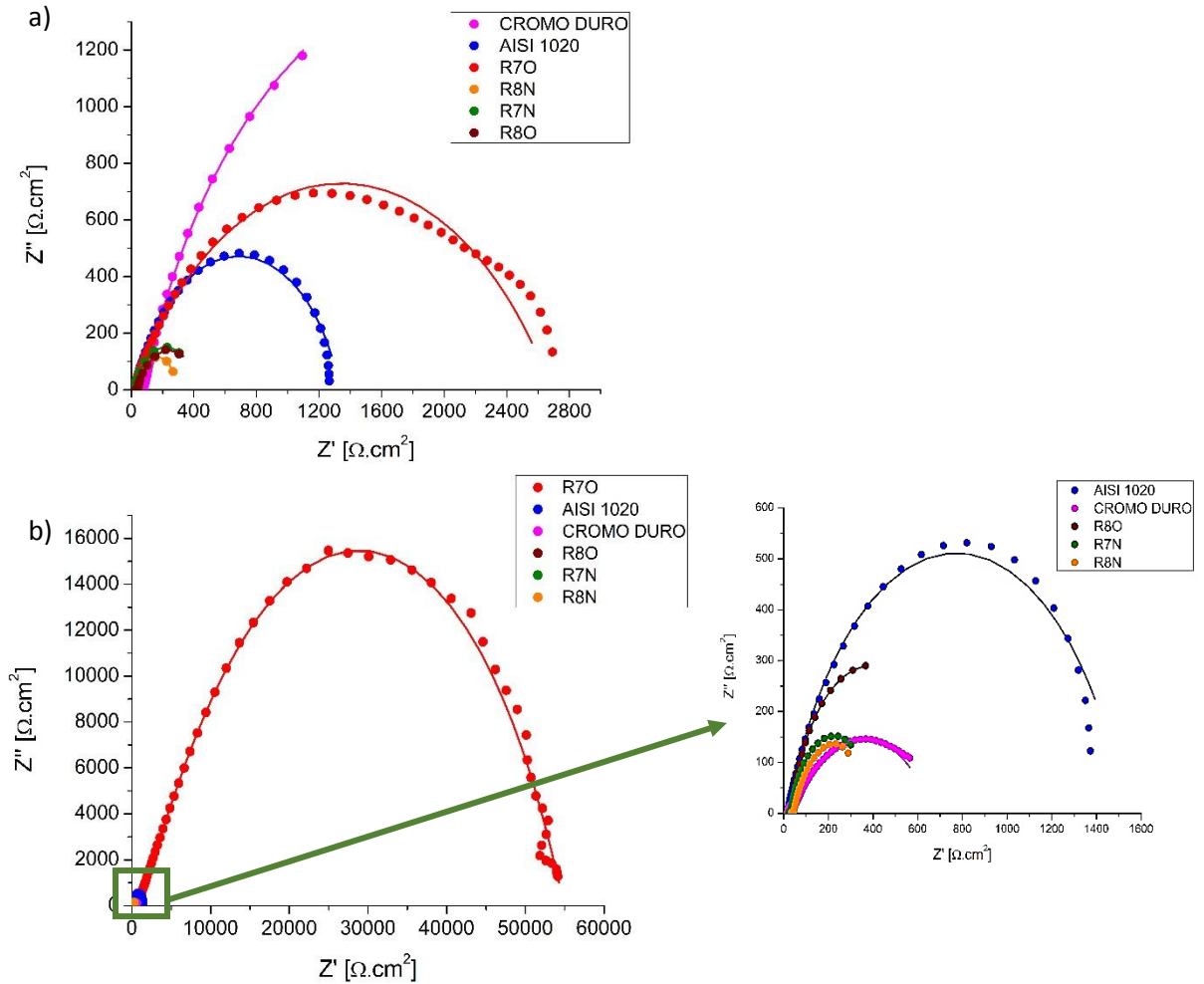
**Figura 8.** Circuito equivalente.



Los diagramas de Nyquist permiten determinar algunos fenómenos corrosivos a partir de diversos parámetros como la resistencia a la polarización ( $R_p$ ), la cual es proporcional a la resistencia a la corrosión y está representada por una tendencia semicircular en el tramo de impedancia de bajas frecuencias como se observa en la Fig 9. Estos diagramas se obtuvieron del ensayo de impedancia electroquímica realizados a 1 y 7 días de exposición de cada uno de los recubrimientos en solución salina de 3,5% p/p de NaCl, en donde los símbolos corresponden a los datos experimentales y las líneas a los ajustes realizados, los cuales están

graficados con la misma escala para poder comparar el comportamiento de los recubrimientos.

**Figura 9.** Diagrama de Nyquist: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.



Los valores de  $R_p$  que se muestran en la Tabla 9 obtenidos de la simulación de impedancia electroquímica en los diagramas de Nyquist observados en las Fig. 9a y 9b, se evidencia que los recubrimientos elaborados por proyección térmica con

llama oxidante y polvos SG 107 (R7O) poseen un valor  $R_p$  mayor que los demás recubrimientos. Estos resultados confirman que los recubrimientos elaborados con el polvo SG 107 y una mayor relación de gases ( $O_2/C_2H_2$ ), poseen una estructura más compacta comparada con los demás recubrimientos incluyendo el de cromo duro. Lo anterior, confirma que con el paso del tiempo el recubrimiento R7O poseen una mayor protección contra los efectos corrosivos de la solución salina sobre el sustrato de acero AISI/SAE 1020 con un valor de  $45719 \Omega/cm^2$  medido a los 7 días de exposición.

Por el contrario, el recubrimiento de cromo duro posee una mayor resistencia a la corrosión a un tiempo de exposición de 1 día, como se muestra en la Fig. 9a, sin embargo, ésta decrece notablemente con el paso del tiempo al estar en contacto con la solución salina.

Adicionalmente, se encontró que los recubrimientos R8O, R7N y R8N elaborados por proyección térmica poseen un menor  $R_p$  comparados con el sustrato (acero AISI/SAE 1020), lo cual se presume que se debe a que las condiciones y el tipo de partículas no permitieron que las partículas individuales llegaran a su estado fundido o semifundido, ocasionando que el apilamiento de ellas en el recubrimiento no fuera homogéneo y se generaran una gran cantidad de poros, por tanto, la estructura de las partículas permitió una mayor difusión de la solución a través del sustrato y de esta manera se disminuyó  $R_p$ , es decir, la velocidad de corrosión aumento de manera drástica. Por otra parte, a pesar de que el sustrato no poseía un recubrimiento, al estar en contacto con la solución salina es posible que se haya generado una capa homogénea de óxido la cual inhibió el proceso corrosivo en el metal.

Como se observa en la Tabla 9, el valor de resistencia a la polarización del recubrimiento R7O aumenta después de 7 días de exposición en solución de 3,5% p/p de NaCl, indicando que se ha generado un fenómeno de protección sobre el sustrato de acero AISI/SAE 1020, es decir posee una mejor resistencia a la corrosión debido a su estructura más compacta posiblemente proporcionado por el menor tamaño de partícula de este tipo de polvo y el agotamiento de los iones cloruro que reaccionaban electroquímicamente con el sustrato anteriormente difundidos en los pocos defectos que este recubrimiento poseía, dicha interacción de los iones  $\text{Cl}^-$  con el sustrato genero probablemente algunos compuestos que impedían la interacción de una mayor cantidad de iones con este, como lo reporta F. Vargas et al [12].

**Tabla 9.** Valores de  $R_p$  obtenidos según el circuito equivalente de los resultados de impedancia de los recubrimientos a diferentes tiempos de exposición en solución.

Recubrimiento	1 día	7 días
	$R_p$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	$R_p$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]
<b>R7O</b>	2592	45716
<b>Acero AISI 1020</b>	1262	1513
<b>Cromo Duro</b>	2687	628
<b>R8O</b>	408,2	697
<b>R7N</b>	395,8	378
<b>R8N</b>	200,1	344

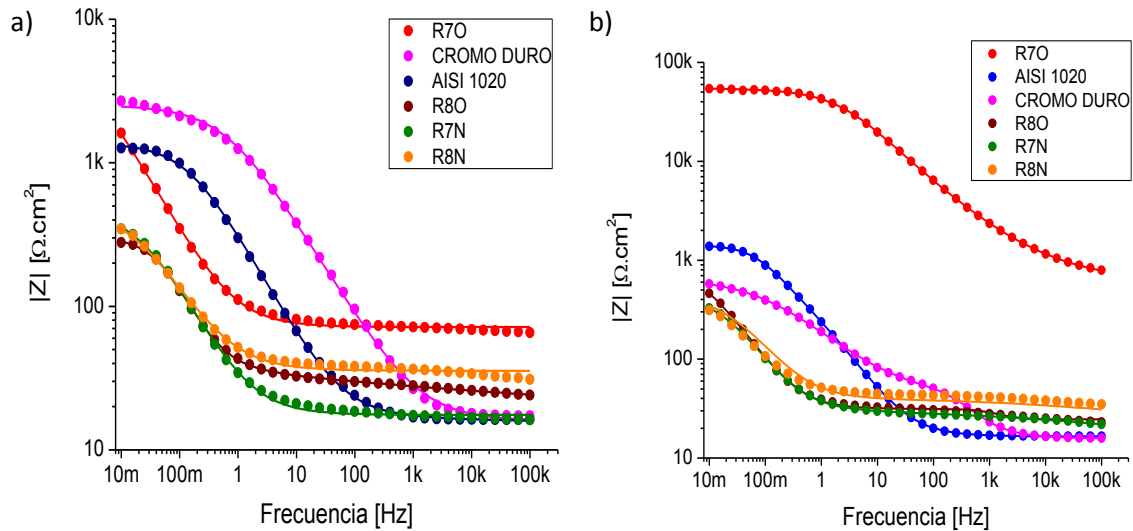
En la Fig. 10a se muestran los espectros de los diagramas log Módulo vs log Frecuencia ( $\log |Z|$  vs  $\log$  Frecuencia) a 1 día de exposición en donde se observa que el recubrimiento R7O muestra el mayor módulo de impedancia del sistema de recubrimientos  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , evidenciando que existe una capa no conductora

uniforme que genera una mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, a altas frecuencias posee un comportamiento resistivo que es corroborado con su pendiente cero mostrando una oposición de los agentes corrosivos a través de la película protectora, este comportamiento cambia a bajas frecuencias de 1 Hz hasta 1mHz, el cual se ve reflejado en la pendiente tangente a la curva de aproximadamente -1 provocando un cambio a un comportamiento capacitivo. Por el contrario, el recubrimiento de cromo duro presenta la mayor impedancia total del sistema con un comportamiento similar al R7O, a diferencia de su comportamiento capacitivo que se muestra desde un rango de frecuencias de 1KHz hasta 1Hz, para posteriormente presentar un comportamiento resistivo [15]. Así mismo, al comparar el sustrato (Acero AISI/SAE 1020) con el recubrimiento R7O y el cromo duro, este presenta un menor módulo de impedancia, con un comportamiento similar al del cromo duro, corroborando que una posible alternativa para el reemplazo de los recubrimientos de cromo duro sería el recubrimiento R7O.

El gráfico de log Módulo vs log Frecuencia ( $\log |Z|$  vs log Frecuencia) para 7 días de exposición mostrado en la Fig. 10b, muestra que el recubrimiento R7O presenta el mayor módulo de impedancia total del sistema incluyendo el cromo duro, presentando a altas frecuencias un comportamiento capacitivo que luego varía a un comportamiento resistivo a bajas frecuencias. A este tiempo de exposición la solución salina afecta notablemente al recubrimiento de cromo duro debido a que su impedancia total disminuye respecto al mismo a 1 día, mostrándose ahora con valores más bajos comparados con el del sustrato, lo que se presume es debido a la corrosión por picado generada por los iones de  $\text{Cl}^-$ . No obstante, el recubrimiento de cromo duro no posee el mismo comportamiento que el recubrimiento R7O, puesto que a altas frecuencias posee un comportamiento resistivo y posteriormente a frecuencias que van desde 1KHz a 1Hz se observa un comportamiento capacitivo, finalizando a bajas frecuencias con un comportamiento resistivo, siendo este similar al que muestra el sustrato sin

recubrir. Los demás recubrimientos presentan un comportamiento resistivo a altas frecuencias y un capacitivo a bajas frecuencias [15].

**Figura 10.** Diagrama Log Módulo vs Log Frecuencia: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.



#### 4.4 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL, RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN Y ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Según la norma ASTM G59-97 [19] se determinó la velocidad de corrosión para las técnicas de extrapolación de Tafel, Polarización Lineal y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en mm/año (milímetros por año), a 7 días de exposición a la solución, mediante la ecuación (1), siendo  $K_1: 3,27 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{mm} \cdot \text{g} / \mu\text{A} \cdot \text{cm} \cdot \text{año}$ ),  $i_{corr}$ : densidad de corriente ( $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ ), EW: peso equivalente  $\text{g} / \text{eq} = 27,94$  y  $\rho$ : densidad del material ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ) = 7,87. De igual manera, conforme con la

norma ASTM G3-89[17] se encontró los valores de  $i_{corr}$  a partir de las curvas obtenidas por cada técnica a diferentes tiempos de exposición mediante la ecuación (2), donde,  $i_{corr}$ : corriente de corrosión ( $\mu A$ ),  $R_p = \Delta E/\Delta i$  pendiente de la región lineal,  $\beta_a$  = pendiente de Tafel anódica y  $\beta_c$ = pendiente de Tafel catódica. Estos datos fueron calculados con la ayuda del software EC-Lab y se presentan en las Tablas 10,11 y 12.

$$V_{corr} = K_1 * \frac{i_{corr}EW}{\rho} \quad (1)$$

$$i_{corr} = \frac{b_a * b_c}{2,303R_p(b_a + b_c)} \quad (2)$$

Los valores de la velocidad de corrosión mostradas en las Tablas 10, 11 y 12 fueron calculados a partir de las técnicas electroquímicas, presumiendo que la técnica de Espectroscopía de Impedancia electroquímica posee la mejor representación del fenómeno de corrosión, además de una mayor reproducibilidad. En dichas tablas se evidencia la influencia de las condiciones de proyección térmica junto con los tipos de polvos depositados al sustrato, en donde se aprecia que la menor velocidad de corrosión fue obtenida en el recubrimiento R70 a 7 días de exposición, comparada con los demás recubrimientos evaluados, ya que su condición generó que la temperatura de llama fuera mayor, lo cual facilitó su fusión y por consiguiente los recubrimientos obtenidos tuvieron menor contenido de porosidad, tal como F. Vargas et al. [12] reportó en su investigación; a su vez se puede observar que los demás recubrimientos obtuvieron potenciales de corrosión más negativos comparados con el R70, fenómeno que puede ser atribuido al apilamiento no homogéneo de las partículas semifundidas y el contenido de porosidades durante la elaboración de los recubrimientos.

**Tabla 10.** Datos obtenidos de la técnica de extrapolación de Tafel a 7 días de exposición.

Prueba	$E_{corr}$ [mV]	$i_{corr}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$\beta_a$ [mV]	$\beta_c$ [mV]	$V_{corr}$ [mm/año]
R7O	-576,066	0,02	181,1	296,1	0.0003
<b>Acero AISI/SAE 1020</b>	-782,630	10,008	124,7	224,6	0,1163
<b>Cromo duro</b>	-663,079	10,185	60,7	284,3	0,1183
R8O	-828,971	16,999	183,6	134,7	0,1975
R7N	-702,409	20,424	69,4	292,5	0,2371
R8N	-679,079	23,743	88,9	288,7	0,2756

**Tabla 11.** Datos de la técnica de Polarización Lineal a 7 días de exposición.

Prueba	$R_p$ [Ohm]	$E_{corr}$ [mV]	$i_{corr}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$\beta_a^*$ [mV]	$\beta_c^*$ [mV]	$V_{corr}$ [mm/año]
R7O	55106	-645,562	0,887	181,1	296,1	0,0103
<b>Acero AISI/SAE 1020</b>	1295	-721,961	26,929	124,7	224,6	0,3126
<b>Cromo duro</b>	669	-662,349	34,019	60,7	284,3	0,3949
R8O	639	-716,044	50,526	183,6	134,7	0,5866
R7N	396	-671,225	72,294	69,4	292,5	0,8393
R8N	337	-673,066	82,717	88,9	288,7	0,9603

**Tabla 12.** Datos de la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 7 días de exposición.

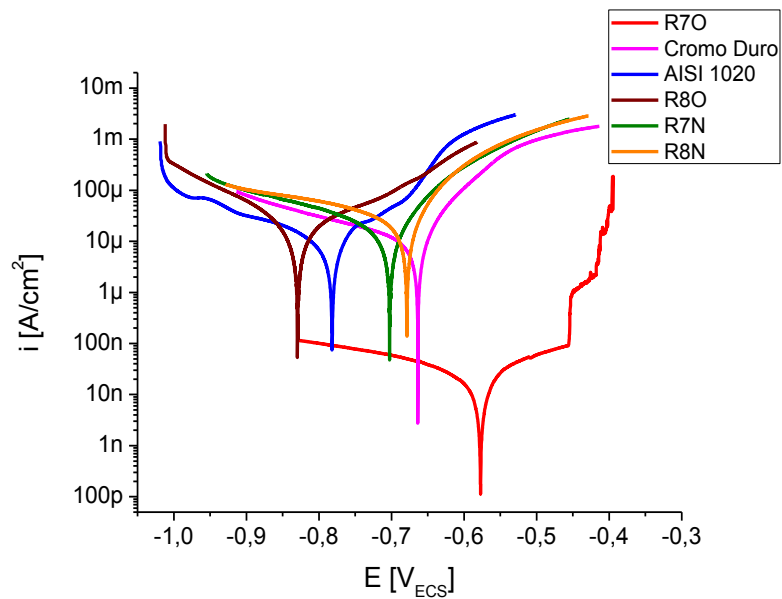
Prueba	$R_p$ [Ohm]	$E_{corr}$ [mV]	$i_{corr}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$\beta_a^*$ [mV]	$\beta_c^*$ [mV]	$V_{corr}$ [mm/año]
R7O	45716	-645,562	1,0673	181,1	296,1	0,0124
<b>Acero AISI/SAE 1020</b>	1513	-721,961	23,011	124,7	224,6	0,2671
<b>Cromo duro</b>	628	-662,349	34,585	60,7	284,3	0,4015
R8O	697	-716,044	48,404	183,6	134,7	0,5619
R7N	378	-671,225	64,433	69,4	292,5	0,7480
R8N	344	-673,066	85,795	88,9	288,7	0,9960

\*Los valores de las pendientes anódica y catódica se obtuvieron de la técnica de Extrapolación de Tafel.

Las velocidades de corrosión para el tiempo de exposición de 1 día se determinaron con valores de pendientes catódicas y anódicas de 120 mV, en vista de que no fue posible la realización de las pruebas de extrapolación de Tafel, pues no se contaba con el número de probetas suficientes, (ANEXO A, Tablas 13 y 14).

Las curvas obtenidas por la técnica de extrapolación de Tafel en la Fig. 11 se caracterizan por mostrar un comportamiento activo, sin que se evidencie ninguna pasividad en los recubrimientos y el acero. Adicionalmente el recubrimiento R7O presenta la menor densidad de corriente y por ende la menor velocidad de corrosión a un tiempo de exposición de 7 días en solución de 3,5% p/p de NaCl, corroborando lo encontrado en los cálculos de la velocidad de corrosión con esta técnica.

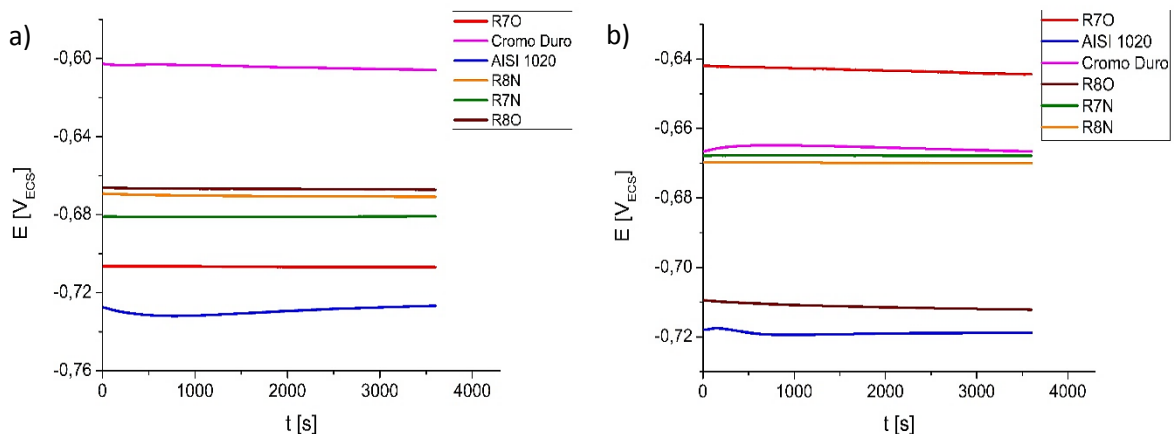
**Figura 11.** Curvas de Extrapolación de Tafel del sistema de recubrimiento  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , acero AISI 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl a 7 días de exposición.



#### 4.5 DETERMINACIÓN LOS POTENCIALES CRÍTICOS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTOS $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ UTILIZANDO MEDICIONES DE POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO Y CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICAS

En la Fig. 12 se observan los potenciales a circuito abierto a 1 y 7 días de exposición respectivamente medidos en un periodo de tiempo de una hora, para garantizar que cada uno de los potenciales de corrosión estuvieran estables, mostrándose como líneas rectas en las gráficas respectivas. Donde se evidencia que a un día de exposición el recubrimiento de cromo presenta el mayor potencial a circuito abierto de -600 mV aproximadamente, puesto que los demás recubrimientos obtuvieron potenciales más negativos como se muestra en la Fig. 11a, se presume que este recubrimiento proveerá una mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, transcurridos 7 días, se observa en la gráfica 11b, que el recubrimiento R7O es ahora el que presenta el mayor potencial de corrosión -640 mV aproximadamente comparadas con el cromo duro, acero AISI/SAE 1020 y el sistema de recubrimientos.

**Figura 12.** Potenciales de corrosión medidos en un periodo de tiempo de una hora: a) 1 día de exposición y b) 7 días de exposición.



De igual manera para la determinación de los potenciales críticos se emplearon las curvas de polarización (ANEXO C, Fig. 13), en las cuales se evidencia que el recubrimiento R70 presenta la menor densidad de corriente de corrosión y por ende la menor tasa de deterioro. Por otra parte, aunque algunos recubrimientos presentan los potenciales de corrosión más negativos, esto no garantiza que posean una mayor velocidad de corrosión, dado que sus densidades de corriente pueden ser menores en comparación con aquellos que tengan un mayor potencial de corrosión.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se elaboraron recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  mediante proyección térmica oxiacetilénica y se evaluó su microestructura y resistencia a la corrosión empleando técnicas electroquímicas, obteniendo las siguientes conclusiones:

- A partir de las diferentes técnicas electroquímicas empleadas para la determinación de la velocidad de corrosión a 7 días de exposición, se estableció que el mayor valor de  $E_{\text{corr}}$  y el menor valor de  $I_{\text{corr}}$  regidos por la termodinámica y la cinética del proceso, respectivamente, indicaron que el recubrimiento elaborado con los polvos SG 107 y con una condición oxidante, presenta la menor velocidad de corrosión, con un valor promedio de 0,007 mm/año, corroborando su mejor resistencia a la corrosión. No obstante, no en todos los recubrimientos la termodinámica del proceso posee una relación con la velocidad de corrosión, debido a que con valores de  $E_{\text{corr}}$  más positivos, se obtuvieron velocidades de corrosión mayores, hecho que es atribuido al mayor valor de  $I_{\text{corr}}$ . Por lo tanto, se estableció que la cinética es el factor más representativo en la determinación de la velocidad de corrosión.
- Se determinaron las velocidades de corrosión mediante las diferentes técnicas electroquímicas tanto para el sistema de recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , como para el cromo duro y el acero AISI/SAE 1020, obteniéndose valores de velocidades de corrosión generalizada menores a 0,744 mm/año.
- La caracterización mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido, confirmó que el recubrimiento R70 muestra las mejores características morfológicas en términos de su baja porosidad (0,53%) y defectos, gracias a que la materia prima empleada en este, posee una distribución de tamaño de

partícula menor que los polvos SG 108, lo cual facilita su apilamiento durante la deposición del recubrimiento, además de que la condición oxidante generó una mayor temperatura de llama facilitando la fusión de los mismos. Corroborando de esta manera que este recubrimiento es posiblemente una alternativa viable para el remplazo de los recubrimientos de Cromo duro.

## 6 RECOMENDACIONES

Para los futuros proyectos relacionados a este tipo de investigaciones se recomienda:

- Evaluar el comportamiento del sistema de recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{TiO}_2$  y Cromo duro a mayores tiempos de exposición en solución de NaCl, y a su vez analizar el efecto del aumento del contenido del ion cloro en la solución.
- Realizar un estudio donde se aumente el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en los polvos usados como materia prima en la proyección térmica, para determinar su comportamiento frente a la corrosión en solución de NaCl.
- Realizar las pruebas electroquímicas en una autoclave, de modo que se permita aumentar la temperatura a la solución de NaCl en estudio, y se pueda analizar su efecto en el sistema de recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{TiO}_2$ .
- Establecer el comportamiento del ion cloro en el sistema de recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{TiO}_2$  y cromo duro, de manera que se pueda comprender y establecer el mecanismo de corrosión presentado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROJAS CRUZ, María Cristina. El cromado un proceso de dos caras. En: *Revista Metal Actual*, 2008. Vol 7, p. 52-57.
- [2] MOORE, Scott. Hard- Chrome Plating... Its Past, Present and future. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.pfonline.com/articles/hard-chrome-plating-its-past-present-and-future>
- [3] POH KOON, Aw, *et al.* Hard Chrome Replacement by HVOF Sprayed Coatings, SIMTech Technical Report (PT/99/002/ST). Surface Technology Group, Process Technology Division, 1999. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.simtech.a-star.edu.sg/Research/TechnicalReports/TR0300.pdf>.
- [4] WANG, Dongsheng, *et al.* Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt.% TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying. En: *Applied Surface Science*, 2009. Vol 255, N° 8, p. 4606-4610.
- [5] YANG, Yan, *et al.* Influence of composite powders microstructure on the microstructure and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying. En: *Journal of Materials & Design*, 2015. Vol 65, p. 814-822.
- [6] ABDI, Saafi; LEBAILI, S. Alternative to chromium, a hard alloy powder NiCrBCSi (Fe) coatings thermally sprayed on 60CrMn4 steel. En: *Phase and comportements, Physics Procedia*, 2009.Vol 2, N° 3, p. 1005–1014.
- [7] SAHRAOUI, Tahar, *et al.* Alternative to chromium: characteristics and wear

- behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty). En: *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. Vol 152, N° 1, p. 43–55.
- [8] OTERO HUERTA, Enrique. Corrosión y degradación de los materiales. Proceso de corrosión. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2022.pdf>
- [9] POH KOON, Aw, *et al.* Hard Chrome Replacement by HVOF Sprayed Coatings, SIMTech Technical Report (PT/99/002/ST). Surface Technology Group, Process Technology Division, 1999. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.simtech.a-star.edu.sg/Research/TechnicalReports/TR0300.pdf>.
- [10] ESPALLARGAS, Nuria, *et al.* Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>– NiCr and WC–Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion– corrosion resistance. En: *Surface and Coatings Technology*, 2008. Vol 202, N° 8, p. 1405–1417.
- [11] VARGAS GALVIS, Fabio, *et al.* Mechanical and tribological performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– TiO<sub>2</sub> coating elaborated by flame and plasma spraying. En: *Surface and Coatings Technology*, 2010. Vol 205, p. 1132–1136.
- [12] VARGAS GALVIS, Fabio, *et al.* Permeation of saline solution in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–13 wt.% TiO<sub>2</sub> coatings elaborated by atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2013. Vol 220, p. 85–89.
- [13] GONZÁLEZ HERNANDEZ, Andrés Giovanni. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Tesis de maestría en ingeniería. Universidad de Antioquia, 2008. p. 3-7.

- [14] GONZÁLEZ HERNANDEZ, Andrés Giovanni. Estudio del comportamiento a alta temperatura de recubrimientos nanoestructurados elaborados por proyección térmica por combustión y plasma a partir de polvos y suspensiones. Tesis de doctorado. Universidad de Antioquia y de Limoges, 2014. p. 19-34.
- [15] VESGA LOPEZ, Luis Ferney. Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Tesis de magister en física. Universidad Industrial de Santander, 2004. p. 36-45.
- [16] ASTM E1920-03. Estándar guide for metallgraphic preparation of thermal sprayed coating. ASTM international 2014. p. 1-5
- [17] ASTM G3-89. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM International. 1999. p. 1-10.
- [18] ASTM G3-14. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM International. 2014. p. 1-18.
- [19] ASTM G59-97. Standard test method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM International. 2014. p. 1-4.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDI, Saafi; LEBAILL, S. Alternative to chromium, a hard alloy powder NiCrBCSi (Fe) coatings thermally sprayed on 60CrMn4 steel. En: *Phase and comportements, Physics Procedia*, 2009.Vol 2, N° 3, p. 1005–1014.

ASTM E1920-03. Estándar guide for metallgraphic preparation of thermar sprayed coating. ASTM international 2014. p. 1-5

ASTM G3-14. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM International. 2014. p. 1-18.

ASTM G3-89. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM International. 1999. p. 1-10.

ASTM G59-97. Standard test method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM International. 2014. p. 1-4.

CORTÉS, María teresa; ORTIZ, Pablo. Corrosión. Hipótesis aportes uniandinos # 4. Diciembre 2004. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <<http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/corrosion>>

DENNY A, Jones. Principles and Prevention of corrosion, Departamento de ingeniería Química y metalúrgica de la Universidad de Nevada. Prentice hall, Upper saddle river, segunda edición. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <<http://es.slideshare.net/firox2005/denny-a-jones-principles-and-prevention-of-corrosion>>

ESPALLARGAS, Nuria, *et al.* Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>– NiCr and WC–Ni thermal spray coatings as

alternatives to hard chromium for erosion– corrosion resistance. En: *Surface and Coatings Technology*, 2008.Vol 202, N° 8, p. 1405–1417.

GONZÁLEZ HERNANDEZ, Andrés Giovanni. Estudio del comportamiento a alta temperatura de recubrimientos nanoestructurados elaborados por proyección térmica por combustión y plasma a partir de polvos y suspensiones. Tesis de doctorado. Universidad de Antioquia y de Limoges, 2014. p. 19-34.

GONZÁLEZ HERNANDEZ, Andrés Giovanni. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Tesis de maestría en ingeniería. Universidad de Antioquia, 2008. p. 3-7.

MOORE, Scott. Hard- Chrome Plating... Its Past, Present and future. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.pfonline.com/articles/hard-chrome-plating-its-past-present-and-future>

OTERO HUERTA, Enrique. Corrosión y degradación de los materiales. Proceso de corrosión. [En línea]. (Recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2022.pdf>

POH KOON, Aw, *et al.* Hard Chrome Replacement by HVOF Sprayed Coatings, SIMTech Technical Report (PT/99/002/ST). Surface Technology Group, Process Technology Division, 1999. [En línea]. (recuperado el 20 de junio del 2016). Disponible en: <http://www.simtech.a-star.edu.sg/Research/TechnicalReports/TR0300.pdf>.

ROJAS CRUZ, María Cristina. El cromado un proceso de dos caras. En: *Revista Metal Actual*, 2008. Vol. 7, p. 52-57.

SAHRAOUI, Tahar, *et al.* Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty). En: *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. Vol 152, N° 1, p. 43–55.

TAHAR, Sahraoui, *et al.* Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty), En: *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol152, N° 1, p. 43–55.

VARGAS GALVIS, Fabio, *et al.* Mechanical and tribological performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– TiO<sub>2</sub> coating elaborated by flame and plasma spraying. En: *Surface and Coatings Technology*, 2010. Vol 205, p. 1132–1136.

VARGAS GALVIS, Fabio, *et al.* Permeation of saline solution in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–13 wt.% TiO<sub>2</sub> coatings elaborated by atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2013. Vol. 220, p. 85–89.

VESGA LOPEZ, Luis Ferney. Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Tesis de magister en física. Universidad Industrial de Santander, 2004. p. 36-45.

WANG, Dongsheng, *et al.* Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt.% TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying. En: *Applied Surface Science*, 2009. Vol 255, N° 8, p. 4606-4610.

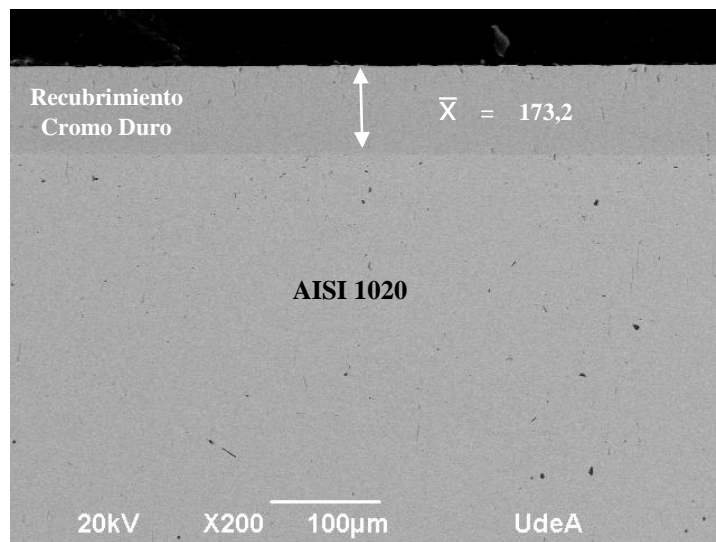
YANG, YAN. Influence of composite powders microstructure on the microstructure and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying. En: *Journal of Materials & Design*, 2015. Vol 65, p. 814-822.

## ANEXOS

### ANEXO A. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL CROMO DURO

A continuación, se presentan la morfología de la sección transversal del recubrimiento de cromo duro y sus valores de espesor y porosidad obtenidos con la implementación del software Image J, siendo estos de 173,2  $\mu\text{m}$  y 1,42 % respectivamente.

**Figura 13.** Morfología de la sección transversal del recubrimiento de cromo duro.



## ANEXO B. VELOCIDADES DE CORROSIÓN DEL SISTEMA $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , ACERO AISI/SAE 1020 Y CROMO DURO

A continuación, se presentan las Tablas de valores de velocidades de corrosión a 1 día de exposición del sistema de recubrimiento  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl, mediante la aplicación de las técnicas de Polarización Lineal y de la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, donde se determinaron con valores de pendientes catódicas y anódicas de 120 mV/ década.

**Tabla 13.** Datos de la técnica de Polarización Lineal a 1 día de exposición.

Prueba	R <sub>p</sub> [Ohm]	E <sub>corr</sub> [mV]	i <sub>corr</sub> [μA]	β <sub>a</sub> [mV]	β <sub>c</sub> [mV]	V <sub>corr</sub> [mm/año]
R7O	2498	-608,153	10,442	120	120	0,1212
Acero AISI/SAE 1020	1092	-727,680	23,880	120	120	0,2772
Cromo Duro	2990	-711,267	8,762	120	120	0,1017
R8O	412	-684,091	63,293	120	120	0,7348
R7N	381	-670,984	68,419	120	120	0,7943
R8N	288	-673,414	90,666	120	120	1,0526

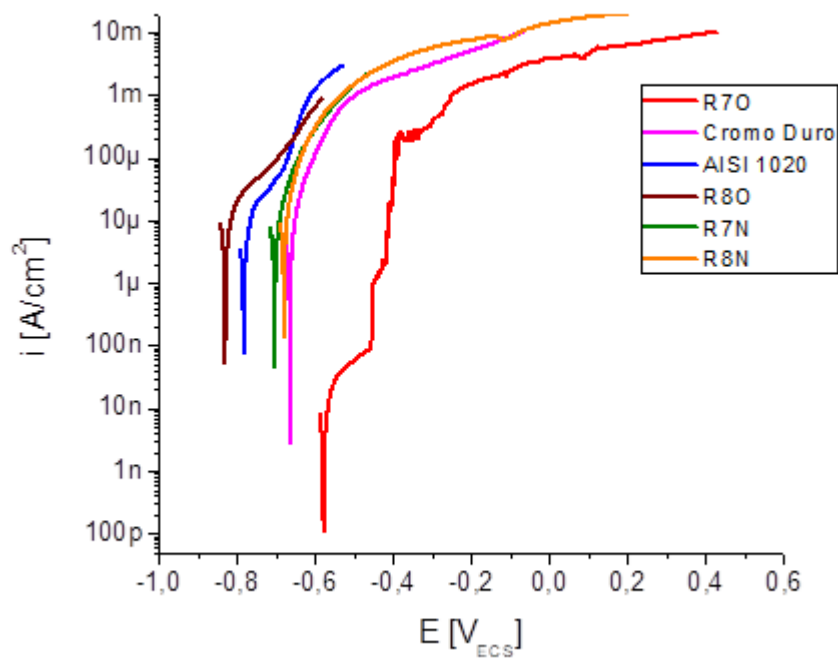
**Tabla 14.** Datos de la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica a 1 día de exposición.

Prueba	R <sub>p</sub> [Ohm]	E <sub>corr</sub> [mV]	i <sub>corr</sub> [μA]	β <sub>a</sub> [mV]	β <sub>c</sub> [mV]	V <sub>corr</sub> [mm/año]
R7O	4092	-608,153	6,367	120	120	0,0739
Acero AISI/SAE 1020	2687	-711,267	9,695	120	120	0,1125
Cromo Duro	1262	-727,680	20,643	120	120	0,2396
R8O	408,2	-673,414	63,854	120	120	0,7413
R7N	395,8	-684,091	65,823	120	120	0,7641
R8N	200,5	-670,984	129,940	120	120	1,5082

## ANEXO C. CURVAS DE LA TÉCNICA DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL A PARTIR DE 10 mV DE LA REGIÓN CATÓDICA (POLARIZACIÓN)

A continuación, se presentan las curvas obtenidas por la técnica de Extrapolación de Tafel a un tiempo de exposición de 7 días a partir de 10 mV de la región catódica.

**Figura 14.** Curvas de Extrapolación de Tafel a partir de 10 mV de la región catódica del sistema de recubrimiento, acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl a 7 días de exposición.



## ANEXO D. CURVAS DE LA TECNICA DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

A continuación, se presentan las curvas obtenidas por la técnica de resistencia a la polarización a diferentes tiempos de exposición 1 y 7 días.

**Figura 15.** Curvas de resistencia a la polarización del sistema de recubrimiento, acero AISI/SAE 1020 y del Cromo duro en solución 3,5% p/p de NaCl: a). 1 día de exposición y b). 7 días de exposición.

