

**EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr Y  
Ni-Cr-WC APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA SOBRE UN ACERO  
SAE-AISI 1015**

**JOULYN MILENA PÁEZ DALLOS  
OSCAR MAURICIO RUEDA RODRÍGUEZ**

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

**2012**

**EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr Y  
Ni-Cr-WC APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA SOBRE UN ACERO  
SAE-AISI 1015**

**JOULYN MILENA PÁEZ DALLOS  
OSCAR MAURICIO RUEDA RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito de grado para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR  
Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS**

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

**2012**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por acompañarme y permitirme realizar este logro, dándome salud y fortaleza cada día.*

*A mi padre por su apoyo cada día que aunque estuviésemos a distancia todos los días me llamabas a darme fortaleza y brindarme tu cariño.*

*A mi madre por sus consejos para ser una persona de bien, por su motivación, amor y cariño*

*A mi hermanita por ser mi confidente, mi amiga y mi consejera, por darme motivación en cada tropiezo y a mi hermanito por su ternura y amor*

*A Duvan por darme ese ejemplo de responsabilidad, lucha y nobleza, por consentirme, cuidarme y estar pendiente de mí.*

*A toda mi familia, mis tíos, mis primos, mis abuelos por estar siempre celebrando mis triunfos en especial a Nubia por su apoyo incondicional en Bucaramanga.*

*A mis compañeros y compañeras por cada momento compartido.*

***Joulynn Milena.***

## *DEDICATORIA*

*Este proyecto va dedicado a toda mi familia.*

*A mis padres por el apoyo brindado, no solo en esta etapa universitaria sino también por todo lo que me han dado en la vida.*

*A mis hermanos, que han compartido mis alegrías y tristezas.*

*A mis tíos, tías y primos que siempre han sido un bastión para mí.*

*Y finalmente a mis abuelos que aunque ya no están conmigo, desde el cielo me han acompañado en este camino.*

*A mis amigos, compañeros por cada experiencia vivida.*

*Oscar Maurício*

## *Agradecimientos*

*A Dios por sus bendiciones y favores recibidos, por darnos salud, amor y sabiduría.*

*A la Universidad Tecnológica de Pereira, en especial al profesor José Luis Tristancho, por el aporte de las probetas para la realización de este proyecto*

*Al profesor Darío Yesid Peña Ballesteros, nuestro director por la orientación y confianza brindada para el desarrollo de este proyecto de grado.*

*Al profesor Custodio Vásquez Quintero, por su colaboración, asesoramiento y aporte en conocimientos para la realización de este trabajo de igual manera a los diferentes profesores de la escuela.*

*Al grupo de investigación en corrosión GIC, a sus integrantes en especial a Alex y July por su enorme apoyo y por la mutua colaboración.*

*A los técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales, en especial a Ambrosio Carillo y Domingo por sus asesorías.*

*A los amigos y compañeros de carrera por todos esos momentos compartidos, todas esas maravillosas experiencias vividas, que se recordaran y extrañaremos cuando en la lejanía nos encontremos.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS.....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. PROYECCIÓN TÉRMICA.....	21
2.1.1. Fundamentos de la proyección térmica.....	21
2.1.2. Sistemas de proyección térmica.....	22
2.1.2.1. Proyección por llama o flamespray (FS).....	22
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	23
2.3. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.....	26
2.3.1. Extrapolación de Tafel.....	26
2.3.2. Resistencia a la polarización lineal.....	27
2.3.3. Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	27
2.3.3.1. Diagrama de Nyquist.....	28
2.3.3.2. Diagrama de Bode.....	29
2.3.4. Polarización potenciodinámica.....	29
2.3.5. Voltamperometría cíclica.....	30
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	32
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.2. ADQUISICIÓN DE PROBETAS.....	34
3.2.1. Preparación de las probetas.....	34
3.2.2. Preparación de la solución.....	34
3.3. MONTAJE EXPERIMENTAL.....	35
3.3.1. Montaje experimental de inmersión.....	35
3.3.2. Montaje de los ensayos electroquímicos.....	36
3.4. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....	37
3.4.1. Resistencia a la polarización lineal.....	37
3.4.2. Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	37
3.4.3. Curva potenciodinámica.....	38
3.4.4. Voltamperometría cíclica.....	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39
4.1. INSPECCIÓN VISUAL DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	40
4.1.1. Análisis Inicial.....	40
4.1.2. Análisis posterior a la inmersión.....	41
4.2. ANÁLISIS DE pH DE LAS SOLUCIONES.....	42

4.3. ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	43
4.3.1. Difracción de rayos X (DRX).....	43
4.3.2. Microscopia electrónica de barrido (FESEM).....	45
4.4. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.....	46
4.4.1. Curva potenciodinámica.....	47
4.4.1.1. Extrapolación de Tafel.....	50
4.4.2. Resistencia a la polarización lineal.....	52
4.4.3. Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	54
4.4.3.1. Recubrimiento Ni-Cr.....	54
4.4.3.2. Recubrimiento Ni-Cr-WC.....	55
4.4.3.3. Descripción del circuito equivalente propuesto.....	56
4.4.4. Voltamperometría cíclica.....	56
5. CONCLUSIONES.....	60
6. RECOMENDACIÓN.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS.....	66

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Sistema de proyección térmica por llama.....	23
<b>Figura 2.</b> Curva de extrapolación de Tafel.....	26
<b>Figura 3.</b> Diagrama de Nyquist.....	28
<b>Figura 4.</b> Diagrama de Bode. Representación de la impedancia, y ángulo.	29
<b>Figura 5.</b> Curva de polarización potenciodinámica.....	29
<b>Figura 6.</b> Esquema de una curva de voltamperometría cíclica típica.....	31
<b>Figura 7.</b> Diagrama de la metodología experimental desarrollada.....	32
<b>Figura 8.</b> Perfiles de difracción Ni-Cr.....	44
<b>Figura 9.</b> Perfiles de difracción Ni-Cr-WC.....	44
<b>Figura 10.</b> Curvas potenciodinámicas del recubrimiento Ni-Cr.....	47
<b>Figura 11.</b> Curvas potenciodinámicas del recubrimiento Ni-Cr-WC.....	49
<b>Figura 12.</b> Curvas de extrapolación de Tafel a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC.....	50
<b>Figura 13.</b> Curvas de resistencia a la polarización a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC...	53
<b>Figura 14.</b> Diagramas de Nyquist del recubrimiento Ni-Cr.....	55
<b>Figura 15.</b> Diagramas de Nyquist del recubrimiento Ni-Cr-WC.....	56
<b>Figura 16.</b> Circuito equivalente de los recubrimientos.....	57
<b>Figura 17.</b> Voltamperograma Ni-Cr y Ni-Cr-WC en estado de referencia.....	59

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

		Pág.
<b>Fotografía 1.</b>	Probetas utilizadas para las pruebas.....	34
<b>Fotografía 2.</b>	Montaje experimental para evaluar la corrosión.....	35
<b>Fotografía 3.</b>	Montaje de las pruebas electroquímicas a) Celda plana b) Jaula de Faraday.....	36
<b>Fotografía 4.</b>	Análisis microscópico del espesor de los recubrimientos a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC.....	41
<b>Fotografía 5.</b>	Condiciones finales a) Probetas b)Soluciones.....	42
<b>Fotografía 6.</b>	SEM Ni- Cr 200x a) t=0 días b) t=15 días.....	45
<b>Fotografía 7.</b>	SEM Ni- Cr-WC 200x a) t=0 días b) t=15 días.....	46

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición del acero del sustrato.....	33
<b>Tabla 2.</b> Condiciones para la realización de los ensayos.....	37
<b>Tabla 3.</b> Variables analizadas en el proyecto.....	39
<b>Tabla 4.</b> Características de los recubrimientos.....	40
<b>Tabla 5.</b> Medición de pH de las soluciones obtenidas.....	43
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de la zona pasivación a 15 días de inmersión.....	49
<b>Tabla 7.</b> Ecuaciones catódicas y anódicas Ni-Cr.....	51
<b>Tabla 8.</b> Ecuaciones catódicas y anódicas Ni-Cr-WC.....	51
<b>Tabla 9.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr por extrapolación de Tafel.....	52
<b>Tabla 10.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC por extrapolación de Tafel.	52
<b>Tabla 11.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr por resistencia a la polarización	54
<b>Tabla 12.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC por resistencia a la polarización.....	54
<b>Tabla 13.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr a partir de EIE.....	58
<b>Tabla 14.</b> Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC a partir de EIE.....	58

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>ANEXO A.</b> MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	66
<b>ANEXO B.</b> CARACTERISTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	69
<b>ANEXO C.</b> DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO.....	70
<b>ANEXO D.</b> DIAGRAMAS DE POURBAIX.....	71
<b>ANEXO E.</b> ANÁLISIS SEM-EDX.....	73
<b>ANEXO F.</b> CURVAS POTENCIODINÁMICA PARA LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr y Ni-Cr-WC.....	77
<b>ANEXO G.</b> MÉTODO PARA DETERMINAR LAS PENDIENTES ANÓDICAS Y CATÓDICAS A PARTIR DE LA CURVA DE TAFEL.....	78
<b>ANEXO H.</b> MÉTODO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	80
<b>ANEXO I.</b> CIRCUITOS EQUIVALENTES PROPUESTOS PARA LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr y Ni-Cr-WC.....	83
<b>ANEXO J.</b> VOLTAMPEROGRAMA .....	91

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr Y Ni-Cr-WC APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA SOBRE UN ACERO SAE-AISI 1015\*

**AUTORES:** PÁEZ DALLOS, Joulyn Milena y RUEDA RODRÍGUEZ, Oscar Mauricio.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Recubrimiento, Proyección térmica, técnicas electroquímicas, corrosión, cloruro de sodio, níquel, cromo, tungsteno.

Uno de los mayores inconvenientes que se tiene en cualquier aplicación de aleaciones metálicas es el fenómeno de la corrosión. Dependiendo de las propiedades que se requieran en una pieza se opta por un sistema de protección el cual puede ser la fabricación de un recubrimiento en el material base o por la selección de una aleación resistente a la corrosión, pero en la actualidad está tomando fuerza el uso de recubrimientos por su bajo costo ya sean metálicos, cerámicos o poliméricos, sobre un sustrato que posee las propiedades mecánicas.

Por estos motivos se realizó una evaluación electroquímica a recubrimientos depositados por proyección térmica mediante las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización, espectroscopia de impedancia electroquímica, curva potenciodinámica y voltamperometría cíclica. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente (aprox. 24°C) con tiempo de inmersión de 1,7 y 15 días en contacto con electrolito de NaCl al 3%. A su vez se realizó un análisis metalográfico, mediante Difracción de rayos X (DRX), para el estudio de los productos de corrosión, adicionalmente se realizó la técnica de microscopia, FESEM, con la cual se estudió la morfología del recubrimiento.

Dando como resultado una menor velocidad de corrosión de los recubrimientos con respecto al metal base; además una formación de una película pasiva no adherente sobre la superficie del recubrimiento, se obtuvo que la adición de carburo de tungsteno al recubrimiento de Ni-Cr, le proporciona una mejor adherencia, menor porosidad y mayor resistencia a la corrosión en un medio de cloruro de sodio.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Directos Ph.D PEÑA BALLESTEROS, Darío Yesid.

## ABSTRACT

**Title:** ELECTROCHEMICAL EVALUATION OF COATINGS Ni-Cr AND Ni-Cr-WC BY THERMAL APPLIED ON A STEEL SAE-AISI 1015 \*

**AUTHORS:** PÁEZ DALLOS, Joulyn Milena y RUEDA RODRÍGUEZ, Oscar Mauricio.\*\*

**KEYWORDS:** Coating, Thermal spraying, electrochemical techniques, corrosion, sodium chloride, nickel, chromium, tungsten.

One of the most drawbacks is that any application of metal alloys is the phenomenon of corrosion. Depending of the properties required in one piece is chosen by a system of protection which may be the manufacture of a coating on the substrate or by selection of a corrosion resistant alloy, but at present is taking hold the use of coatings for its low cost and are metallic, ceramic or polymer on a substrate which possesses mechanical properties.

For these reasons, an evaluation electrochemical coatings deposited by thermal spraying techniques using electrochemical polarization resistance, electrochemical impedance spectroscopy, potentiodynamic curves and cyclic voltammetry. The tests were performed at room temperature (approx. 24 ° C) with immersion time of 1, 7 to 15 days in contact with electrolyte of 3% NaCl. In turn metallographic analysis was performed by X-ray Diffraction (DRX), for the study of the corrosion products, in addition technique was performed microscopy, SEM-EDS, with which we studied the morphology of the coating.

The results in a slower rate of corrosion of the coatings with respect to the base metal, plus a passive film formation of a non-stick surface coating, it was found that the addition of tungsten carbide coating of Ni-Cr, provides an improved adhesion, reduced porosity and increased resistance to corrosion in half sodium chloride

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty Physical Chemistry of Engineering. School of metallurgical engineering and materials science. Direct Ph.D BALLESTEROS PEÑA, Dario Yesid.

## INTRODUCCIÓN

En muchas ocasiones las aleaciones metálicas fabricadas por el hombre están expuestas a sistemas muy agresivos, entre los cuales se pueden encontrar los suelos que por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición, atacan químicamente a los metales con los que está en contacto, también se encuentran las atmosferas marinas y finalmente sistemas con condiciones de elevadas temperaturas, con estas condiciones los materiales metálicos se deterioran progresivamente y pueden llegar a fallar, por este motivo se ha optado por crear materiales que cumplan a cabalidad tanto su función mecánica como protectora a la corrosión en los diferentes sistemas.

Uno de los mayores inconvenientes que se tiene en cualquier aplicación de aleaciones metálicas es el fenómeno de la corrosión. Las pérdidas económicas generadas a partir del contacto de una pieza metálica con ambientes corrosivos son elevadas y se dividen en pérdidas económicas directas o indirectas.

Dependiendo de las propiedades que requiera una pieza para realizar determinada aplicación en sistemas agresivos de corrosión, se opta por la fabricación de un recubrimiento en el material base, o por la selección de una aleación resistente a la corrosión. Actualmente en muchas de las aplicaciones que se requiera de un material resistente a la corrosión, se está optando por el uso de recubrimientos ya sean metálicos, cerámicos o poliméricos, sobre un sustrato que cumple con las propiedades mecánicas requeridas. Aquellas aplicaciones que requieren propiedades superficiales específicas, están usando recubrimientos metálicos por sus características. En la actualidad existen diferentes elementos metálicos que se usan comercialmente para la aplicación de un recubrimiento, entre los cuales se encuentran principalmente níquel, cromo, zinc, aluminio, estaño o una combinación entre estas.

El uso de recubrimientos metálicos resulta más económico que la fabricación de una aleación especial que posea tanto resistencia a la corrosión como buenas propiedades mecánicas, existen diferentes técnicas para llevar a cabo el recubrimiento de un material, entre estos se encuentran recubrimientos por electrodeposición, por inmersión, por proyección térmica, entre otras. Se diferencian principalmente en la forma en que se lleva a cabo el recubrimiento como también en sus costos de fabricación, la proyección térmica ofrece resultados competitivos con costos de producción menores que otras técnicas, además esta ofrece diferentes procedimientos con los cuales se puede fabricar el recubrimiento.

Con base en lo expuesto anteriormente es importante la elaboración de una evaluación electroquímica a recubrimientos de Ni-Cr y Ni-Cr-WC depositados por proyección térmica, inmersos en un electrolito de NaCl a diferentes tiempos de exposición, mediante el uso de las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), curva potenciodinámica y voltamperometría cíclica.

## **1.OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento a la corrosión de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC de un acero SAE-AISI 1015 aplicados mediante proyección térmica, en contacto con un electrolito de NaCl al 3% mediante el uso de técnicas electroquímicas.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la velocidad de corrosión de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC depositado por proyección térmica, mediante las técnicas electroquímicas de Resistencia a la polarización ( $R_p$ ), Curva potenciodinámica, Voltamperometría cíclica, y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE).
- Establecer el tipo de daño superficial que ocurre en los recubrimientos de proyección térmica por llama expuestos a las soluciones de cloruro de sodio a diferentes tiempos de exposición.
- Proponer un circuito equivalente para la interfase metal-recubrimiento-solución electrolítica a partir de las curvas de impedancia electroquímica.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA**

Las técnicas de proyección térmica se dan a principios del siglo XX cuando el ingeniero suizo Max Ulrich Schoop recubrió superficies metálicas sin el uso de adhesivos o inmersión. En 1912, el grupo a cargo de Schoop desarrolló el primer equipo comercial para proyectar térmicamente metal, el cual consistía en una pistola alimentada por alambres en estado sólido que pasaba a través de una llama de un gas combustible (oxiacetilénica) fundiendo el alambre metálico, este en estado líquido se proyectaba por medio de un chorro de aire comprimido a una pieza previamente preparada para recibirlo. [1]

A este proceso también fue originalmente conocido como rociado por llama, rociado térmico o metalización, inicialmente usado para reparar piezas desgastadas y aplicación de recubrimientos protectores.

#### **2.1.1 Fundamentos de la proyección térmica**

El proceso consiste en la aportación de materiales proyectados en forma de partículas fundidas finamente divididas, sobre un metal base, debidamente preparado.

El metal de aportación se funde mediante una fuente de energía, dando lugar a diferentes métodos de aportación. [2]

En todo proceso de rociado térmico se requiere la presencia de dos tipos de energía, la energía térmica y la cinética, la primera es indispensable para fundir el material a proyectar y la segunda para dar altas velocidades a las partículas que forman el recubrimiento, todo esto influye en las características del recubrimiento, entre estas características están la adhesión, cohesión, propiedades mecánicas, entre otras.

Un factor fundamental es la temperatura de proceso; existe una relación directa entre la adherencia de la capa del recubrimiento que se genera y la temperatura de deformación de la misma. Los fenómenos de difusión entre el sustrato y los componentes duros que se forman en su superficie causan una adherencia superior a la obtenida en otros procesos donde la temperatura de trabajo es más baja.

Las partículas proyectadas impactan en el sustrato de superficie fría, aplastándose y formando placas delgadas, que aumentan superponiéndose partículas, adhiriéndose a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas, produciéndose el recubrimiento de estructura laminar, que no es homogéneo y típicamente contiene cierto grado de porosidad y óxidos en el caso de proyección de metales. [3]

### **2.1.2 Sistemas de proyección térmica**

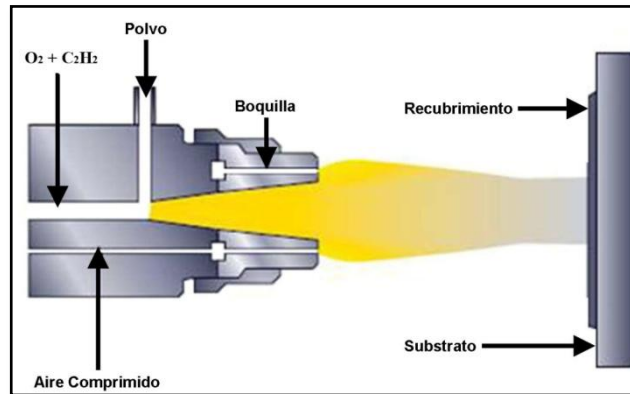
La proyección térmica engloba un grupo de procesos donde un material alimentado es calentado y proyectado como partícula individual en forma de gotas sobre una superficie. [3] Los diferentes sistemas utilizan para llevar a cabo el proceso diferentes métodos de calentamiento entre los cuales están: la combustión mediante un gas o electricidad mediante arco eléctrico o plasma.

#### **2.1.2.1 Proyección por llama o Flamespray (FS)**

Es el proceso más antiguo de rociado térmico, el uso de la energía térmica proviene de una llama de oxígeno más combustible (Acetileno, hidrógeno o propano) para fundir los materiales que conforman el recubrimiento, en forma de polvo o alambre (Figura 1), pudiendo ser metálicos o no y con puntos de fusión menores a 2000°C. Debido a la temperatura relativamente baja de la llama y la velocidad de la partícula, las capas son generalmente de menor calidad, tienen

alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas, baja resistencia y espesor limitado.

**Figura 1.** Sistema de proyección térmica por llama.



**Fuente:** GÓMEZ GARCÍA J. Tesis: “Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica mediante espectroscopia de impedancia electroquímica”. 2009 [17]

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Desde el descubrimiento de la gran resistencia que tienen las aleaciones a base Ni-Cr al ataque de muchos sistemas corrosivos, se han realizado diferentes estudios para determinar características y propiedades, con el fin de buscarle a estas aleaciones y recubrimientos aplicaciones en las cuales se comporte adecuadamente.

En el 2000 C.T. Kwok, H.C. Man y F.T. Cheng hicieron el estudio de un recubrimiento de NiCrSiB sobre un acero AISI 1050, sobre la corrosión por erosión utilizando una solución NaCl al 3,5% a 23°C, donde encontraron que la resistencia a la corrosión por erosión era de 8,9 veces más resistente que el sustrato. El aumento de esta resistencia se la atribuyeron a las propiedades mecánicas superiores de la matriz de NiCr-aleado formadas y la presencia de boruros y carburos de boro, que aumentó la dureza.

En el 2003 Wei-Min Zhaoa, YongWangb, Tao Hanb, Kai-Yuan Wub y JinXuea hicieron un estudio de la resistencia a la corrosión de un recubrimiento NiCrBSi aplicado por la técnica HVOF en un acero, donde los resultados arrojaron que tiene una excelente resistencia a la corrosión en solución alcalina por que la superficie puede mantener su condición de pasivación, pero determinando que la porosidad puede hacer daño en la resistencia persistente a la corrosión del recubrimiento. [40]

Her-HsiungHuang, en 2002 investigó la formación de una capa pasiva de las aleaciones a base Ni-Cr en aplicaciones dentales, con una solución que simulaba el ambiente corrosivo de la saliva, concluyendo que la pasivación se debía primordialmente a la formación del óxido de cromo  $Cr_2O_3$  en la superficie de la aleación. [22]

En 2005, T. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal, realizaron estudios para la caracterización de recubrimientos de Ni-Cr aplicados mediante la técnica HVOF (Proyección Térmica por Oxígeno – Combustible de Alta Velocidad), determinaron que además de ser altamente resistentes a la corrosión presentaban altas propiedades de dureza.[23]

Los científicos chinos OU Xue-mei, SUN Zhi, SUN Min, ZOU Duan-lian, en 2008 estudiaron el comportamiento de los recubrimientos Ni-Cr a condiciones de alta temperatura, sus estudios se desarrollaron en diferentes ambientes corrosivos, lo cual les permitió hacer una valoración de la resistencia a la corrosión de estos recubrimientos dependiendo del medio con el cual iba a interactuar. [24]

También en 2008 C.D Arrieta-González, J. Porcayo-Calderón, V.M. Salinas-Bravo, J.G. Chacón-Nava, J.G. González-Rodríguez, realizaron un estudio sobre resistencia a la corrosión por picaduras de recubrimientos base Ni-Cr. Los

recubrimientos mostraron un proceso de corrosión por hendiduras debido a las características de su proceso de formación. [25]

En 2010, Srinivasa B. Rao, RameshChowdhary, desarrollaron un estudio de la evaluación de tres aleaciones a base Ni-Cr con diferente composición, para el análisis de su investigación determinaron las velocidades de corrosión de cada aleación, debido a que este es uno de los parámetros más importantes en el ámbito de la corrosión. [26]

Adicionalmente a estos estudios, otros investigadores han venido desarrollando investigaciones sobre la influencia que tiene la adición de otros elementos al recubrimiento para mejorar la resistencia a la corrosión, y el estudio de la fase o fases que se generan.

Ya en 2008, Demetrios M. Sarantopoulos, Kelly A. Beck, Robert Holsen, y David W. Berzins, desarrollaron una investigación sobre el adiconamiento de paladio a aleaciones base Ni-Cr , encontrando para esta investigación que la adición de Pd a las aleaciones Ni-Cr tiene un efecto negativo dado que aumenta el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión. [28]

En definitiva y como es notorio debido a varios de los estudiados realizados a estos recubrimientos metálicos, los recubrimientos a base Ni-Cr tienen grandes expectativas para el futuro debido a su buena resistencia a la corrosión y otras propiedades que favorecen su aplicación en sistemas muy agresivos y de grandes exigencias mecánicas, también es necesario la experimentación de nuevos métodos para producir los recubrimientos, los cuales deben ser eficaces y que se puedan acceder económicamente, para una mayor producción.

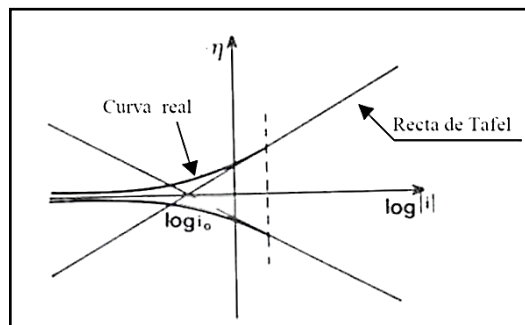
## 2.3 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

### 2.3.1 Extrapolación de Tafel<sup>20</sup>

La medida de la polarización electroquímica de extrapolación de Tafel, es una técnica que se basa en el estudio de la polarización anódica y catódica. Los cálculos experimentales requieren de los valores de las corrientes y de los potenciales aplicados para establecer al diagrama de polarización.

Para determinar experimentalmente los parámetros cinéticos  $i_0$ ,  $\beta_a$  y  $\beta_c$ , es recomendable una representación grafica en la que la densidad de corriente este en una escala logarítmica, ya que así se pone en evidencia la relación lineal existente entre el  $\log(i)$  y el sobrepotencial ( $\eta$ ) como se muestra en la figura 2.

**Figura 2.** Curva de extrapolación de Tafel



**Fuente:** Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión [20]

Se denomina región o dominio de Tafel es aquella región en la cual el potencial que corresponde a  $\eta/\beta \gg 1$  para la parte anódica y para la parte catódica  $\eta/\beta \ll 1$ , la ecuación es la que se muestra a continuación:

$$i = i_a = i_0 \exp\left(\frac{n_a}{\beta_a}\right) \quad \text{ó} \quad i_c = i_0 \exp\left(\frac{n_c}{\beta_c}\right) \quad (1)$$

### 2.3.2 Resistencia a la polarización lineal<sup>16</sup>

Una de las técnicas electroquímicas para medir potenciales es la resistencia de polarización ( $R_p$ ) de Stern-Geary. La técnica consiste en desplazar al sistema de su potencial de equilibrio  $E_{corr}$ , a otro valor de potencial ya sea catódicamente o anódicamente, registrándose las variaciones de potencial ( $\Delta E$ ) y de corriente ( $\Delta I$ ) en el sistema debido a este desplazamiento. [16]

La ecuación para el cálculo de la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , a partir de aplicar la  $R_p$  se obtiene a través de la ley de Ohm despejando la resistencia ( $R$ ):

$$E = I * R \quad (2)$$

Donde  $E$  es el potencial,  $I$  la corriente, y  $R$  la resistencia. La resistencia de polarización se puede definir en función del desplazamiento de potencial:

$$R_p = E/I = \Delta E/\Delta I \quad (3)$$

A través de esta polarización y de pendientes de Tafel, la velocidad de corrosión se expresa de acuerdo a la ecuación de Stern-Geary:

$$\Delta E/\Delta I = \frac{b_a * b_c}{2,3 I_{corr} * (b_a + b_c)} \quad (4)$$

Donde  $B$  es la constante de Tafel

$$B = \frac{b_a * b_c}{2,3 * (b_a + b_c)} \quad (5) \quad \Delta E/\Delta I = \frac{B}{I_{corr}} \quad \rightarrow \quad R_p = \frac{B}{I_{corr}} \quad (6)$$

### 2.3.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Es una técnica electroquímica en donde una señal de corriente alterna es usada como estímulo de frecuencia variable a una cierta amplitud de señal, registrando la respuesta ha dicho estímulo. Al emplear una señal de corriente alterna involucra propiedades de: magnitud de potencial, amplitud de señal y una frecuencia característica que cambia con respecto al tiempo. La técnica emplea altas y bajas

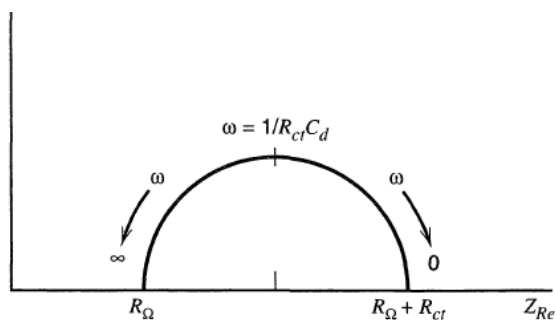
frecuencias con amplitud constante, para poder contar con una respuesta del material en los procesos como la adsorción de productos o el transporte de materia por difusión. De este modo cualquier propiedad intrínseca que afecte la conductividad del sistema electrodo/electrolito y su correspondiente interacción con el medio que lo rodea, o un estímulo externo puede ser detectada. [16]

El método de EIE se apoya en el ajuste de circuitos eléctricos análogos para la elaboración de predicciones a partir de sus magnitudes y poder obtener cuantitativamente estimaciones de las características de corrosión.

### 2.3.3.1 Diagrama de Nyquist.

A partir de la Ecuación  $Z = Z_0 \cos \phi + j \sin \phi$ , dicha ecuación está compuesta de una componente real y una imaginaria. Al graficar la parte real en el eje de las abscisas y la parte imaginaria en el eje de las ordenadas como se observa en la figura 3, se obtienen el diagrama denominado de Nyquist. La parte imaginaria es por tanto negativa en el diagrama por ello hay que transformarla multiplicando por -1 para poder representarla en el primer cuadrante. Cada punto en el diagrama representa la impedancia a una frecuencia determinada. [8]

**Figura 3.** Diagrama de Nyquist



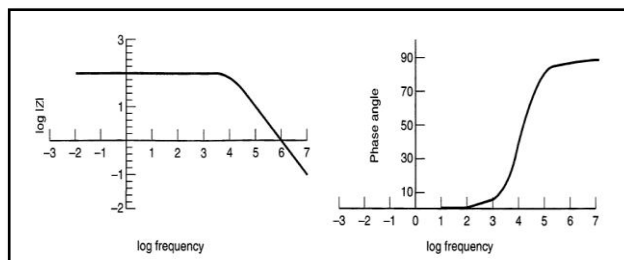
**Fuente:** BARD, Allen. FAULKNER, Larry.  
Electrochemical methods fundamentals and applications [10]

### 2.3.3.2 Diagrama de Bode

El diagrama de Bode representa la variación logarítmica del valor absoluto de la impedancia con el logaritmo de la frecuencia, por lo que así se facilita el estudio del comportamiento a través del tiempo y la distancia como se ve en la figura 4.

Por el contrario al diagrama de Nyquist, el de Bode ofrece información explícita acerca de los valores de frecuencia en un punto determinado. A partir de este diagrama, también es posible realizar una determinación de los valores correspondientes a la resistencia a la solución ( $R_s$ ) y resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ) e indirectamente de la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ). [16]

**Figura 4.** Diagrama de Bode. Representación de la impedancia, y ángulo



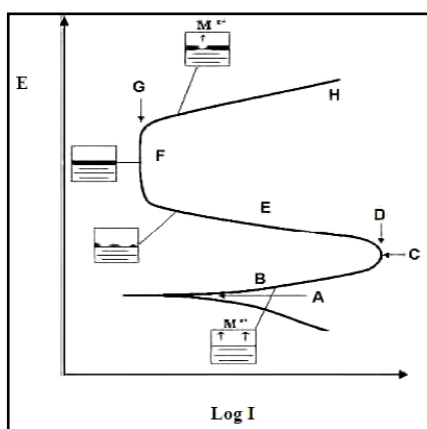
**Fuente:** BARD, Allen. FAULKNER, Larry.

Electrochemical methods fundamentals and applications [10]

### 2.3.4 Polarización potenciodinámica

Esta técnica mide las características de polarización experimentalmente, alcanzando una respuesta en corriente en función del sobrepotencial aplicado. Proporciona información acerca de la capacidad del material para pasivarse espontáneamente en un determinado medio, la región del potencial donde permanece pasiva, la velocidad de corrosión del sistema en estudio y zonas de evolución de hidrógeno u oxígeno. La Figura 5, presenta una gráfica de polarización en la que se pueden distinguir las zonas de estudio más relevantes.

**Figura 5.** Curva de polarización potenciodinámica



**Fuente:** DIMATÉ CASTELLANOS Laura Marcela. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram y Proxon producidos con el sistema de proyección térmica por llama. [16]

Donde cada región representa:

- A) Potencial de corrosión.
- B) Zona activa, en esta zona conforme incrementa el sobre potencial, aumenta la velocidad de corrosión, por tanto existe un comportamiento activo.
- C) Potencial de pasivación.
- D) Corriente crítica, es la zona donde se inicia el proceso de pasivación.
- E) Zona activa-pasiva.
- F) Zona pasiva, en esta etapa se mantiene la misma velocidad de corrosión a pesar de un aumento en el sobrepotencial, la formación de capas pasivas de productos de corrosión protectores impide que el material se siga consumiendo.
- G) Corriente de pasivación.

### 2.3.5 Voltamperometría cíclica

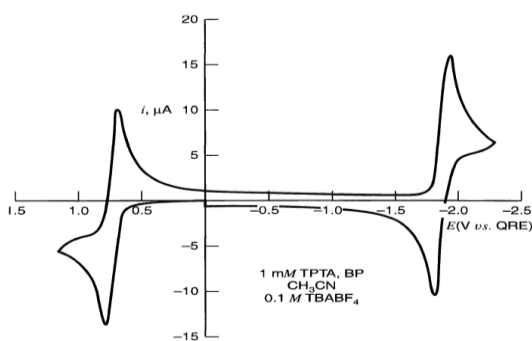
Esta técnica es una de las más usadas para obtener información cualitativa acerca de las reacciones electroquímicas, es posible obtener rápida localización de potenciales redox para especies electroactivas.

La velocidad de barrido del potencial se elige de acuerdo a la rapidez con que ocurren los procesos de inserción/extracción de iones en el material a fin de que se lleve a cabo completamente la reacción electroquímica. La corriente de respuesta es registrada para cada potencial, se obtienen gráficas como la mostrada en la Figura 6.

La interpretación de la curva obtenida de la prueba de voltamperometría cíclica es de gran utilidad para entender el mecanismo de la interacción iónica. De estos diagramas se puede obtener información como:

- El comportamiento electroquímico de las especies de difusión hacia la superficie del electrodo.
- El número de picos anódicos o catódicos, que indican el número de procesos electroquímicos que están ocurriendo.
- Los fenómenos interfaciales que ocurren en la superficie del electrodo.

**Figura 6.** Esquema de una curva de voltamperometría cíclica típica



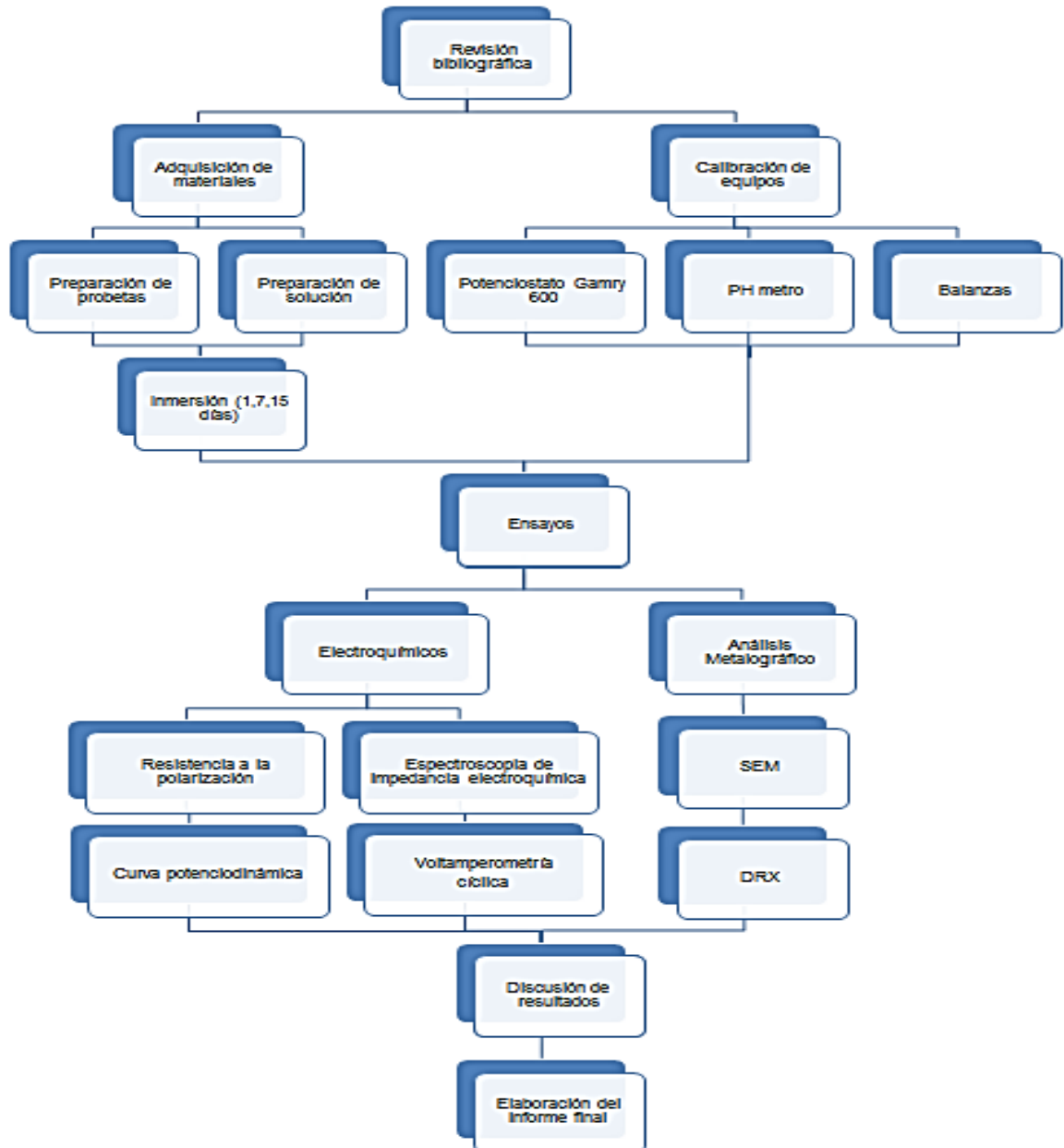
**Fuente:** BARD, Allen. FAULKNER, Larry.  
Electrochemical methods fundamentals and applications [10]

El intervalo de potencial de inversión definido en cada experimento es aquel en el que tiene lugar la oxidación o la reducción controladas por la difusión y la dirección en la que se produzca el barrido dependerá de la composición que presente la muestra. El barrido en la dirección de potenciales más negativos es denominado barrido directo y en la dirección opuesta recibe el nombre de barrido inverso.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la ejecución de este proyecto se llevó a cabo la metodología mostrada en la figura 7, con el fin de obtener unos resultados confiables y alcanzar los objetivos fijados.

**Figura 7.** Diagrama de la metodología experimental desarrollada



Fuente: Autores

### 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A lo largo de la investigación se llevo a cabo una recopilación bibliográfica, basada en libros, artículos, revistas nacionales como internacionales, normas técnicas, paginas web y tesis de grado, de las cuales se sustrajo información pertinente acerca de los temas relacionados con el proyecto, como son la proyección térmica, pruebas electroquímicas, generalidades de la corrosión de las aleaciones base Ni-Cr y aquellos a los cuales se les adiciona carburos de tungsteno (WC).

Lo cual fue una gran ayuda para la interpretación de los resultados obtenidos y para el aporte de las conclusiones finales.

### 3.2 ADQUISICIÓN DE PROBETAS

Los recubrimientos fueron fabricados en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) mediante la técnica de proyección térmica, por el método de proyección por llama oxiacetilénica, las condiciones bajo las cuales se produjeron los recubrimientos fueron una relación Acetileno-Oxígeno de 3 a 1 y una distancia de la boquilla al sustrato de 3 cm.

Las probetas en promedio tuvieron las siguientes especificaciones, placas de dimensión de 5 cm x 5 cm y espesor de 2 mm incluyendo el recubrimiento, el sustrato de la placa fue un acero SAE-AISI 1015, su composición se muestra en la tabla1.

**Tabla 1.** Composición del acero del sustrato

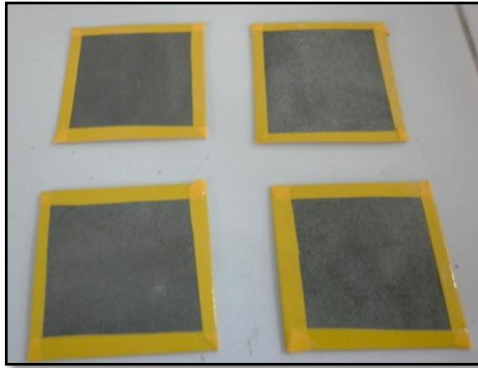
AISI- SAE	C	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Fe
1015	0.13 – 0.18	0.30 – 0.60	0.40	0.50	Balance

**Fuente:** ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. [25]

### 3.2.1 Preparación de las probetas

La preparación de las probetas se realizó bajo las normas ASTM G1-03 y ASTM G-31-72 donde se especifican, los procedimientos necesarios para llevar a cabo la limpieza y evaluación posterior de las probetas, los materiales y equipos utilizados en el desarrollo del proyecto están debidamente identificados en el ANEXO A.

**Fotografía 1.** Probetas utilizadas para las pruebas



**Fuente:** Autores

Las probetas fueron recubiertas con una cinta resistente a la corrosión (Arclad P1) como se muestra en la fotografía 1, debido a que el recubrimiento metálico solo se encontraba por el anverso de las probetas, y además evitar el efecto borde.

### 3.2.2 Preparación de la solución

Debido a que muchas de las aplicaciones que le ha dado el hombre a las aleaciones metálicas se encuentran en contacto con electrolitos que contienen cloruros, la solución escogida para el estudio fue un electrolito de NaCl analítico con una concentración al 3%.

Para su preparación se utilizó cloruro de sodio cristalino de alta pureza, pesado en una balanza digital, y posteriormente aforado con agua destilada, a presión y temperatura ambiente.

### 3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

De acuerdo a lo estipulado en la recopilación bibliográfica, se realizaron dos tipos de montajes para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación, el primero fue un montaje de inmersión y el segundo un montaje para el desarrollo de las pruebas electroquímicas.

#### 3.3.1 Montaje experimental de inmersión

El montaje utilizado es el que se muestra en la fotografía 2, con las especificaciones dadas en la norma ASTM G-31-72, para el cual se realizó un muestreo a los 1, 7 y 15 días de iniciado el experimento. Teniendo en cuenta que la probeta solo debía estar en contacto por un solo lado, se utilizó un montaje desairado, a presión y temperatura ambiente.

**Fotografía 2.** Montaje experimental para evaluar la corrosión



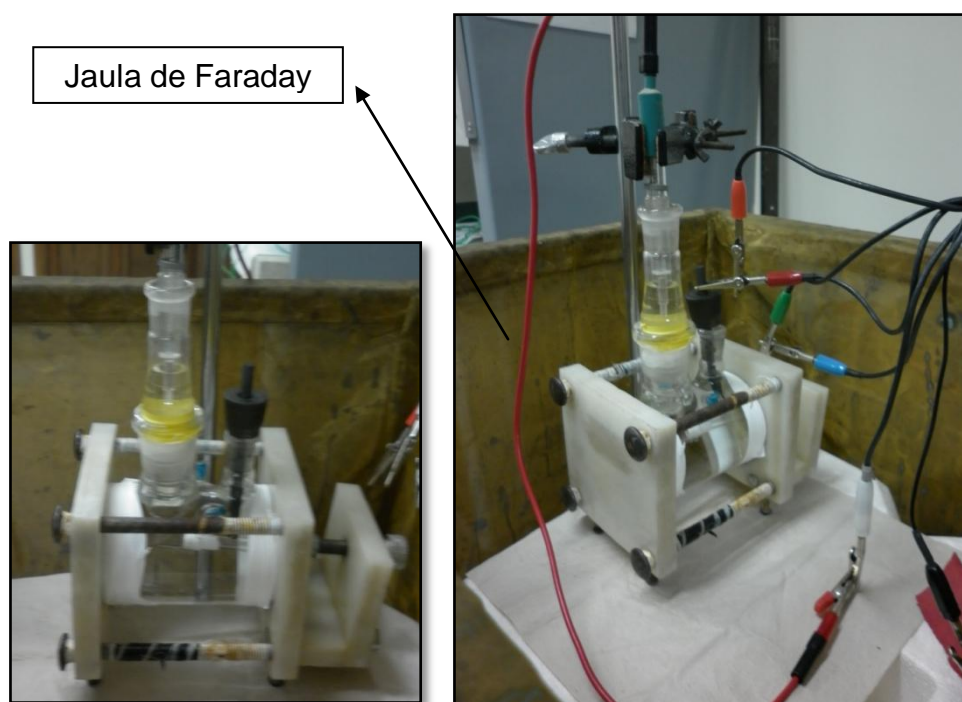
**Fuente:** Autores

### 3.3.2 Montaje de los ensayos electroquímicos

Para el desarrollo de las pruebas electroquímicas se utilizó una celda plana de tres electrodos, de los cuales el electrodo de referencia fue de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl 3M), el electrodo auxiliar una barra de grafito y como electrodo de trabajo las probetas en materia de estudio (fotografía 3a).

La celda se encontraba conectada a un potenciostato-galvanostato marca Gamry 600, que a su vez se encontraba conectado a una computadora con el software Gamryinstrumentsframework versión 5.61. Para evitar cualquier alteración que pudiera afectar las mediciones la celda fue introducida en una jaula de Faraday y de esta manera evitar campos electromagnéticos (fotografía 3b).

**Fotografía 3.** Montaje de las pruebas electroquímicas a) Celda plana b) Jaula de Faraday.



Fuente: Autores

### 3.4 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

**Tabla 2.** Condiciones para la realización de los ensayos

Prueba	Inicial	Final	Velocidad
Resistencia a la polarización	E= - 20 mV	E= 20 mV	0.16 mV/s
Curva Potenciodinámica	E=-1000 mV	E=1200 mV	1 mV/s
Voltamperometría cíclica	E = -2.5 V	E=2.5 v	10 mV/s
EIE	10.000 Hz	0.005 Hz	7 décadas

Fuente: Autores

#### 3.4.1 Resistencia a la polarización lineal

Dicha prueba se realizó de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM G-59-97, con la aplicación de un sobrepotencial en un barrido de -20 mV a + 20 mV con respecto al potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) iniciando la prueba en la zona catódica y terminando en la zona anódica, la velocidad de las pruebas fue de 0,16 mV/s. El tiempo de estabilización del potencial fue de 300 segundos. Para el análisis de esta prueba se graficó el potencial en el eje de las ordenadas y la corriente en el eje de las abscisas, con el fin de determinar la resistencia a la polarización como la pendiente de la recta graficada.

#### 3.4.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica

Esta prueba se le realizó a todas las probetas de los dos recubrimientos a los diferentes tiempos de exposición, evaluándolos en un rango de frecuencia de 0.005 Hz a 10000 Hz con una amplitud de 10 mV, el tiempo de estabilización fue de 300 segundos, la norma ASTM G-3-89 fue la guía para la realización de la prueba.

### **3.4.3 Curva potenciodinámica**

El ensayo potenciodinámico, es una técnica que permite la evaluación completa del recubrimiento estudiado, debido a que la prueba busca determinar comportamiento activo-pasivo de las diferentes aleaciones. La prueba fue aplicada bajo los parámetros de la norma ASTM G-5-94, bajo las siguientes condiciones velocidad de barrido de 1 mV/s, rango de potencial desde -1 V hasta 1.2 V con respecto al potencial de corrosión.

### **3.4.4 Voltamperometría cíclica**

Las condiciones para realizar la prueba potenciodinámica se rigieron bajo la norma ASTM G-61-86, para la cual se realizaron 3 ciclos en cada prueba, con el fin de determinar y analizar las reacciones que surgen en el proceso de corrosión, la ventana a la cual se realizaron los ensayos fue de  $\pm 2.5$  V.

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas desarrolladas siguiendo los parámetros de la metodología propuesta, realizando además un análisis para la determinación de las velocidades de corrosión de los recubrimientos estudiados. También se realizó un análisis de la microestructura para establecer el tipo de daño superficial y la morfología que presentan los recubrimientos expuestos al finalizar su exposición a un ambiente corrosivo de cloruro de sodio.

De acuerdo a lo recopilado y analizado en la bibliografía, se determinó que las variables de las que depende la eficiencia de los recubrimientos son muy variadas, entre éstas están, la composición del recubrimiento, el ambiente al cual es sometido, la temperatura del sistema, entre otras. En la tabla 3 se presentan las variables que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto.

**Tabla 3.** Variables analizadas en el proyecto

Variable	Cantidad	Especificación			
<b>Recubrimientos</b>	2	Ni-Cr		Ni-Cr-WC	
<b>Tiempo (Días)</b>	4	0	1	7	15

**Fuente:** Autores

En la tabla 4 se muestran las características de los recubrimientos estudiados, éstos deben tener además de una buena resistencia a la corrosión, una dureza y resistencia a la abrasión alta, por tal motivo se escogieron el recubrimiento Ni-Cr en primera instancia y como segundo, uno al cual se le adicionó carburo de tungsteno Ni-Cr-WC, de esta forma se determinará cual composición es más eficiente ante el ataque corrosivo, la información adicional de los recubrimientos podrá ser visualizada en el ANEXO B.

**Tabla 4.** Características de los recubrimientos

Recubrimiento	Nombre Técnico	(wt%)				HRC
<b>Ni-Cr</b>	MetaCeram 29021	Ni	70	B	4	32
		Cr	13	Al	4	
		Fe	4	C	1	
		Si	4			
<b>Ni-Cr-WC</b>	TungTec 10112	WC	70	B	5	62
		Ni	18	Si	1	
		Cr	5	Fe	1	

Fuente: Autores

## 4.1 INSPECCIÓN VISUAL DE LOS RECUBRIMIENTOS

### 4.1.1 Análisis Inicial

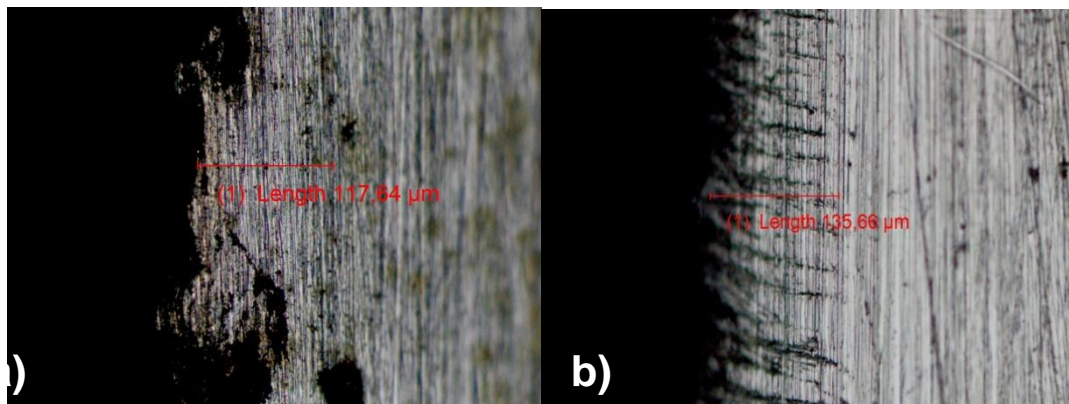
En primera media y a partir de la composición de los recubrimientos se estableció las fases presentes que se encontraban en los recubrimientos para el caso del recubrimiento de Ni-Cr y Ni-Cr-WC.

Con respecto a la composición del recubrimiento Ni-Cr se tiene que el elemento principal es el Ni, de acuerdo a los rangos en los que se encuentran los elementos aleantes, la fase presente en el recubrimiento es una solución sólida de níquel, esto de acuerdo al diagrama de fase binario Ni-Cr. Las características cristalográficas de la fase son fundamentales para determinar las propiedades que tienen los recubrimientos a la resistencia a la corrosión, dichas características están expuestas en el ANEXO C.

Para el segundo recubrimiento el cual tiene como fases principales compuestos intermetálicos de carburos de tungsteno, las características cristalográficas de los carburos son las que proporcionan la dureza y resistencia a la abrasión de los recubrimientos (ANEXO C).

Adicionalmente las piezas fueron inspeccionadas visualmente para determinar las condiciones iniciales, de lo cual se encontró lo siguiente; la superficies de ambos recubrimientos presentaba una alta rugosidad, y en algunas una falta de homogeneidad en algunos sectores. De acuerdo a lo estipulado en la bibliografía consultada se procedió a medir el espesor del recubrimiento mediante análisis microscópico encontrando un espesor promedio de 117.64  $\mu\text{m}$  para Ni-Cr y 135.66  $\mu\text{m}$  para Ni-Cr-WC (Fotografía 4.), debido a que la resistencia a la corrosión de un material se encuentra influenciado por el espesor del recubrimiento.

**Fotografía 4.** Análisis microscópico del espesor de los recubrimientos  
a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC



Fuente: Autores

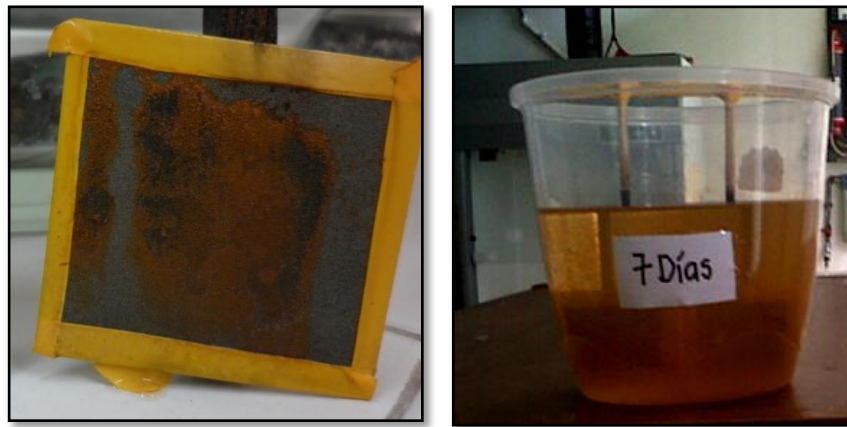
#### 4.1.2 Análisis posterior a la inmersión

Una vez finalizado cada tiempo de inmersión, se realizaron observaciones visuales a las probetas y soluciones correspondientes, encontrando que los productos de corrosión sobre la superficie de los recubrimientos eran de color naranja (Fotografía 5a), los cuales se retiraban fácilmente, para la probeta correspondiente al día 15 de ensayo del recubrimiento Ni-Cr-WC se observó un rompimiento uniforme en la parte central, dando lugar a una posible corrosión por par galvánico, debido a la diferencia de potencial entre el sustrato y el recubrimiento.

En cuanto a la solución, esta se tornaba de un color naranja, con precipitación de óxidos en el fondo del recipiente, el color se intensificaba a medida que aumentaban los días de exposición (Fotografía 5b). Se puede establecer de las anotaciones anteriores, que el tipo de daño predominante en los recubrimientos es de tipo uniforme.

Al finalizar la limpieza correspondiente y retirar la cinta resistente a la corrosión, se determinó que no hubo filtración en el sustrato por el revés de la probeta, lo cual indica que no hay alteración en los resultados por oxidación proveniente del metal base.

**Fotografía5.** Condiciones finales a) Pobretas b)Soluciones

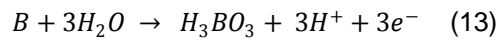
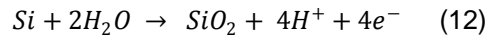
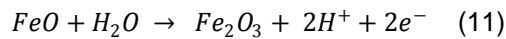
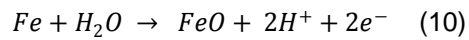
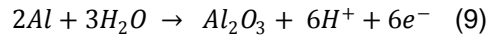
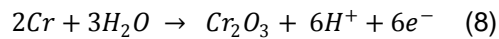
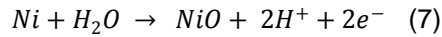


Fuente: Autores

#### 4.2 ANÁLISIS DE pH DE LAS SOLUCIONES

Una vez realizadas las inmersiones de las probetas en la solución electrolítica se procedió a medir el pH de cada una de las soluciones obtenidas en cada día de estudio, estas mediciones se realizaron para cada uno de los recubrimientos. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos, observando un ligero aumento en el pH a medida que aumentaba el tiempo de inmersión tanto para el recubrimiento de Ni-Cr y Ni-Cr-WC; lo cual indica que hay una disminución de lo iones  $H^+$ , es decir que se presenta una evolución de hidrógeno, la cantidad de la disminución de

hidrógeno no solo depende de dicha evolución, sino que también se encuentran involucrados los diferentes mecanismos de oxidación de los elementos presentes en las probetas, como se observa en las siguientes ecuaciones.



**Tabla 5.** Medición de pH de las soluciones obtenidas

Recubrimiento	0 días	1 día	7 días	15 días
<b>Ni-Cr</b>	5.96	6.05	6.23	6.35
<b>Ni-Cr-WC</b>	5.96	6.01	6.11	6.21

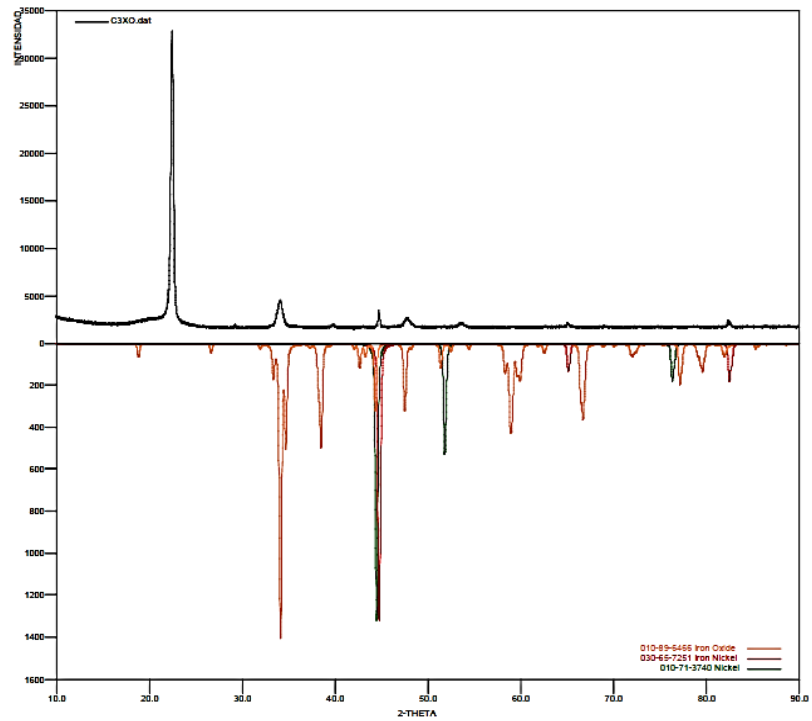
**Fuente:** Autores

### 4.3 ANÁLISIS METALOGRAFICO

#### 4.3.1 Difracción de rayos X (DRX)

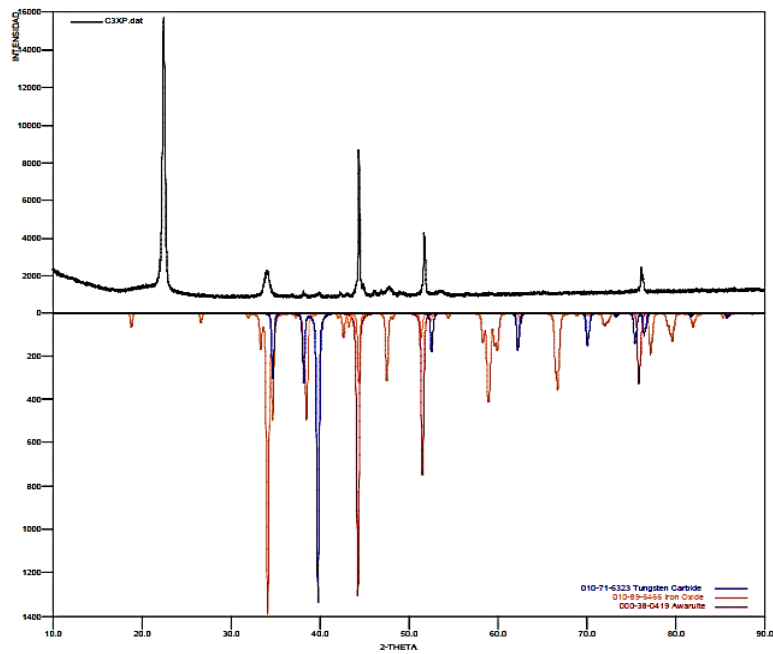
Para determinar la composición de los productos de la corrosión, se realizó la prueba de DRX a las probetas de 15 días de inmersión, dando como resultados los espectros que se observan en las figuras 8 y 9, adicionalmente en el ANEXO D se encuentran los diferentes diagramas de Pourbaix, donde se muestran los posibles compuestos que termodinámicamente deberían formarse.

**Figura 8.** Perfiles de Difracción Ni-Cr a los 15 días de inmersión



**Fuente:** Laboratorio de difracción de rayos-X Universidad Industrial de Santander

**Figura 9.** Perfiles de Difracción Ni-Cr-WC a los 15 días de inmersión



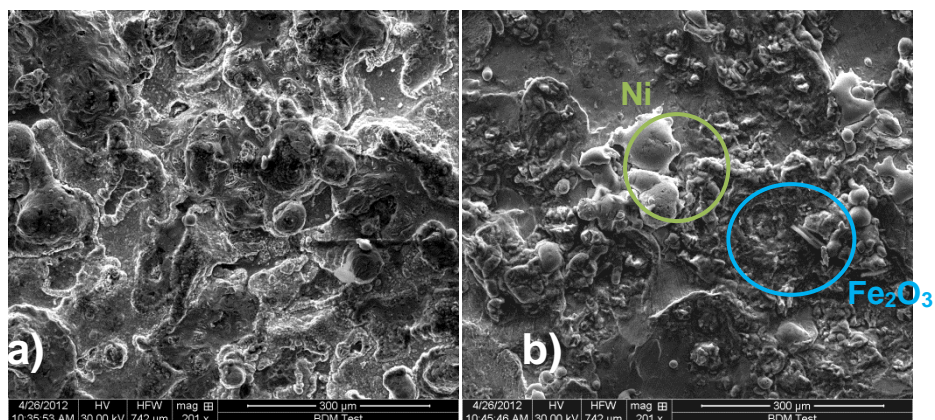
**Fuente:** Laboratorio de difracción de rayos-X Universidad Industrial de Santander

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de difracción, se presentan en ambos recubrimientos óxido de hierro en forma de magnetita, la presencia de Ni en el primer recubrimiento y carburo de tungsteno para el segundo, algunas de las fases no se encontraron debido a que en su fabricación pudieron no cristalizar y presentar una estructura amorfa, esta prueba solo detecta estructuras cristalinas como las mencionadas anteriormente.

#### 4.3.2 Microscopia electrónica de barrido (FESEM)

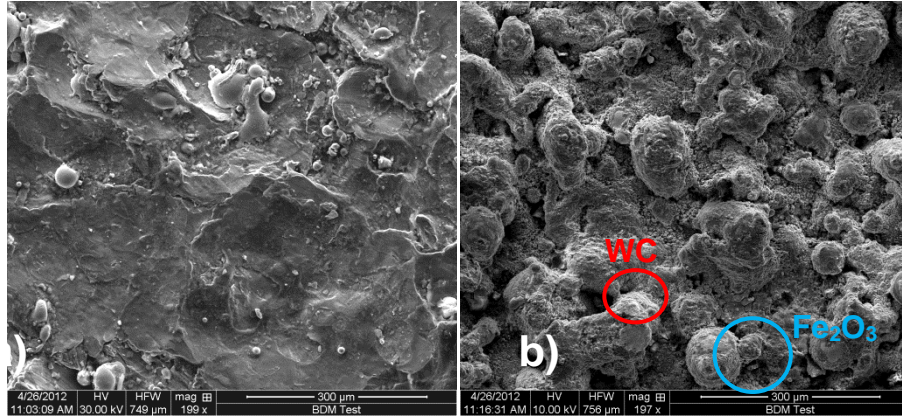
Con el fin de determinar la evolución de la morfología de las probetas se realizó la prueba de FESEM para ambos recubrimientos a los 0 y 15 días (fotografías 6 y 7) correspondiente a cada uno de los recubrimientos. En la cual se evidencia el cambio de morfología y la formación de productos de corrosión. ANEXO E. Con respecto al recubrimiento de Ni-Cr su cambio de morfología se le atribuye a la formación de óxidos de hierro esto se debe a la no adherencia de los óxidos de níquel y cromo en la superficie del recubrimiento, provocando la formación hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) del metal base; como se puede observar en la fotografía 6b el níquel (Ni) se encuentra en pequeñas proporciones.

**Fotografía 6.** SEM Ni-Cr 200x a) t=0 días b) t=15 días



**Fuente:** Laboratorio de Microscopía Universidad Industrial de Santander

**Fotografía 7.** SEM Ni-Cr-WC 200x a) t=0 días b) t=15 días



**Fuente:** Laboratorio de Microscopía Universidad Industrial de Santander

En el recubrimiento Ni-Cr-WC a tiempo cero (Fotografía 7a) se establece que el recubrimiento es uniforme pero con un alto grado de rugosidad lo que favorece la corrosión de este, en el ANEXO F se observan los resultados de la prueba EDX en la cual se muestran los elementos constituyentes del recubrimiento como lo son el W, C, Ni, Cr, Si entre otros. En la fotografía 7b se evidencia la formación de óxidos de hierro provenientes del metal base, a estas condiciones no existe una interacción electroquímica entre el WC y el electrolito, por lo tanto la velocidad de corrosión no se verá alterada tan drásticamente.

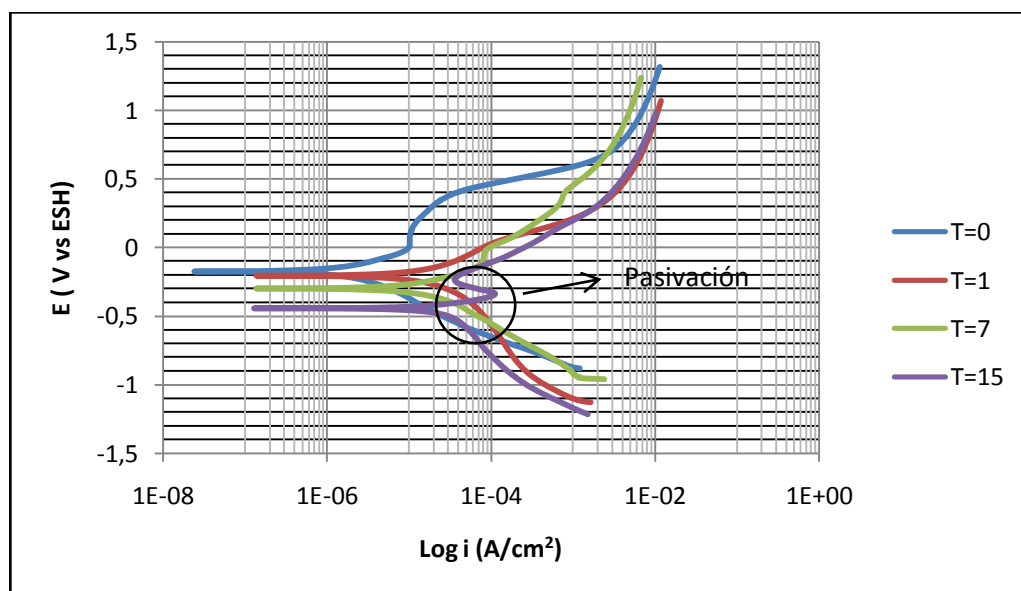
#### 4.4 ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS

Para la evaluación del comportamiento a la corrosión se utilizaron diferentes técnicas electroquímica; para la determinación de la velocidad se usaron las técnicas de resistencia a la polarización, curva potenciodinámica (extrapolación de Tafel) y espectroscopia de impedancia electroquímica.

#### 4.4.1 Curva potenciodinámica

Con el fin de estudiar el comportamiento activo-pasivo, la presencia o no de corrosión por picadura y la velocidad de corrosión uniforme, se realizó la curva potenciodinámica para los diferentes tiempos de exposición de cada recubrimiento.

**Figura 10.** Curvas potenciodinámicas del recubrimiento Ni-Cr



**Fuente:** Autores

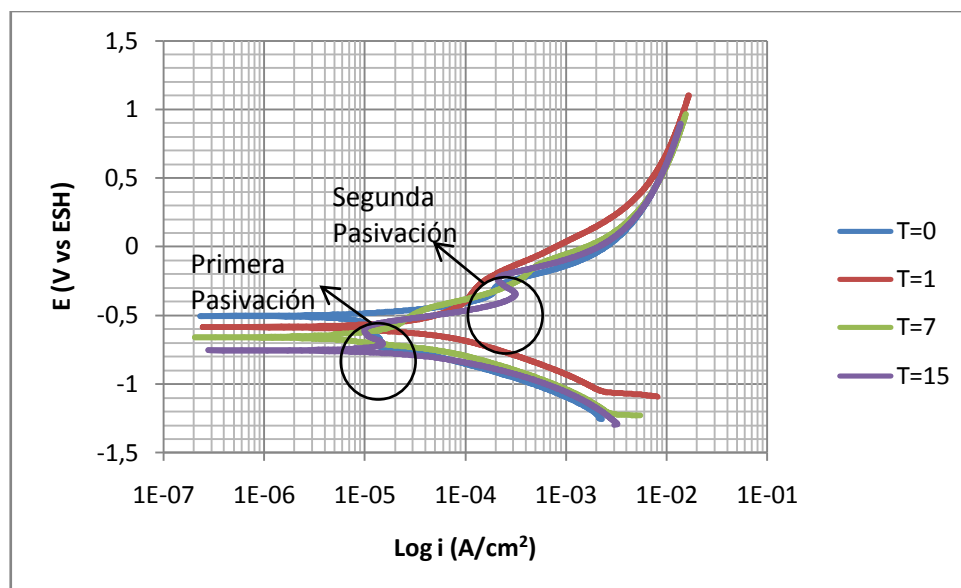
A partir de la figura 10 correspondiente al recubrimiento Ni-Cr, se puede establecer que a medida que el tiempo de inmersión aumenta este se vuelve más activo, es decir el potencial de corrosión disminuye, la superficie metálica forma una capa de hidróxido poroso que sólo reduce la velocidad de corrosión pero no protege el metal de la corrosión (típicamente una disminución de  $E_{corr}$ ) [40]; a su vez se observa que para los tiempos 0,1 y 7 días la curva presenta un comportamiento de una aleación donde no presenta zona de pasivación, mientras que a los 15 días de inmersión sí presenta dicho comportamiento activo-pasivo. La pasividad que se presenta es mínima como se puede observar en la tabla 6, la cual muestra que la diferencia entre  $E_{pic}$  y  $E_f$  es de 0.0072 V, la pasivación se atribuye

a la formación de una película de óxido de níquel principalmente, la cual no tiene una adherencia sobre el recubrimiento lo suficientemente grande para llevar a cabo una pasivación significativa.

Los cambios de pendiente que ocurren en las curvas anódicas se deben principalmente a la oxidación de los diferentes elementos que hacen parte del recubrimiento, se tiene por ejemplo que la oxidación del Al, Si y Cr, los cuales tienen potenciales de reducción de -1.66, -0.86 y -0.74 V vs ESH respectivamente, son las que representan la primera pendiente a partir del potencial de corrosión en dirección anódica, posteriormente el segundo cambio de pendiente se debe a la oxidación de los demás elementos como lo son el Fe y el Ni, los cuales tienen potenciales de semireacción de -0.45 y -0.25 V vs ESH [4], como se observa en las graficas, el fenómeno se presenta en menor medida a tiempos de inmersiones de 7 y 15 días, a consecuencia de las bajas concentraciones de aluminio, hierro y silicio, los cuales a estos tiempos ya han sufrido otras transformaciones, como son las formaciones de sus respectivos óxidos.

Respecto al recubrimiento Ni-Cr-WC, se evidencia la misma tendencia que en el recubrimiento Ni-Cr de una disminución en el potencial de corrosión a medida que aumenta el tiempo de inmersión, además existe en el recubrimiento un comportamiento de una zona activa para los tiempos 0,1 y 7 días mientras que para el tiempo de inmersión de 15 días se observa un comportamiento activo-pasivo con una doble zona de pasivación (Figura 11), la primera pasivación se le atribuye a la oxidación del silicio, por su bajo potencial de formación, con respecto a los otros elementos que constituyen el recubrimiento, este óxido no tiene la característica de protección, como consecuencia del avance de la corrosión al aumentar el sobrepotencial se presenta una segunda pasivación la cual corresponde a la formación del óxido de níquel, como se presentó para el primer recubrimiento Ni-Cr (Ver ANEXO F), aun así la magnitud de la pasivación es pequeña como se puede evidenciar en la tabla 6.

**Figura 11.** Curvas potenciodinámicas del recubrimiento Ni-Cr-WC



Fuente: Autores

Adicionalmente se muestra que los potenciales del recubrimiento Ni-Cr, para cada uno de los tiempos de inmersión son más nobles con respecto al recubrimiento Ni-Cr-WC como se muestra en el ANEXO F, debido a la influencia que tiene la adición del WC, y esto es atribuido a que el carburo de tungsteno no reacciona electroquímicamente.

**Tabla 6.** Parámetros de la zona pasivación a 15 días de inmersión

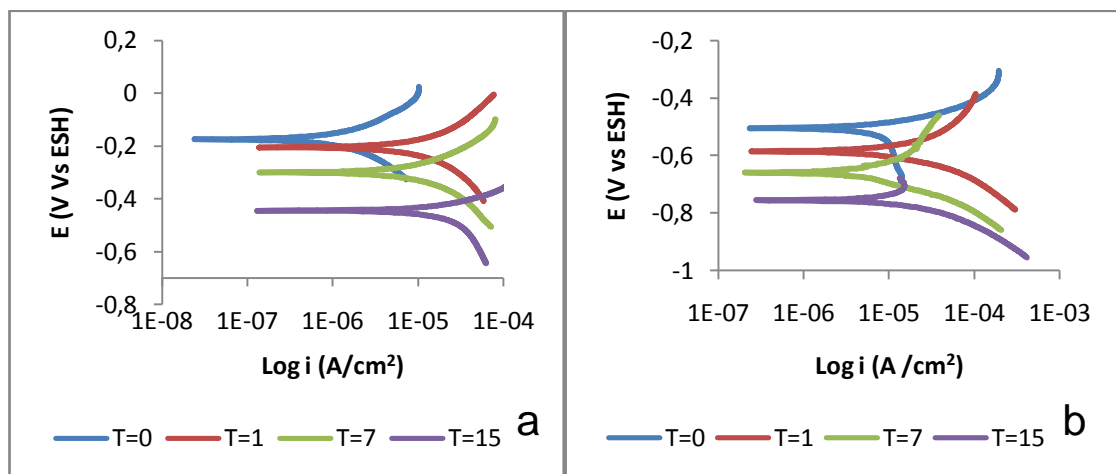
Parámetro	Ni-Cr Pasivación	Ni-Cr-WC 1° Pasivación	Ni-Cr-WC 2° Pasivación
$E_{pic}$	-0.2318 (V vs ESH)	-0.6223 (V vs ESH)	-0.2501 (V vs ESH)
$E_f$	-0.2390 (V vs ESH)	-0.6333 (V vs ESH)	-0.2526 (V vs ESH)
$E_{pp}$	-0.3380 (V vs ESH)	-0.7331 (V vs ESH)	-0.3669 (V vs ESH)
$i_{pass}$	$3.6111 \times 10^{-5}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$9.9049 \times 10^{-6}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$2.1008 \times 10^{-4}$ (A/cm <sup>2</sup> )
$i_{cric}$	$1.1277 \times 10^{-4}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$1.4897 \times 10^{-5}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$3.1571 \times 10^{-4}$ (A/cm <sup>2</sup> )

Fuente: Autores

#### 4.4.1.1 Extrapolación de Tafel

A partir de la curva potenciodinámica, tomando el rango de  $\pm 0.2V$  con respecto al potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), como se muestra en la figura 12 para cada uno de los recubrimientos. Se trazaron las correspondientes pendientes de Tafel catódicas y anódicas para cada uno de los tiempos y recubrimientos. El cálculo para la determinación de estos valores se siguió bajo la norma ASTM G-3-89 ver ANEXO G.

**Figura 12.** Curvas de extrapolación de Tafel a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC



Fuente: Autores

Los resultados obtenidos para la determinación de las pendientes de Tafel se exponen en las tablas 7 y 8. Se utilizó el método de regresión lineal debido al comportamiento lineal que muestra la ecuación 5, correspondientes a las ecuaciones de Tafel tanto anódicas como catódicas. Adicionalmente se puede ver que los factores de correlación ( $R^2$ ) son los adecuados para obtener las velocidades de corrosión.

**Tabla 7.** Ecuaciones catódicas y anódicas Ni-Cr

t (Días)	Catódica		Anódica	
	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>
0	$y = -0.0453x - 0.4682$	0.9931	$y = 0.0491x + 0.1429$	0.9981
1	$y = -0.2060x - 1.3216$	0.9997	$y = 0.1340x + 0.3904$	0.9999
7	$y = -0.4708x - 2.4002$	0.9997	$y = 0.0880x + 0.2633$	0.9986
15	$y = -0.6450x - 3.3560$	0.9997	$y = 0.1139x + 0.0937$	0.9995

Fuente: Autores

**Tabla 8.** Ecuaciones catódicas y anódicas Ni-Cr-WC

t (Días)	Catódica		Anódica	
	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>
0	$y = -0.0627x - 0.8522$	0.9920	$y = 0.0628x - 0.1756$	0.9994
1	$y = -0.0512x - 0.8596$	0.9997	$y = 0.0694x - 0.2244$	0.9981
7	$y = -0.1088x - 1.2204$	0.9991	$y = 0.1199x - 0.0226$	0.9890
15	$y = -0.0907x - 1.1974$	0.9981	$y = 0.0589x - 0.4407$	0.9935

Fuente: Autores

Posteriormente se determinaron las velocidades de corrosión para los recubrimientos estudiados, los cálculos obtenidos mediante la técnica de extrapolación de Tafel se realizaron como se muestra en el ANEXO H siguiendo los parámetros establecidos en la norma ASTM G-102-89. Los resultados de dichas velocidades para los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC se pueden ver en las tablas 9 y 10 respectivamente.

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 9, la cual corresponde al recubrimiento Ni-Cr, se puede decir que las velocidades de corrosión aumentan progresivamente a medida que aumenta el tiempo de inmersión, pasando de 0.0993 a 8.4145 mpy, para los 15 días de inmersión, lo que indica que su efectividad para resistir el medio agresivo en que se encuentra decrece lentamente, haciéndolo vulnerable al medio corrosivo, pero en consideración a su velocidad de corrosión se podría decir que el recubrimiento puede ser utilizado en ambientes que contengan cloruro de sodio.

**Tabla 9.** Velocidades de corrosión Ni-Cr por extrapolación de Tafel

t (Días)	$\beta_a$ (V)	$\beta_c$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (V vs ESH)	CR (mpy)
0	0.0491	-0.0453	$3.3611 \times 10^{-7}$	-0.1743	0.0993
1	0.1340	-0.2060	$9.2194 \times 10^{-6}$	-0.2049	2.7251
7	0.0880	-0.4708	$1.7121 \times 10^{-5}$	-0.3001	5.0607
15	0.1139	-0.6450	$2.8467 \times 10^{-5}$	-0.4443	8.4145

Fuente: Autores

**Tabla 10.** Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC por extrapolación de Tafel

t (Días)	$\beta_a$ (V)	$\beta_c$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (V vs ESH)	CR (mpy)
0	0.0628	-0.0627	$4.0622 \times 10^{-6}$	-0.5046	0.7790
1	0.0694	-0.0512	$5.4075 \times 10^{-6}$	-0.5852	1.0370
7	0.1199	-0.1088	$5.7885 \times 10^{-6}$	-0.6597	1.1101
15	0.0589	-0.0907	$8.7467 \times 10^{-6}$	-0.7555	1.6774

Fuente: Autores

Para el recubrimiento de Ni-Cr-WC las velocidades de corrosión aumentan a medida que se incrementa el tiempo de inmersión, pasando de 0.7790 a 1.6774 mpy, lo cual indica una gran estabilidad frente al electrolito de NaCl, ya que los carburos de tungsteno son el constituyente principal (70% del recubrimiento) y no son atacados por la solución electrolítica; los causantes del pequeño aumento de la velocidad de corrosión son los elementos restantes que componen el recubrimiento.

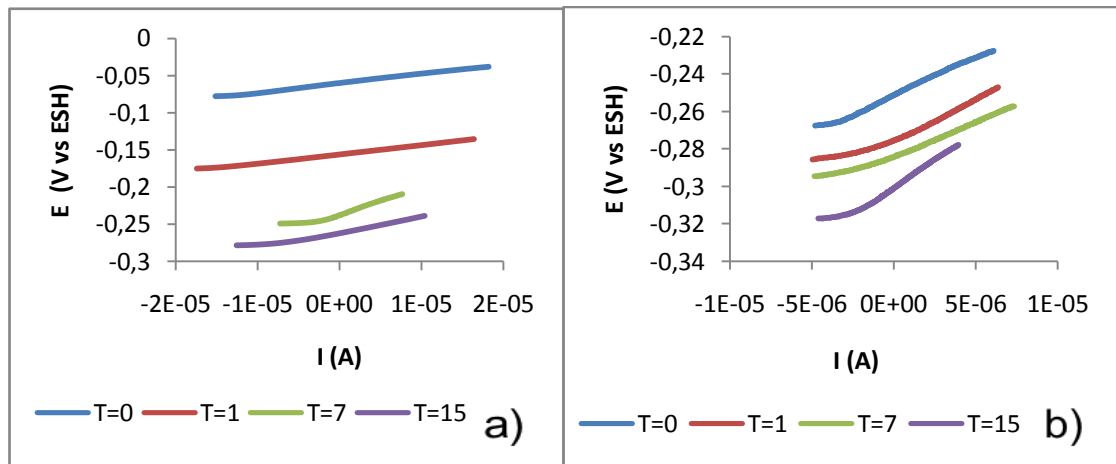
Comparando los resultados de las velocidades de corrosión de Ni-Cr y Ni-Cr-WC, se puede decir que a tiempo 0 de inmersión es más resistente el recubrimiento base Ni-Cr, pero a medida que aumenta el tiempo de inmersión se observa que el recubrimiento Ni-Cr-WC presenta menores velocidades de corrosión y mayor estabilidad con el transcurso del tiempo.

#### 4.4.2 Resistencia a la polarización lineal

En la figura 13 se presenta las curvas de polarización lineal del recubrimiento Ni-Cr y Ni-Cr-WC para los diferentes tiempos de inmersión, detallando en primera

medida que los potenciales de corrosión decrecen al aumentar los tiempos de exposición, como se había dado a conocer anteriormente en las curvas potenciodinámicas, la resistencia a la polarización es una medida que determina la facilidad con la que un material se oxida en un medio predeterminado. Debido a que una de las formas para determinar la eficiencia de una aleación metálica en cuanto a lo que se refiera a resistir un medio agresivo, es la velocidad de corrosión, se optó por calcularla de acuerdo a formulas matemáticas conocidas (ANEXO F).

**Figura 13.** Curvas de resistencia a la polarización a) Ni-Cr b) Ni-Cr-WC



Fuente: Autores

Al igual que por el método de extrapolación de Tafel, se corrobora que las velocidades de corrosión de los recubrimientos de Ni-Cr y Ni-Cr-WC, aumentan con el tiempo de estadía en el electrolito, pero en menor medida para los que contienen carburo de tungsteno, como se puede ver en las tablas 11 y 12.

Las resistencias para los recubrimientos que contienen WC son mayores, esto se ve reflejado en las mayores pendientes que presenta la gráfica y ocurre debido principalmente al carburo de tungsteno el cual no tiene una reacción electroquímica como se puede ver en los diagramas de Pourbaix (ANEXO D), el

cual según los diagramas no interactúa con ninguno de los elementos constituyentes del recubrimiento, es por esta razón que las velocidades de corrosión para este recubrimiento no cambian tan significativamente como si lo hacen las velocidades del recubrimiento Ni-Cr.

**Tabla 11.** Velocidades de corrosión Ni-Cr por resistencia a la polarización

t (Días)	Rp ( $\Omega$ )	$\beta_a$ (V)	$\beta_c$ (V)	B	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	CR (mpy)
0	1280	0.0491	-0.0453	0.0102	$7.9687 \times 10^{-6}$	2.3554
1	1800	0.1340	-0.2060	0.0352	$1.9555 \times 10^{-5}$	5.7802
7	1520	0.0880	-0.4708	0.0321	$2.1118 \times 10^{-5}$	6.2422
15	1908	0.1139	-0.6450	0.0420	$2.2012 \times 10^{-5}$	6.5064

Fuente: Autores

**Tabla 12.** Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC por resistencia a la polarización

t (Días)	Rp ( $\Omega$ )	$\beta_a$ (V)	$\beta_c$ (V)	B	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	CR (mpy)
0	5569	0.0628	-0.0627	0.0136	$2.4420 \times 10^{-6}$	0.4683
1	4123	0.0694	-0.0512	0.0127	$3.0580 \times 10^{-6}$	0.5864
7	3832	0.1199	-0.1088	0.0247	$6.4457 \times 10^{-6}$	1.2361
15	3400	0.0589	-0.0907	0.0155	$4.5588 \times 10^{-6}$	0.8743

Fuente: Autores

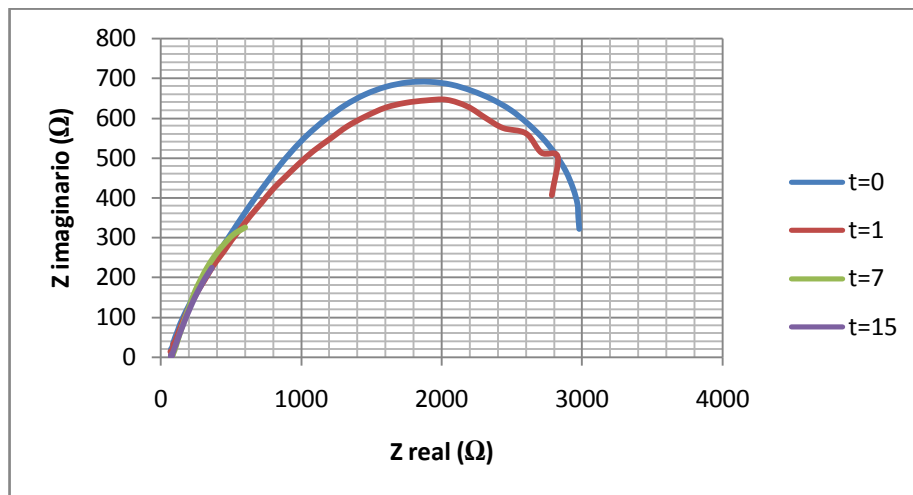
#### 4.4.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica

##### 4.4.3.1 Recubrimiento Ni-Cr

En la figura 14, se muestra el diagrama de Nyquist del espectro de impedancia para el recubrimiento Ni-Cr a los diferentes tiempos de exposición, como se puede observar, dichos diagramas tienen la misma tendencia; para tiempos mayores (7 y 15 días) los domos no se presentan completos y su resistencia es mucho menor. Los diámetros de los domos van disminuyendo a medida que aumenta el tiempo de inmersión, lo cual hace que el sistema sea más corrosivo porque hay una

mayor transferencia de carga en la interfase recubrimiento-electrolito, a su vez esto significa que la resistencia a la polarización de los recubrimientos decrece. Cuanto mayor sea la altura del domo, indica que tiene una mayor capacitancia, es decir, capacidad de almacenar carga eléctrica. A diferencia de la resistencia a la polarización lineal, en la prueba EIE se puede distinguir la resistencia de la solución con la resistencia a la polarización, de esta forma las velocidades de corrosión que se determinan son más precisas.

**Figura 14.** Diagramas de Nyquist del recubrimiento Ni-Cr

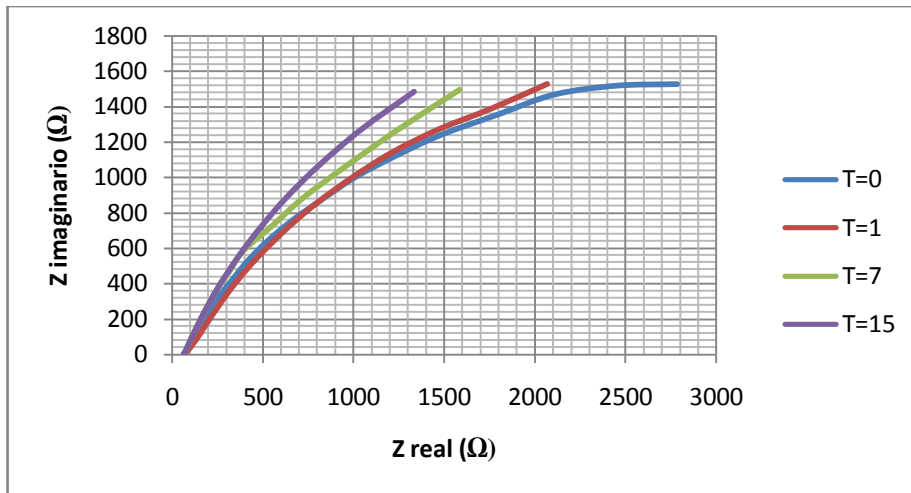


Fuente: Autores

#### 4.4.3.2 Recubrimiento Ni-Cr-WC

En la figura 15, se observa el diagrama de Nyquist del espectro de impedancia para el recubrimiento Ni-Cr-WC, donde se muestra una tendencia similar para los diferentes tiempos de inmersión, al igual que para el recubrimiento Ni-Cr, los domos no finalizan su recorrido a bajas frecuencias, debido a que la doble capa que interactúa en la interfase recubrimiento-electrolito la cual no permite el paso de la corriente hacia el recubrimiento.

**Figura 15.** Diagramas de Nyquist del recubrimiento Ni-Cr-WC



**Fuente:** Autores

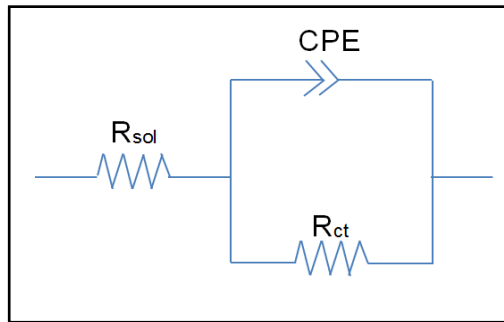
Se puede decir que el recubrimiento Ni-Cr-WC es más capacitivo, en términos generales debido a que su capacitancia alcanza mayores valores que el anterior, esto a su vez trae una mejor adhesión al sustrato y a la adición de carburos de tungsteno, lo que lo hace más compacto y con menor porosidad.

#### 4.4.3.3 Descripción del circuito equivalente propuesto

En el uso de circuitos eléctricos equivalentes para el análisis de datos de EIS es necesario considerar que suele existir un gran número de configuraciones de circuitos que pueden reproducir, con la misma precisión, la respuesta que se obtiene experimentalmente de un sistema real. [18]

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de impedancia electroquímica, se propuso el circuito equivalente de la Figura 16, donde se relaciona el comportamiento de la doble capa que se genera entre el recubrimiento y el electrolito, para todos los tiempos de inmersión (0, 1, 7 y 15 días). Para la simulación de los circuitos se utilizó el software SAI Z-View, los circuitos para cada uno de los tiempos es detallado en el ANEXO I.

**Figura 16.** Circuito equivalente de los recubrimientos



**Fuente:** Autores

El circuito que se presenta en la Figura 16 consta de una resistencia a la solución ( $R_{sol}$ ), la cual se encuentra en serie con dos elementos, los cuales a su vez se encuentran en paralelo entre sí, estos elementos son, una fase de elemento constante (CPE) originada por la capacitancia de la doble capa que se genera en la interfase del recubrimiento y solución electrolítica, esto se determina debido a que los valores de CPE-P tienden a un valor de  $0.5^{18}$ , y una resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ), la cual también se conoce como la resistencia a la polarización de la aleación, y está directamente relacionada con el proceso electroquímico de oxidación.

El circuito mostrado se adapta de buena forma a los resultados obtenidos en ambos recubrimientos, debido a que solo se presenta un domo, el cual representa el sistema más simple de una reacción Faradaica sobre un electrodo, con una capacitancia interfacial. [19]

A partir del circuito equivalente para los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC, se obtuvieron los valores de la resistencia a la transferencia de carga, con los cuales se determinó la densidad de corrosión y posteriormente su velocidad de corrosión, utilizando las mismas formulas matemáticas en la técnica de resistencia a la polarización lineal. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 13 y 14, en la cual se muestra la disminución de la resistencia a la polarización a medida que

aumenta el tiempo de exposición, y por ende el aumento de la velocidad de corrosión del recubrimiento.

**Tabla 13.** Velocidades de corrosión Ni-Cr a partir de EIE

t (Días)	Rp (Ω)	B	i <sub>corr</sub> (A/cm <sub>2</sub> )	CR (mpy)
0	3465	0.0102	2.9437 x 10 <sup>-6</sup>	0.8701
1	3395	0.0352	1.0368 x 10 <sup>-5</sup>	3.0646
7	2053	0.0321	1.6912 x 10 <sup>-5</sup>	4.9989
15	1898	0.0420	2.0457 x 10 <sup>-5</sup>	6.0468

Fuente: Autores

**Tabla 14.** Velocidades de corrosión Ni-Cr-WC a partir de EIE

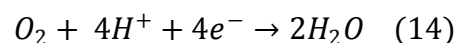
t (Días)	Rp (Ω)	B	i <sub>corr</sub> (A/cm <sub>2</sub> )	CR (mpy)
0	4750	0.0136	2.8631 x 10 <sup>-6</sup>	0.5491
1	4652	0.0127	2.7300 x 10 <sup>-6</sup>	0.5235
7	7543	0.0247	3.2745 x 10 <sup>-6</sup>	0.6280
15	6142	0.0155	2.5236 x 10 <sup>-6</sup>	0.4839

Fuente: Autores

#### 4.4.4 Voltamperometría cíclica

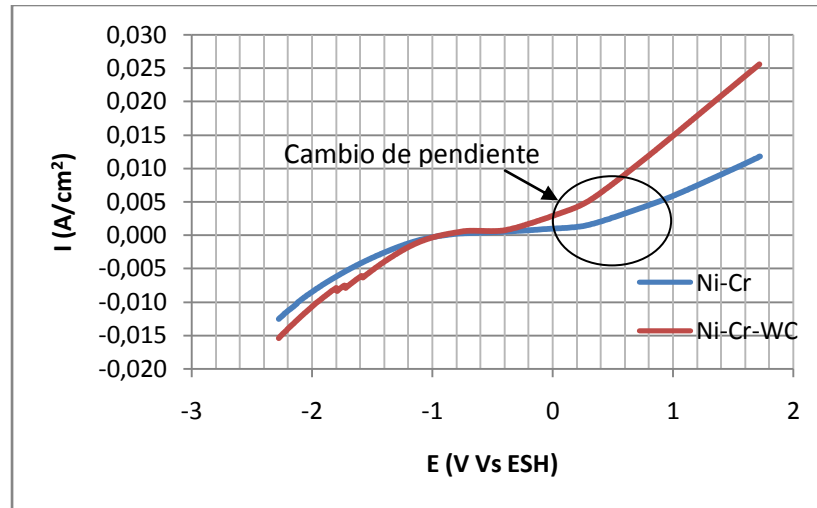
Los resultados de la prueba se encuentran en el ANEXO J, para llevar a cabo el análisis se realizó un aumento en la región en la cual se presentan los diferentes fenómenos que se le atribuyen a la corrosión como se observa en la figura 17. A partir de dicha figura se establece que la reacción de reducción, representada por las corrientes negativas, necesita una energía similar para empezar a ocurrir en ambos recubrimientos, esta energía es de aproximadamente -1 V; la reacción catódica se le atribuye a la evolución de hidrógeno. [13]

Las desviaciones en la curva catódica se deben a la presencia de oxígeno en el sistema, el cual se reduce de acuerdo a la siguiente reacción:



Las reacciones anódicas localizadas en la zona de corrientes positivas, están representadas por la disolución de los elementos que componen el recubrimiento, dichas reacciones no son reversibles ya que en las gráficas no se observa los picos característicos para reacciones reversibles.

**Figura 17.** Voltamperograma Ni-Cr y Ni-Cr-WC en estado de referencia



**Fuente:** Autores

Los cambios de pendiente en la zona anódica de la figura 17, se atribuyen a las reacciones de oxidación presente en el sistema, para el recubrimiento Ni-Cr y Ni-Cr-WC, se puede ver un primer cambio de pendiente debido posiblemente a la oxidación del Fe, el cual tiene un potencial de  $-0.445\text{ V}$  [4] para su oxidación, la segunda pendiente se atribuye a la oxidación de Ni ya que presenta un potencial de oxidación de  $-0.25\text{ V}$  [4], los valores no coinciden exactamente debido a que estos están registrados en la literatura para condiciones estándares, mientras que en el proceso de corrosión las condiciones son diferentes. Comparando ambos recubrimientos, las velocidades a las cuales ocurren las reacciones de oxidación son mayores para el recubrimiento Ni-Cr-WC, debido a que presenta mayor valor en sus pendientes. En este ensayo electroquímico no se presentó una gran variación en las curvas tanto para los diferentes tiempos de inmersión como para ambos recubrimientos.

## 5. CONCLUSIONES

- Los valores de velocidad de corrosión obtenidas por las técnicas de resistencia a la polarización, curva potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica, para el recubrimiento Ni-Cr se encuentra en un rango de 6.5 a 8.5 mpy, y para Ni-Cr-WC en un rango de 0.5 a 1.6 mpy, lo cual significa una mayor resistencia a la corrosión para el segundo recubrimiento.
- En comparación con el sustrato Acero SAE-AISI 1015, el cual tiene una velocidad de corrosión superior a los 200 mpy, se determina que los recubrimientos presentan una menor velocidad de corrosión, lo cual establece que son más resistentes al medio corrosivo de NaCl.
- La morfología de daño para la superficie de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC, muestra la presencia de corrosión uniforme para los días 0,1,7 y debido al rompimiento del recubrimiento a los 15 días de inmersión, se presenta un daño por corrosión de par galvánico entre el metal base y el recubrimiento.
- La película de óxido formada sobre la superficie de los recubrimientos es porosa e inestable, aunque al principio actuó como capa protectora, debido a la inestabilidad no es muy adherente, lo cual conlleva a que continúe el proceso de corrosión sobre la superficie de los recubrimientos.
- El circuito eléctrico equivalente para la interfase recubrimiento-solución electrolítica que se estableció, está acorde para el recubrimiento de Ni-Cr y Ni-Cr-WC, el cual está representado por dos resistencias y un elemento de fase constante, el cual representa la capacitancia de la doble capa en la interfase.

- De acuerdo a los resultados obtenidos, se determina que es óptimo utilizar los recubrimientos estudiados, ya que proporcionan la protección necesaria para las aplicaciones de estructuras metálicas enterradas en ambientes marítimos con contenidos de cloruro de sodio, debido a las bajas velocidades de corrosión que presentan.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Realizar una evaluación de los recubrimientos, en un sistema hidrodinámico, ya que en algunas aplicaciones, el medio corrosivo con que está en contacto se encuentra en movimiento, lo que afecta el daño debido a la corrosión.
- Someter los recubrimientos a una evaluación, donde el medio corrosivo se encuentre expuesto a variaciones de temperatura, debido a que el recubrimiento puede estar sometido en aplicaciones a condiciones climáticas diferentes a las estudiadas.
- Analizar el recubrimiento para diferentes electrolitos, y a diferentes concentraciones, con el fin de determinar en cual ambiente presenta mejores rangos de trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

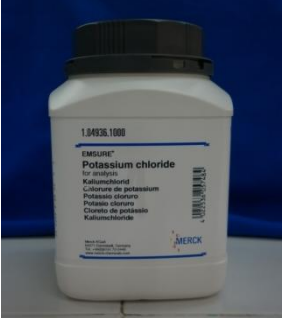
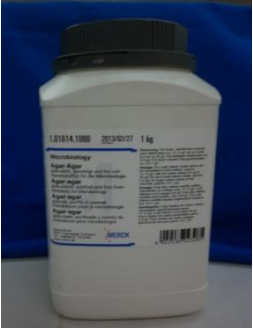

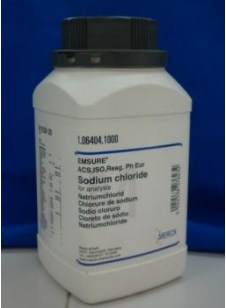
- [1] SITES George A. Plasma At Work. 1° Edición. Edit. Publisher - G. A. Sites Books. 2007
- [2] GOMÉZ DE LEÓN Félix Ceséreo. Tecnología del mantenimiento industrial. 1° Edición Edit. Universidad de Murcia: Servicio de Publicaciones. España. 1998.
- [3] PROYECCIÓN TÉRMICA PARA MATRICES (03/07/2008) Informe del AIMME - Instituto Tecnológico Metalmecánico. Disponible en internet: [http://observatorio.aimme.es/otea\\_document.asp?id=4987&n=1](http://observatorio.aimme.es/otea_document.asp?id=4987&n=1)
- [4] JONES, Denny A. Principles and prevention of corrosion. 2° Edition. Edit, Prntice-Hall. USA 1996.
- [5] VILA CASADO, Gustavo. Corrosión, electroquímica, mecanismos y métodos de control. Bogotá, 1989.
- [6] VÁZQUEZ VAAMONDE Alfonso J. DE DAMBORENEA GONZÁLEZ Juan. Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. 1° Edición, Edit. CSIC Raycar. España. 2001.
- [7] FERRER GIMÉNEZ Carlos, AMIGÓ BORRÁS Vicente. Tecnología de materiales. Edit. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2003.
- [8] AHMAD Zaki. Princliples of corrosion engineering and corrosion control. 1° Edición. Edit. IChem. Gran Bretaña. 2006.
- [9] MANTELL C. L. Electrochemical Engineering, 4° Edición. Edit. Reverté, USA 1980.
- [10] BARD, Allen. FAULKNER, Larry. Electrochemical methods fundamentals and applications. 2° Edition. Edit, John wiley& sons, Inc. USA. 2001
- [11] BRETT, Christopher M. A. OLIVEIRA BRETT Ana María. Electrochemistry Principles, Methods, and Applications. 1° Edition. Edit. Oxford University Press. GranBretaña. 1993
- [12] BOCKRIS, John O'M. REDDY, Amulya K.N. Modern Electrochemistry 2° Edition. Edit. Kluwer academic publishers. USA 2002

- [13] BOND A.M. Broadening Electrochemical Horizons, Principles and illustration of Voltammetric and Related Techniques. 1° Edition. Edit. Oxford University Press. USA 2002
- [14] SAWYER, Donald T. SOBKOWIAK, Andrzej. ROBERTS, Julian L. Electrochemistry for chemists. 2° Edition. Edit. John Wiley & Sons, Inc. USA 1995
- [15] RIEGER, Philip H. Electrochemistry. 2° Edition. Edit. Chapman & Hall. USA 1994
- [16] DIMATÉ CASTELLANOS Laura Marcela. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de Colombia. 2011.
- [17] GÓMEZ GARCÍA J. Tesis: "Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica mediante espectroscopia de impedancia electroquímica". 2009. Disponible en internet: <http://tecnoatocha.wordpress.com/tecnicas-de-proyeccion/>
- [18] VAZQUÉZ GUTIÉRREZ, José Luis. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales. ESPAÑA. Universidad Politécnica de Valencia. 2007
- [19] MENDOZA FLORES, Juan. DURÁN ROMERO, Rubén. Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. (En línea). Mexico. Instituto mexicano del petróleo – Facultad de química UNAM. [Consultado Marzo 25, 2012], Disponible en: <http://depa.pquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>.
- [20] MEAS Yuni. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión. Centro de investigación y desarrollo en electroquímica. México.
- [21] CORTÉS MÉNDEZ Adrián, GUERRERO MATA Martha Patricia, MARTÍNEZ DELGADO Dora Irma. Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones para oleoductos. 2005.

- [22] HER-HSIUNG HUANG. Surface characterization of passive film on NiCr-based dental casting alloys (2002).
- [23] T.S. SIDHU , S. PRAKASH, R.D. AGRAWAL. Characterisation of NiCr wire coatings on Ni- and Fe-based superalloys by the HVOF process. (2005).
- [24] OU XUE-MEI, SUN ZHI, SUN MIN, ZOU DUAN-LIAN. Hot-corrosion mechanism of Ni-Cr coatings at 650 °C under different simulated corrosion conditions (2008).
- [25] C.D ARRIETA-GONZÁLEZ, J. PORCAYO-CALDERÓN, V.M. SALINAS-BRAVO, J.G. CHACÓN-NAVA, J.G. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ. Resistencia a la corrosión por picaduras de recubrimientos base NiCr en ambientes ricos en cloruros. (2008).
- [26] SRINIVASA B. Rao, RAMESH Chowdhary. Evaluation on the Corrosion of the Three Ni-Cr Alloys with Different Composition (2010).
- [27] O. RIESGO, S.M. VÁZQUEZ Y G.S. DUFFÓ. Efecto del galio sobre la susceptibilidad a la corrosión de una aleación Ni-Cr de uso dental. (1996).
- [28] Demetrios M. Sarantopoulos, Kelly A. Beck, Robert Holsen, y David W. Berzins. Corrosion of CoCr and NiCr dental alloys alloyed with palladium (2008).
- [29] CARRANZA, Ricardo M. REBAK Raúl B. RODRÍGUEZ, Martín A. Corrosión de la aleación C-22 en medio conteniendo fluoruros y cloruros. (2004)
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-03.
- [31] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM G3-89 (Reapproved 2010).
- [32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM G5- 94 (Reapproved 2004).

- [33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals ASTM G31 – 72 (Reapproved 2004).
- [34] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM G59 – 97 (Reapproved 2009).
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys ASTM G61 – 86 (Reapproved 2009).
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. G102 – 89 (Reapproved 2010).
- [37] METALS HANDBOOK ASM. Volume 3. Alloy Phase Diagrams. 1992
- [38] METALS HANDBOOK ASM. Volume 13. Corrosion. 1982
- [39] METALS HANDBOOK ASM. Volume 13A. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. 1987
- [40] Wei-Min Zhao<sup>a</sup>, Yong Wang<sup>b</sup>, Tao Han<sup>b</sup>, Kai-Yuan Wu<sup>b</sup>, Jin Xue<sup>a</sup>. Electrochemical evaluation of corrosion resistance of NiCrBSi coatings deposited by HVOF (2003).
- [41] C.T. Kwok, H.C. Man, F.T. Cheng. Cavitation erosion–corrosion behaviour of laser surface alloyed AISI 1050 mild steel using NiCrSiB. (2000)

## ANEXO A. REACTIVOS, MATERIALES Y EQUIPOS

TIPO	REACTIVOS	APLICACIÓN
<p><b>Cloruro de Potasio (KCl)</b></p> 		<p>Formación del puente salino</p>
<p><b>Solucion Agar-Agar</b></p> 		<p>Para realizar el tubo Luggin</p>
<p><b>Etanol</b></p> 		<p>Limpieza de las probetas</p>
<p><b>Cloruro de Sodio</b></p> 		<p>Para realizar la solución electrolítica</p>

## MATERIALES Y EQUIPOS

### Electrodos y Tubo Luggin



1. Electrodo de Ag/AgCl
2. Tubo Luggin
3. Electrodo auxiliar de grafito

### Balanza



Medir el peso para al preparación de las soluciones

### Plancha de calentamiento y agitación



#### Preparación

- Agar-Agar
- Solución electrolítica
- Solución puente salino

### Baño ultrasonido



Limpieza ultrasónica de las probetas

**Celda Electrolytica**



Montaje para las pruebas electroquímicas

**Jaula de Faraday**



Para evitar cualquier interferencia electromagnética.

**Potenciostato –Galvanostato**



Medición electroquímica de la corrosión


**pH metro**



Medir el pH de la solución electrolítica

## ANEXO B. CARACTERISTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS

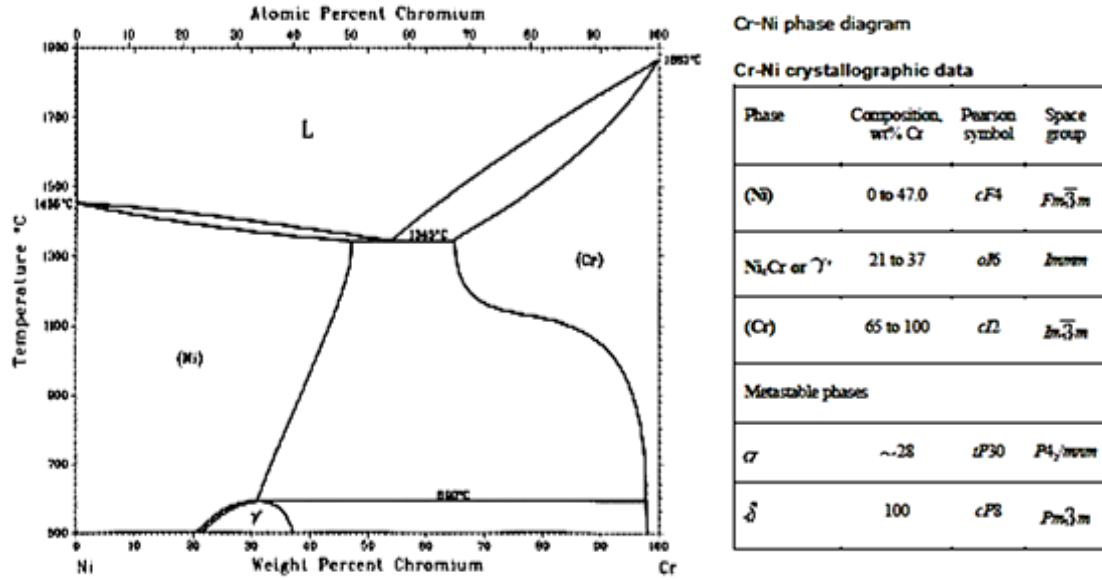
### Composición de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC

 M A T E R I A L   S A F E T Y   D A T A   S H E E T			
Section I - IDENTIFICATION			
Eutectic Canada Inc. 428 Aimé-Vincent Vaudreuil-Dorion, Québec J7V 5V5 Telephone: (514) 695-7500			
Product Name	<b>MetaCeram 29021</b>		
AWS Standard Terminology	Thermal Spray Powder		
WHMIS Classification	D-2A Serious Toxic Effects D-2B Other Toxic Effects		
Transport Of Dangerous Goods	Not applicable		
Section II - HAZARDOUS INGREDIENTS			
Ingredients	Range wt%	CAS number	Exposure Limit (mg/m <sup>3</sup> )
Nickel, elemental	60-100	7440-02-0	1
Chromium, elemental	10-15	7440-47-3	0.5
Iron, elemental	1-5	7439-89-6	5 (fumes)
Silicon, elemental	1-5	7440-21-3	10
Boron, elemental	1-5	7440-42-8	10
Aluminum, elemental	1-5	7429-90-5	10
Carbon, elemental	0.1-1	7440-44-0	Not listed

===== Section I - IDENTIFICATION =====			
Eutectic Canada Inc. 428 Aime-Vincent Vaudreuil-Dorion, Quebec J7V 5V5			
Emergency Telephone:	(514) 695-7500		
Product Name:	TungTec 10112		
AWS standard terminology:	Thermal Spray Powder		
WHMIS Classification:	D-2A Serious Toxic Effects D-2B Other Toxic Effects		
Transport of Dangerous Goods:	Not Applicable		
===== Section II - HAZARDOUS INGREDIENTS =====			
Ingredient	Range wt%	CAS Number	Exposure Limit mg/m <sup>3</sup>
Tungsten carbide	60-100	10270-12-1	5
Nickel, elemental	15-40	7440-02-0	1 (fume)
Boron, elemental	5-10	7440-42-8	10
Silicon, elemental	1-5	7440-21-3	10
Iron, elemental	1-5	7439-89-6	5 (fume)
Chromium, elemental	5-10	7440-47-3	0.5

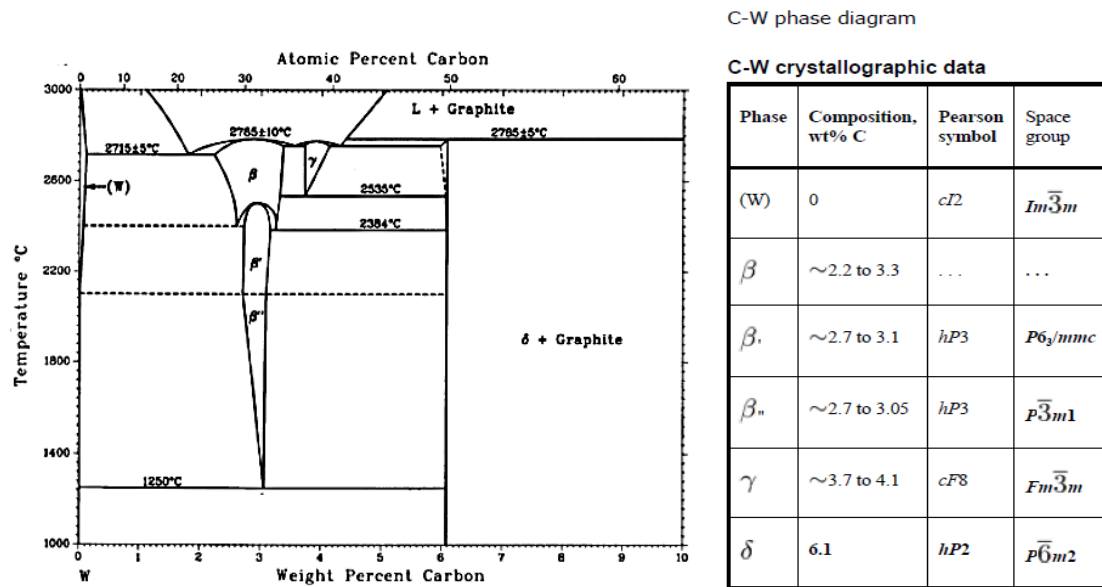
## ANEXO C. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

- **Figura C-1.** Diagrama de equilibrio de Ni-Cr



Fuente: ASM Metals Handbook, Vol. 3 [27]

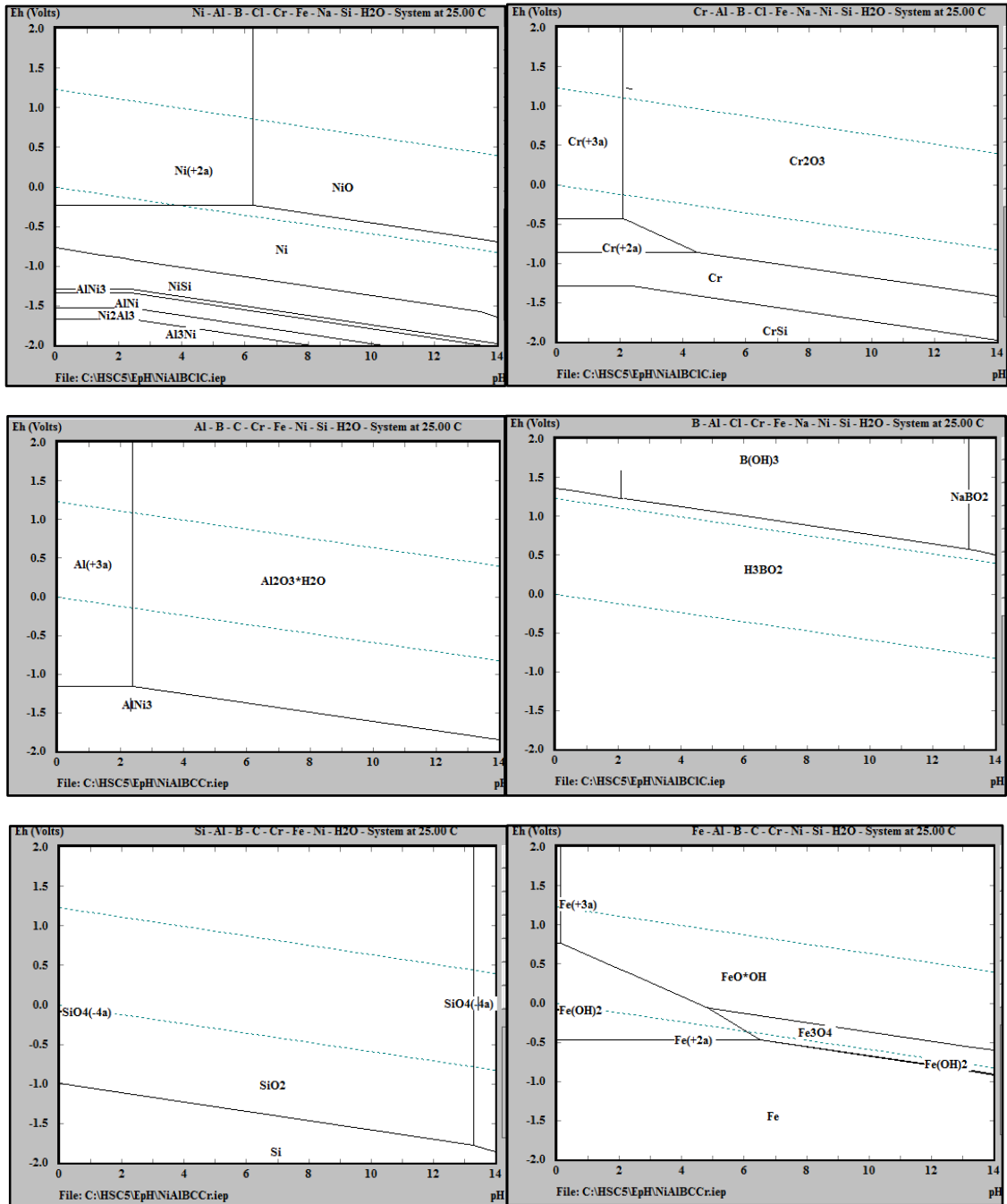
- **Figura C-2.** Diagrama de equilibrio de W-C



Fuente: Fuente: ASM Metals Handbook, Vol. 3 [27]

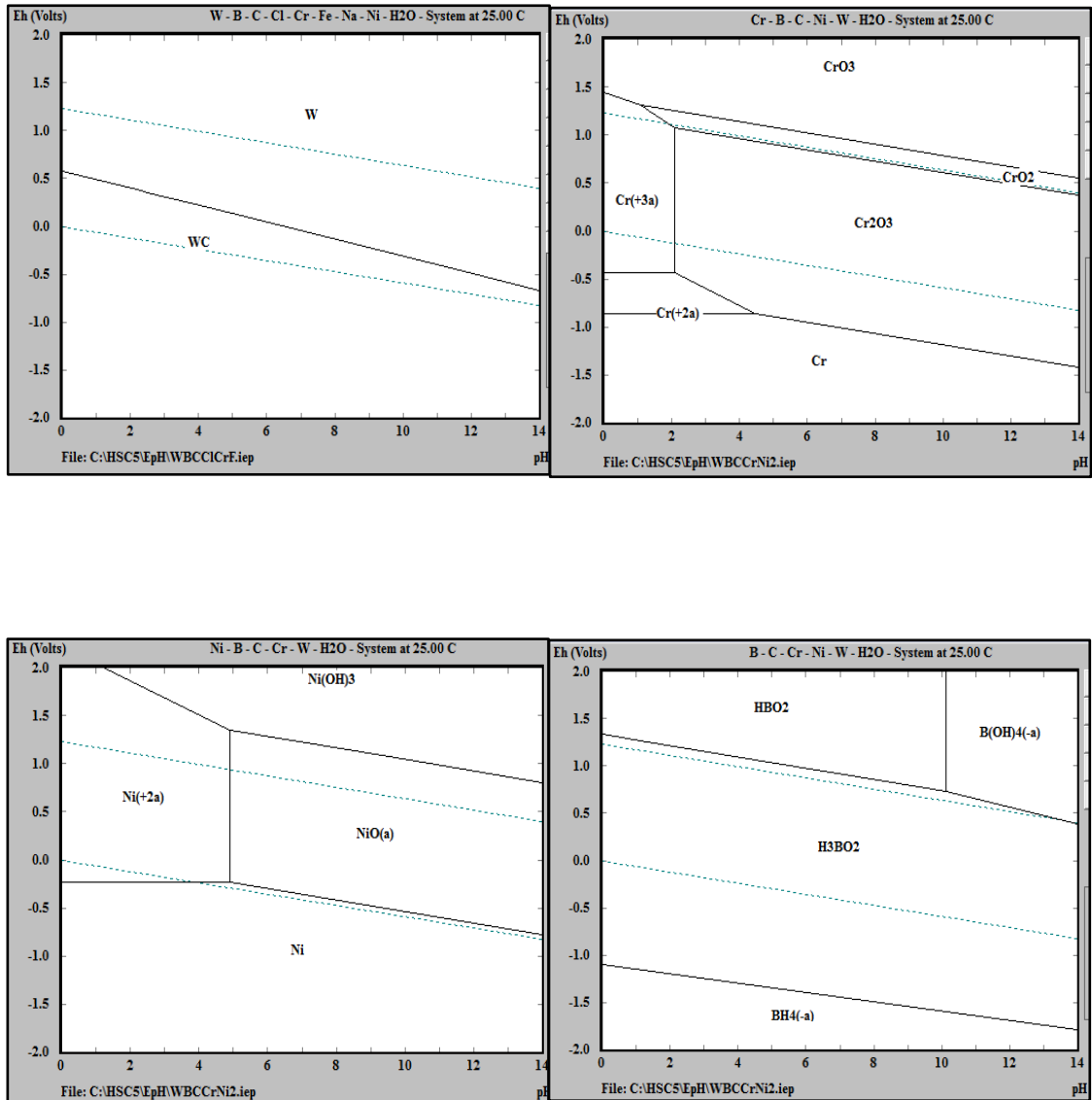
## ANEXO D. DIAGRAMAS DE POURBAIX

- **Figura D-1.** Diagrama de Pourbaix de Ni-Cr.
  - a) Ni b) Cr c) Al d) B e) Si f) Fe



Fuente: Software HSC. Universidad Industrial de Santander

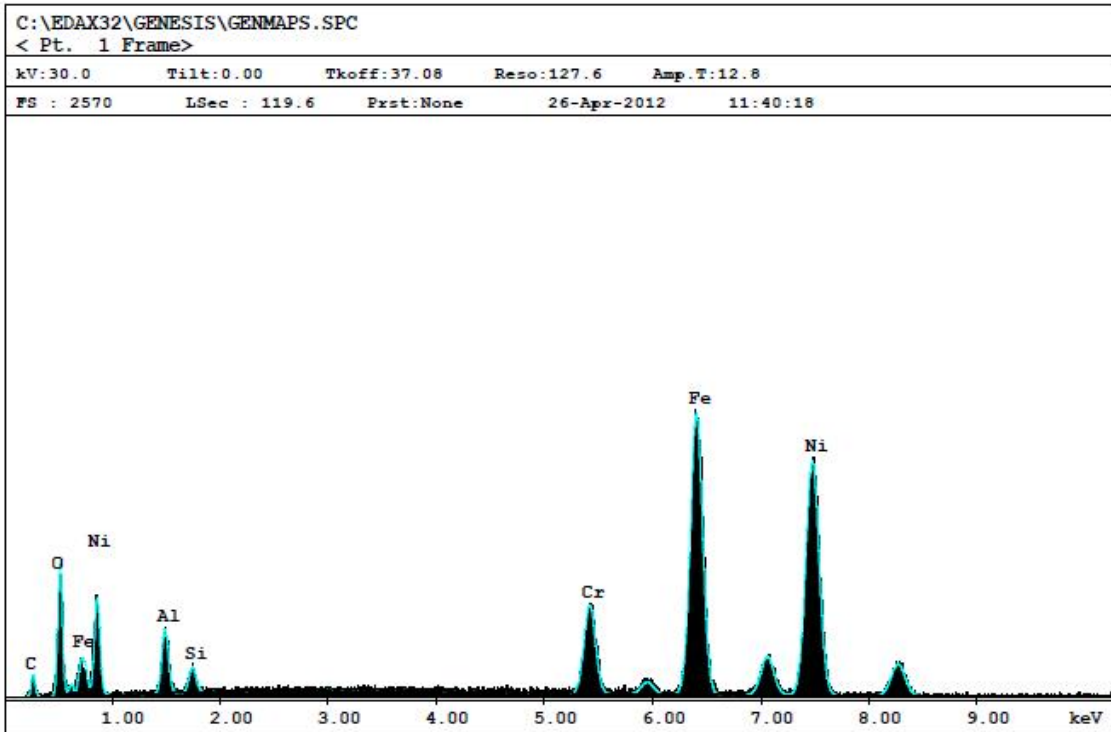
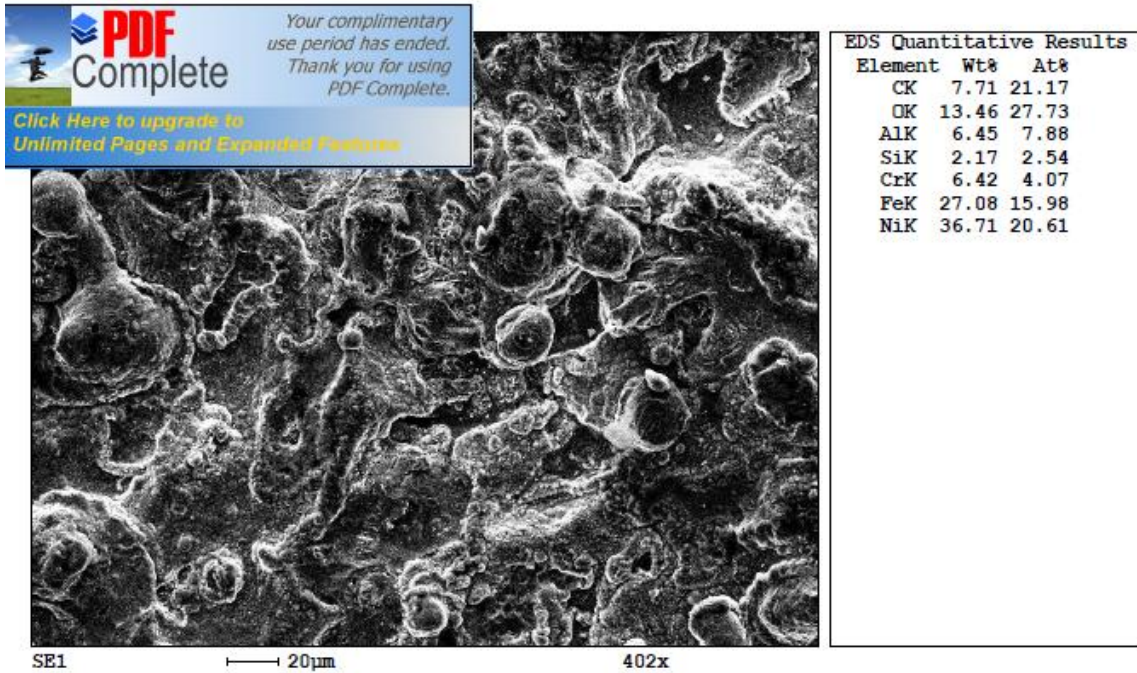
- **Figura D-2.** Diagrama de Pourbaix del Cr-Ni-WC.
  - WC
  - Cr
  - Ni
  - Fe



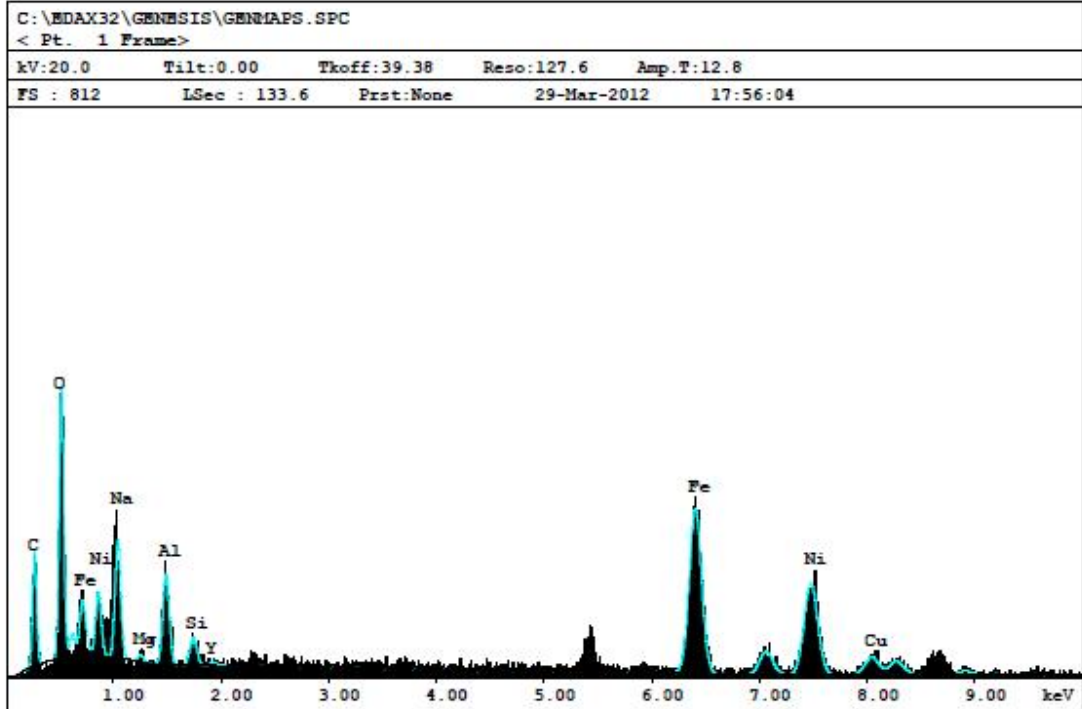
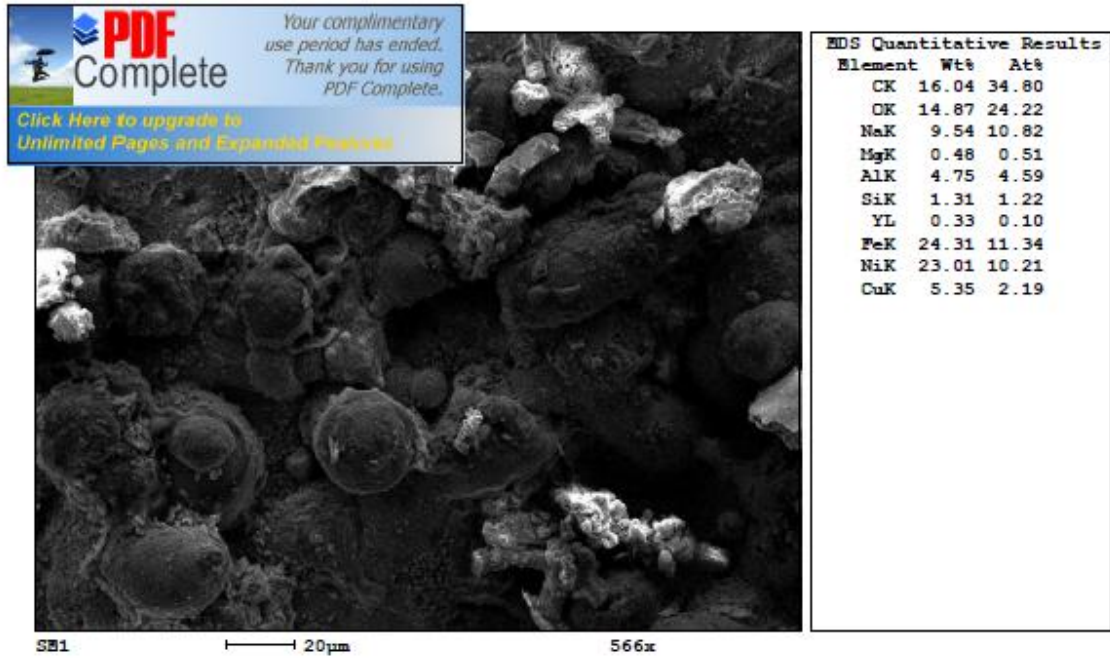
Fuente: Software HSC. Universidad Industrial de Santander

## ANEXO E. ANÁLISIS SEM EDX

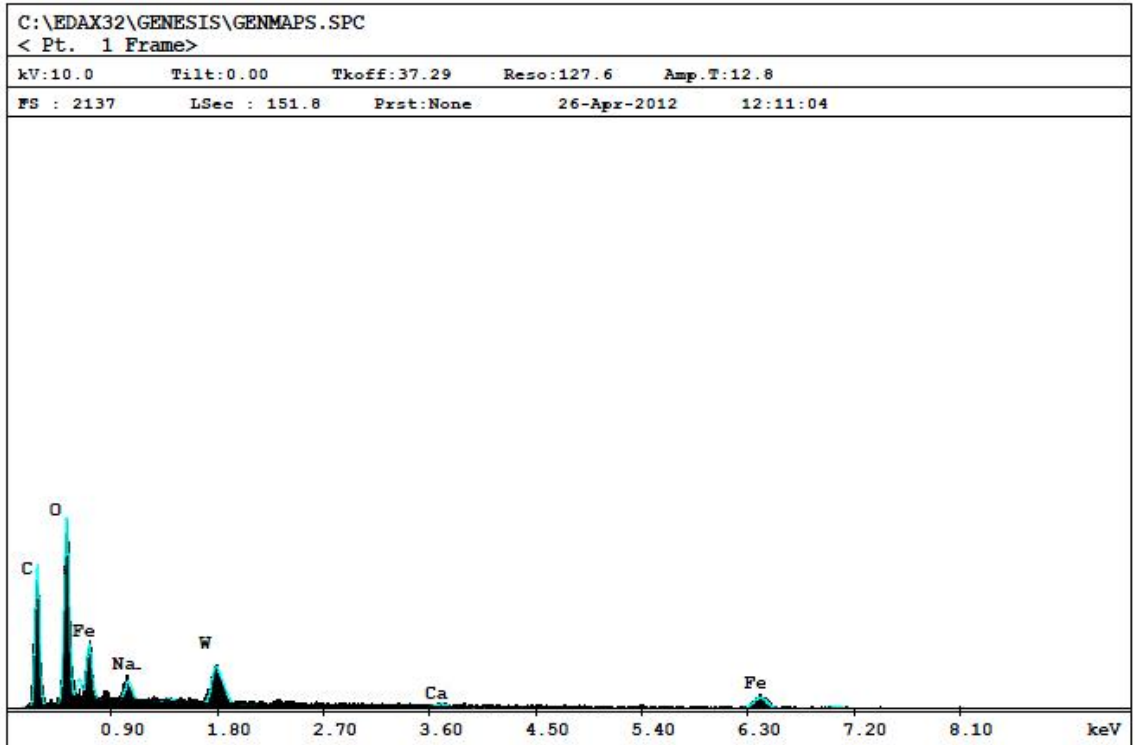
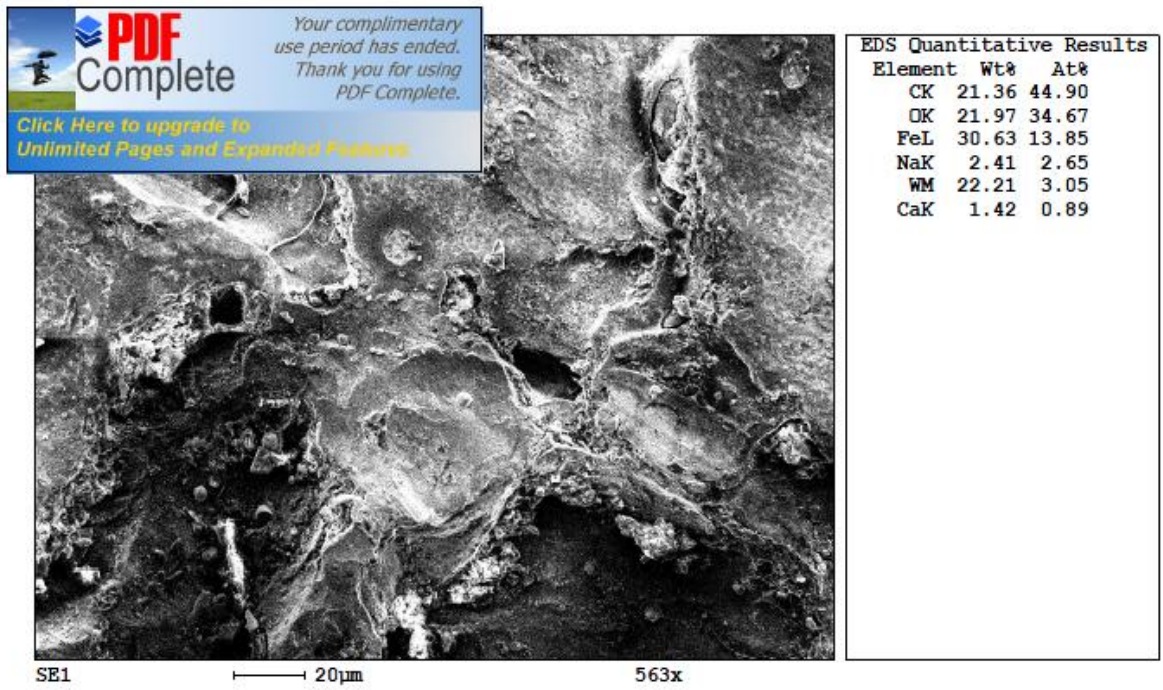
- **Figura E-1.** Recubrimiento Ni-Cr tiempo=0



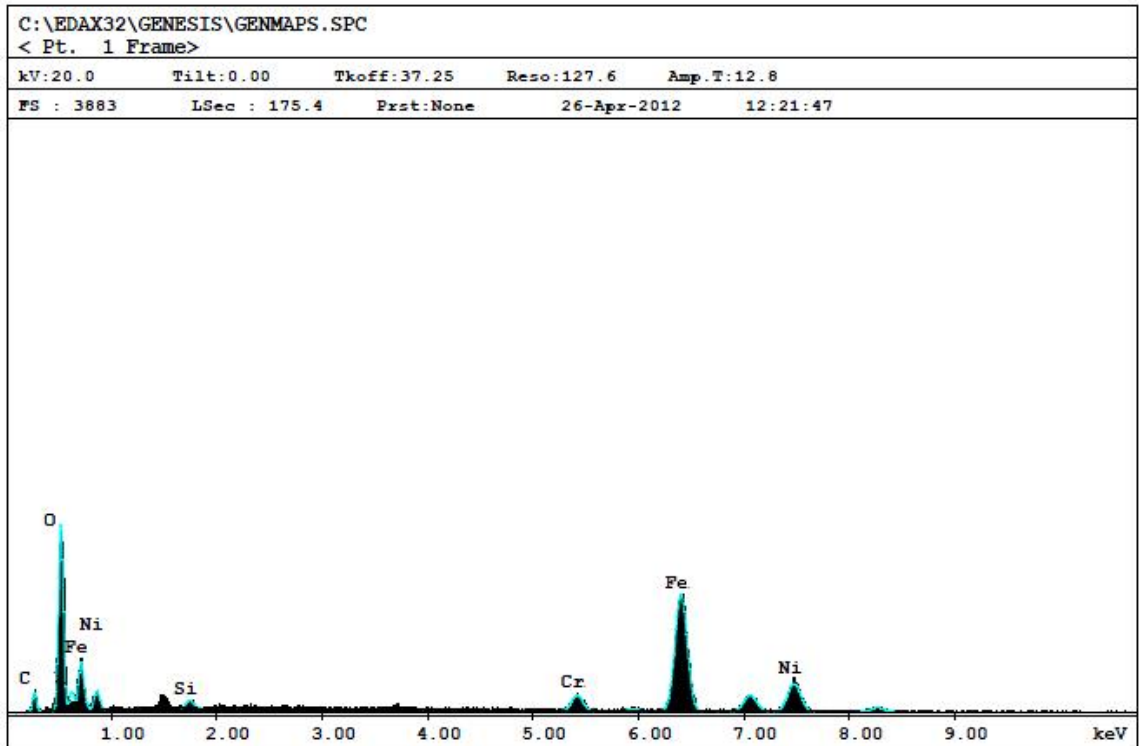
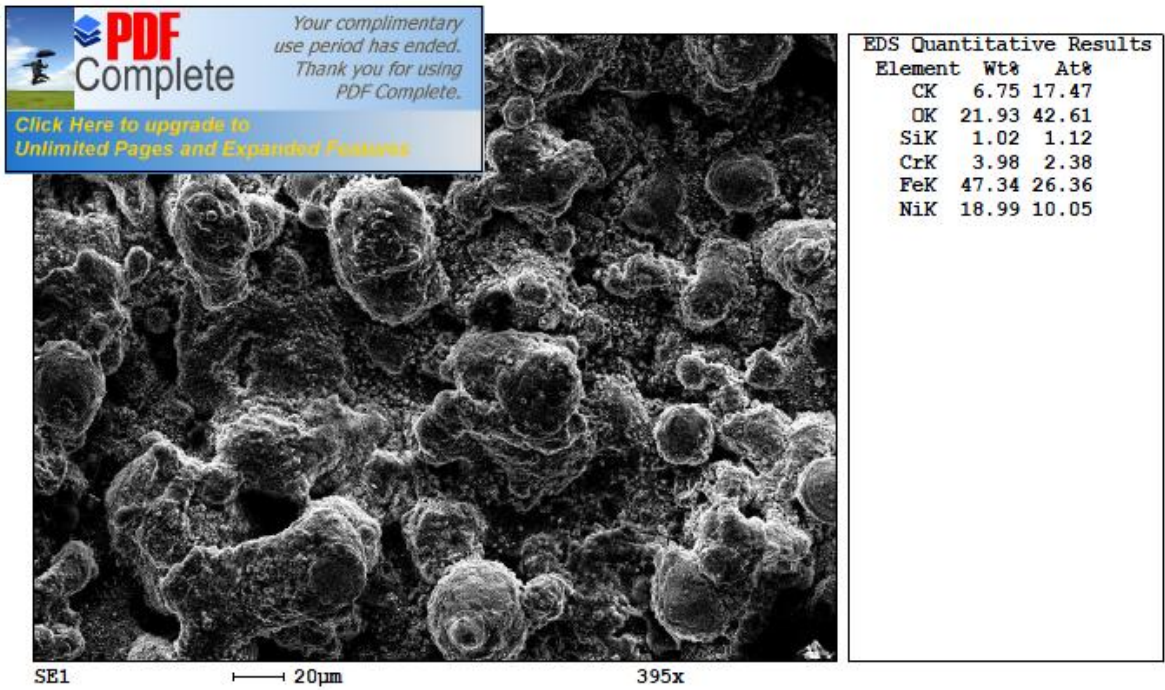
- Figura E-2. Recubrimiento Ni-Cr tiempo=15 días.



- **Figura E-3.** Recubrimiento Ni-Cr-WC tiempo=0 días.

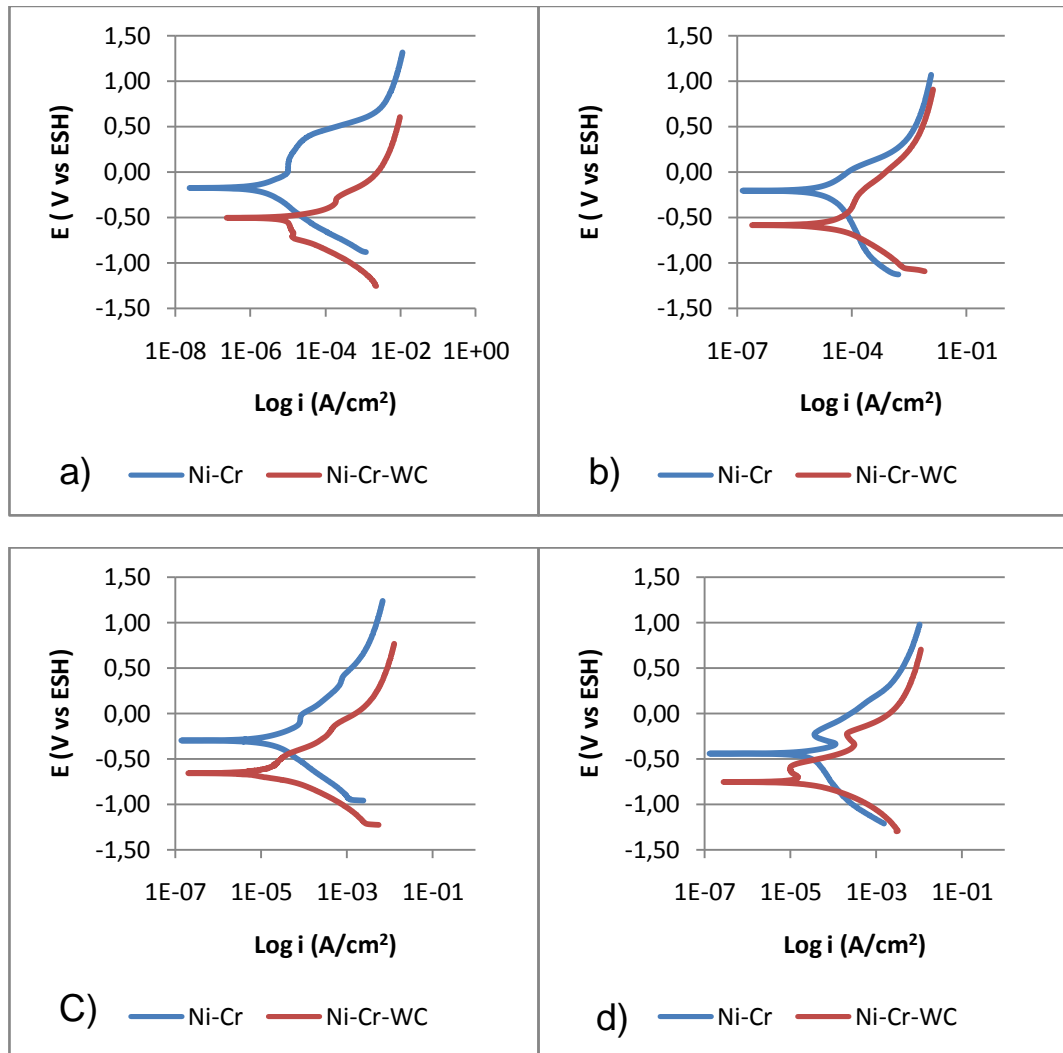


- **Figura E-4.** Recubrimiento Ni-Cr-WC tiempo=15 días.



## ANEXO F. CURVAS POTENCIODINÁMICA PARA LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr y Ni-Cr-WC

Figura F-1. Curvas potenciaodinámicas a) t=0 b) t=1 c) t=7 d) t=15

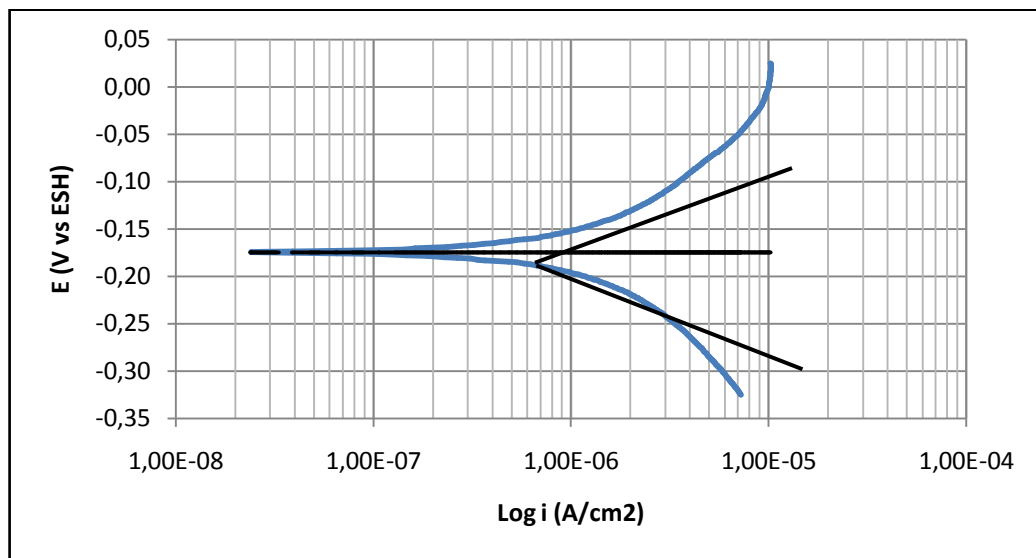


Fuente: Autores

## ANEXO G. MÉTODO PARA DETERMINAR LAS PENDIENTES ANÓDICAS Y CATÓDICAS A PARTIR DE LA CURVA DE TAFEL

Para detallar el método utilizado para determinar las pendientes anódicas y catódicas a partir de las curvas de Tafel, se hace uso de la curva de Ni-Cr a tiempo 0 de exposición ver Figura E-1.

**Figura G-1.** Pendientes de Tafel Ni-Cr para  $t=0$



Fuente: Autores

Inicialmente se calcula el valor del potencial de corrosión a partir de los datos obtenidos, para esto se promedian los valores en el cambio de signo de la corriente.

**Tabla G-1.** Datos de corriente y potencial

$i$ (A/cm <sup>2</sup> )	E (V vsESH)
-6.53E-08	-0.1757
-2.41E-08	-0.1748
3.90E-08	-0.1740
6.52E-08	-0.1732

Fuente: Autores

$$E_{corr} = \frac{-0.1757 - 0.1748 - 0.1740 - 0.1732}{4} = -0.1744 \text{ (V vs ESH)}$$

Una vez determinado este valor se tomaron 10 valores, que pertenecieran en la parte recta de la curva, tanto de la zona anódica como para la zona catódica, a partir de estos datos se realiza una regresión lineal para determinar las pendientes de tafel anódica y catódica.

**Tabla G-2.** Valores utilizados para la determinación de las pendientes de tafel

Catódica			Anódica		
<i>i</i> (A/cm <sup>2</sup> )	Log <i>i</i>	E (V ESH)	<i>i</i> (A/cm <sup>2</sup> )	Log <i>i</i>	E (V ESH)
-1.05E-06	-5.9798	-0.1976	7.90E-07	-6.1026	-0.1568
-1.01E-06	-5.9962	-0.1966	8.34E-07	-6.0789	-0.1558
-9.79E-07	-6.0093	-0.1956	8.81E-07	-6.0552	-0.1548
-9.27E-07	-6.0328	-0.1946	9.22E-07	-6.0350	-0.1538
-8.84E-07	-6.0536	-0.1936	9.68E-07	-6.0140	-0.1528
-8.39E-07	-6.0765	-0.1926	1.02E-06	-5.9928	-0.1518
-7.98E-07	-6.0979	-0.1916	1.06E-06	-5.9732	-0.1508
-7.58E-07	-6.1203	-0.1906	1.11E-06	-5.9546	-0.1498
-7.03E-07	-6.1533	-0.1896	1.15E-06	-5.9380	-0.1488
-6.72E-07	-6.1726	-0.1886	1.20E-06	-5.9191	-0.1478

Fuente: Autores

A partir de los datos de Log *i* y E se obtienen las siguientes ecuaciones mediante la técnica de regresión lineal por mínimos cuadrados.

$$\text{Catódica} \quad y = -0.0453x - 0.4682$$

$$\text{Anódica} \quad y = 0.0491x + 0.1429$$

De esta forma obtiene que  $\beta_c = -0.0453$  y  $\beta_a = 0.0491$

Adicionalmente mediante esta técnica también es posible determinar la densidad de corriente de corrosión, lo cual se logra en el momento en que los potenciales anódicos y catódicos son iguales, esta situación se da en el igualando las ecuaciones catódica y anódica.

$$-0.0453X - 0.4682 = 0.0491X + 0.1429$$

$$\text{Log } i_{corr} = X = -6.4735$$

Finalmente se toma el antilogaritmo para determinar la densidad e corriente, la cual es una medida representativa de la velocidad de corrosión.

$$i_{corr} = 3.3611 \times 10^{-7} \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

## ANEXO H. MÉTODO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Estos métodos se basan en las leyes de Faraday, la cual relaciona la densidad de corriente con la velocidad que ocurre algún fenómeno electroquímico.

Para dicho procedimiento se utiliza la siguiente ecuación

$$CR = K \times \frac{i_{corr} * Ew}{\rho}$$

Donde:

CR: Velocidad de corrosión

K: Representa una constante de proporcionalidad = 0.1288 (mpy)

$i_{corr}$ : Densidad de corriente ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

Ew: Peso equivalente (g)

$\rho$ : Densidad del material ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Debido a que el material de trabajo son aleaciones el peso equivalente se determina de la siguiente manera, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G-102-89.

$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i}$$

n: número de electrones que se transfieren

f: Fracción del elemento en la aleación

W: Peso atómico del elemento

a) Ni-Cr (Ni70%, Cr17%, Fe 4%, Si 4%, B 4%, Al 4%)

$$Q = \frac{2 * 0.7}{58.710} + \frac{3 * 0.13}{51.996} + \frac{2 * 0.04}{55.845} + \frac{4 * 0.04}{28.085} + \frac{3 * 0.04}{10.811} + \frac{3 * 0.04}{26.981} = 0.0540$$

$$Ew = \frac{1}{Q} = \frac{1}{0.0540} = 18.5185$$

b) Ni-Cr-WC

$$Q = \frac{2 * 0.6}{58.710} + \frac{3 * 0.166}{51.996} + \frac{3 * 0.166}{10.811} + \frac{4 * 0.033}{28.085} + \frac{2 * 0.033}{55.845} = 0.0819$$

$$E_w = \frac{1}{Q} = \frac{1}{0.0819} = 12.2100$$

Debido a datos encontrados en la recopilación bibliográfica la densidad para la aleación que contienen níquel, cromo, hierro y otros elementos, debido a su similar peso se tomo una densidad aproximadamente  $8.2 \text{ g/cm}^3$  [4].

### 1. *Extrapolación de Tafel*

Mediante esta técnica se encontraron las densidades de corrosión de las diferentes aleaciones, en los diferentes tiempos de exposición al electrolito, para determinar la velocidad se tomaron los datos obtenidos para la aleación Ni-Cr a 0 días de exposición.

$$CR = K \times \frac{i_{corr} * E_w}{\rho}$$

$$CR = 0.1288 \times \frac{3.3611 \times 10^{-1} (\text{mA/cm}^2) * 18.5185}{8.2 (\text{g/cm}^3)}$$

$$CR = 0.0977 \text{ mpy}$$

### 2. *Resistencia a la polarización lineal*

Debido a que en esta prueba la medida de densidad de corriente no se obtiene directamente, es necesaria la utilización de algunas ecuaciones matemáticas para la determinación de esta.

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

Donde:

Rp: Resistencia a la polarización (Ohm)

$i_{corr}$ : Densidad de corriente ( $\text{A/cm}^2$ )

B: Parametro que depende de las pendientes de Tafel

Al igual que en método de extrapolación de Tafel se tomaron los datos obtenidos para el recubrimiento Ni-Cr para 0 días de exposición al electrolito.

En primera medida se determinó el parámetro B para el recubrimiento mencionado.

$$B = \frac{b_a * b_c}{2,303 * (b_a + b_c)}$$

$$B = \frac{0.0491 * 0.0453}{2,303 * (0.0491 + 0.0453)} = 0.0102$$

Posteriormente determinamos la densidad de corrosión, de acuerdo a la relación existente.

$$i_{corr} = \frac{B}{Rp}$$

$$i_{corr} = \frac{0.0102}{1280} = 7.9687 \times 10^{-6} \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

Una vez calculada la densidad de corriente se procede a determinar la velocidad de corrosión.

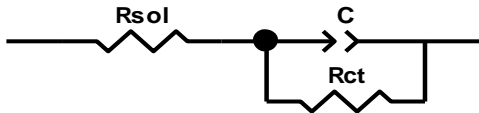
$$CR = K \times \frac{i_{corr} * EW}{\rho}$$

$$CR = 0.1288 \times \frac{7.9687 \text{ (}\mu\text{A/cm}^2\text{)} * 18.5185}{8.2 \text{ (g/cm}^3\text{)}}$$

$$CR = 2.3179 \text{ mpy}$$

## ANEXO I. CIRCUITOS EQUIVALENTES PROPUESTOS PARA LOS RECUBRIMIENTOS Ni-Cr y Ni-Cr-WC

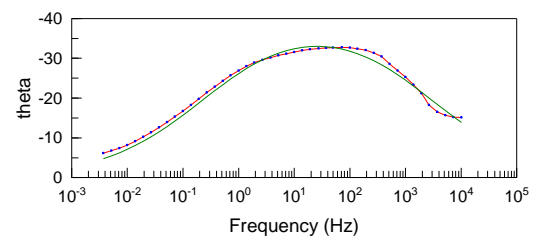
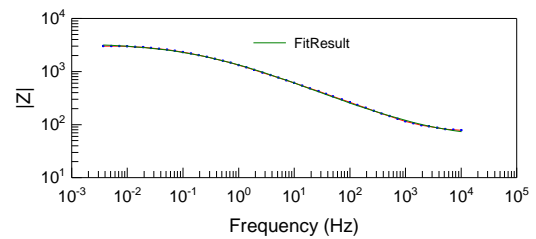
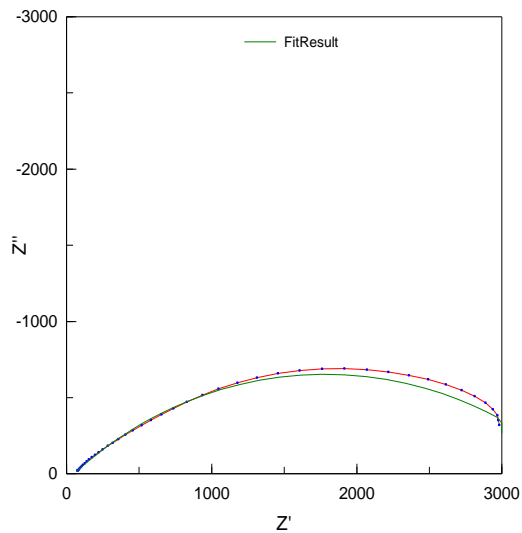
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr a tiempo  $t=0$  de inmersión.



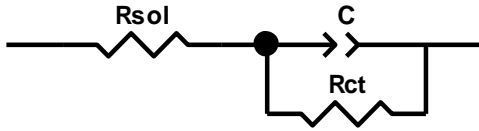
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	50.97	0.96523	1.8937
C-T	Free(±)	0.00023127	3.1112E-06	1.3453
C-P	Free(±)	0.45934	0.0026912	0.58588
Rct	Free(±)	3465	35.589	1.0271

Chi-Squared: 0.0013883

Weighted Sum of Squares: 0.12217



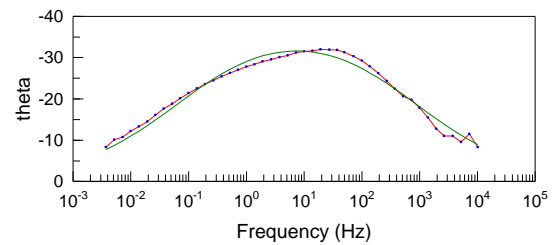
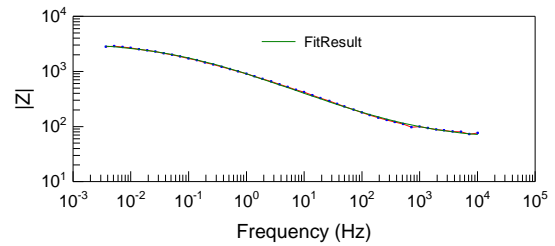
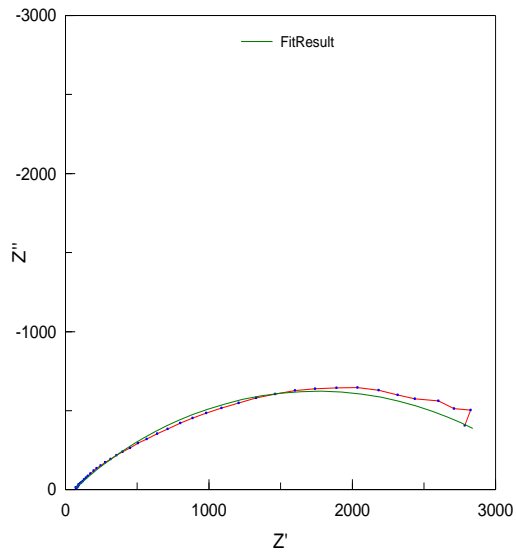
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr a tiempo  $t=1$  de inmersión.



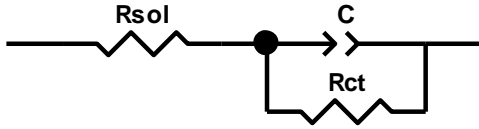
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	57.47	0.9804	1.7059
C-T	Free(±)	0.0004082	5.8975E-06	1.4448
C-P	Free(±)	0.44775	0.0033469	0.74749
Rct	Free(±)	3395	54.73	1.6121

Chi-Squared: 0.0020138

Weighted Sum of Squares: 0.17721



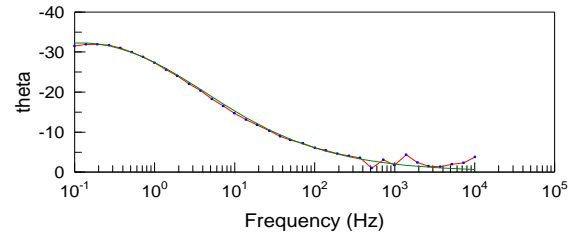
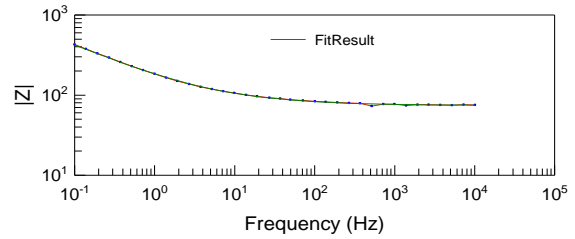
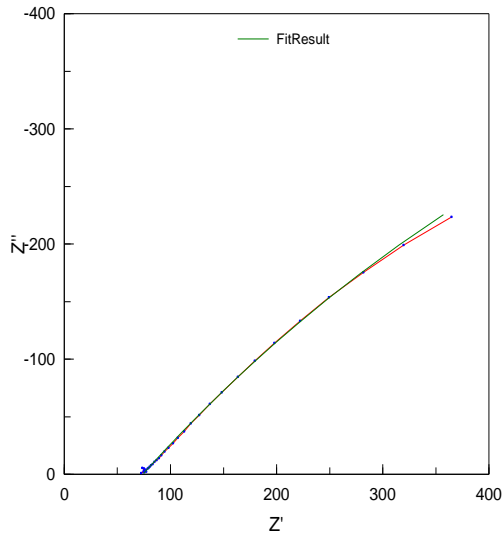
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr a tiempo  $t=7$  de inmersión.



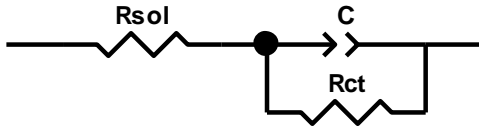
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	73.98	0.36199	0.48931
C-T	Free(±)	0.00304	5.2584E-05	1.7297
C-P	Free(±)	0.50912	0.0061084	1.1998
Rct	Free(±)	2053	276.34	13.46

Chi-Squared: 0.0018781

Weighted Sum of Squares: 0.12771



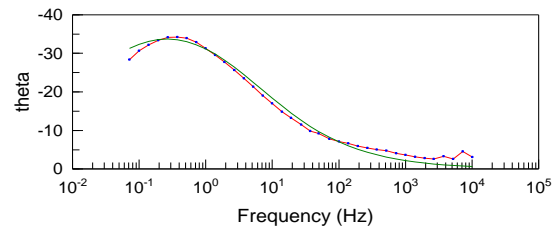
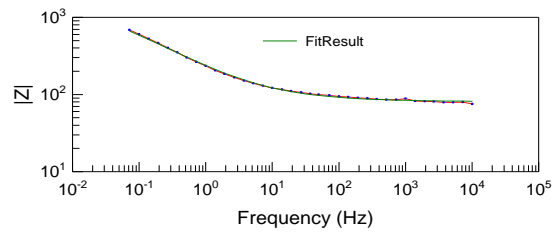
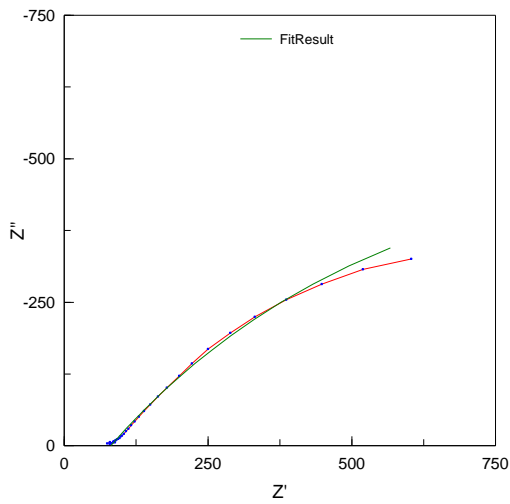
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr a tiempo  $t=15$  de inmersión.



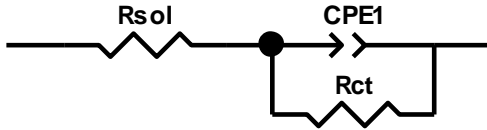
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	81.11	0.66253	0.81683
C-T	Free(±)	0.0019801	4.5956E-05	2.3209
C-P	Free(±)	0.54521	0.0084453	1.549
Rct	Free(±)	1898	198.61	10.464

Chi-Squared: 0.0050692

Weighted Sum of Squares: 0.35484



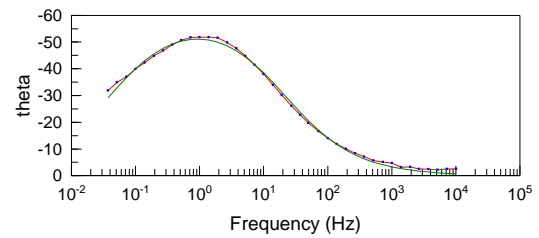
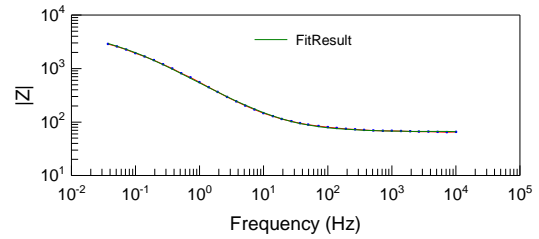
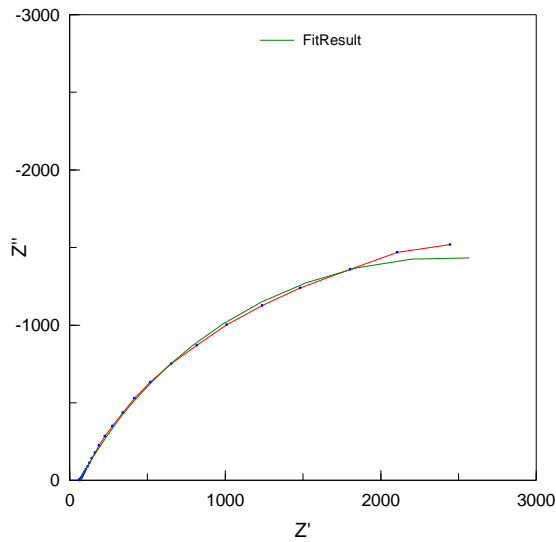
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr-WC a tiempo  $t=0$  de inmersión.



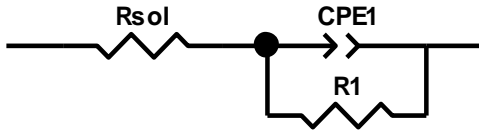
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free( $\pm$ )	65.79	0.32241	0.49006
CPE1-T	Free( $\pm$ )	0.00053133	4.3901E-06	0.82625
CPE1-P	Free( $\pm$ )	0.69274	0.0027667	0.39939
Rct	Free( $\pm$ )	4750	98.432	2.0723

Chi-Squared: 0.001562

Weighted Sum of Squares: 0.11559



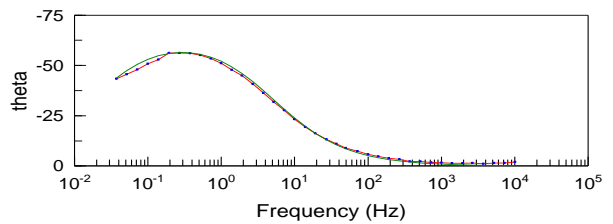
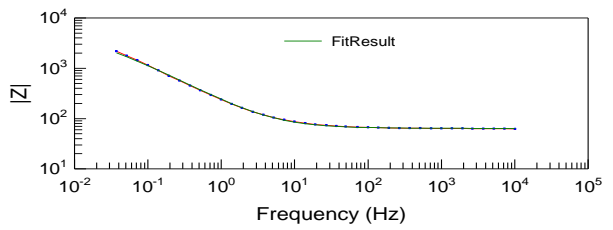
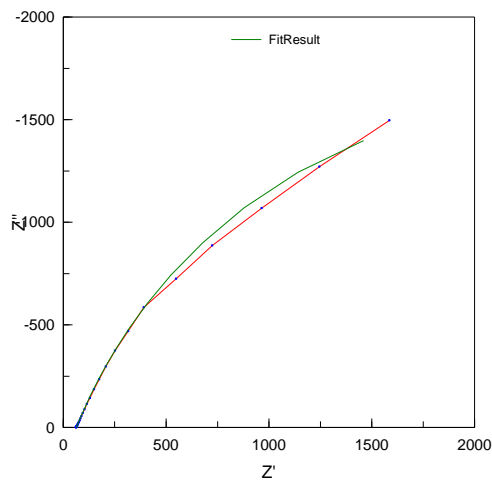
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr-WC a tiempo  $t=1$  de inmersión.



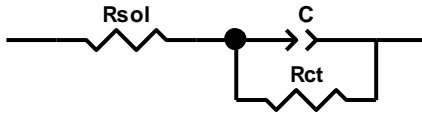
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	63.69	0.31649	0.49692
CPE1-T	Free(±)	0.0011595	9.8138E-06	0.84638
CPE1-P	Free(±)	0.75867	0.0038104	0.50225
R1	Free(±)	4652	188.97	4.0621

Chi-Squared: 0.0039941

Weighted Sum of Squares: 0.29557

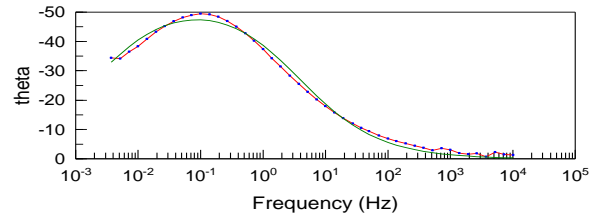
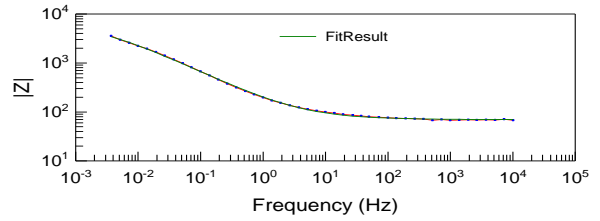
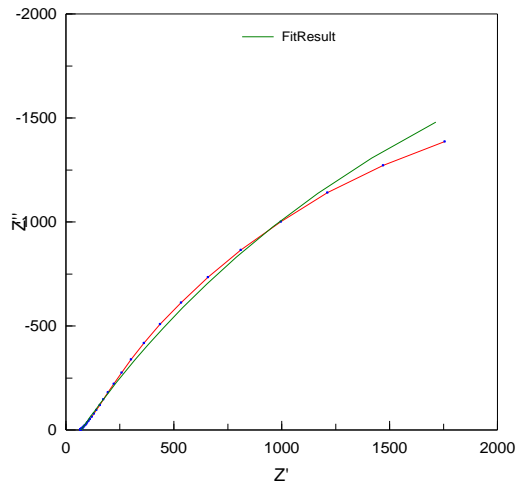


- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr-WC a tiempo  $t=7$  de inmersión.

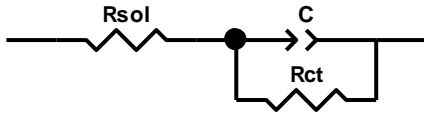


Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free( $\pm$ )	69.7	0.45223	0.64882
C-T	Free( $\pm$ )	0.002042	1.7606E-05	0.86219
C-P	Free( $\pm$ )	0.62283	0.0042914	0.68902
Rct	Free( $\pm$ )	7543	587.8	7.7927

Chi-Squared: 0.00461  
 Weighted Sum of Squares: 0.37802



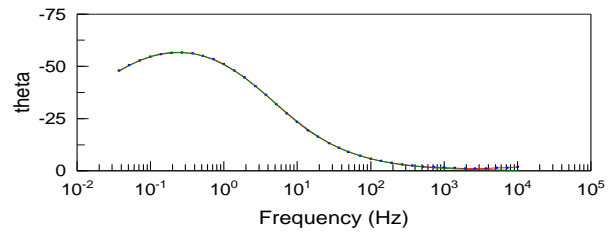
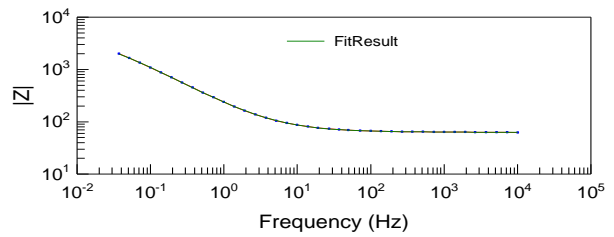
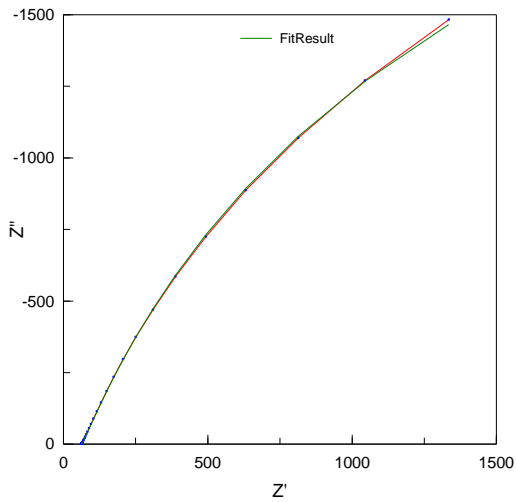
- Circuito equivalente para el recubrimiento Ni-Cr-WC a tiempo  $t=15$  de inmersión.



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(±)	63.3	0.12375	0.1955
C-T	Free(±)	0.001236	4.0485E-06	0.32755
C-P	Free(±)	0.73848	0.001493	0.20217
Rct	Free(±)	6142	135.49	2.206

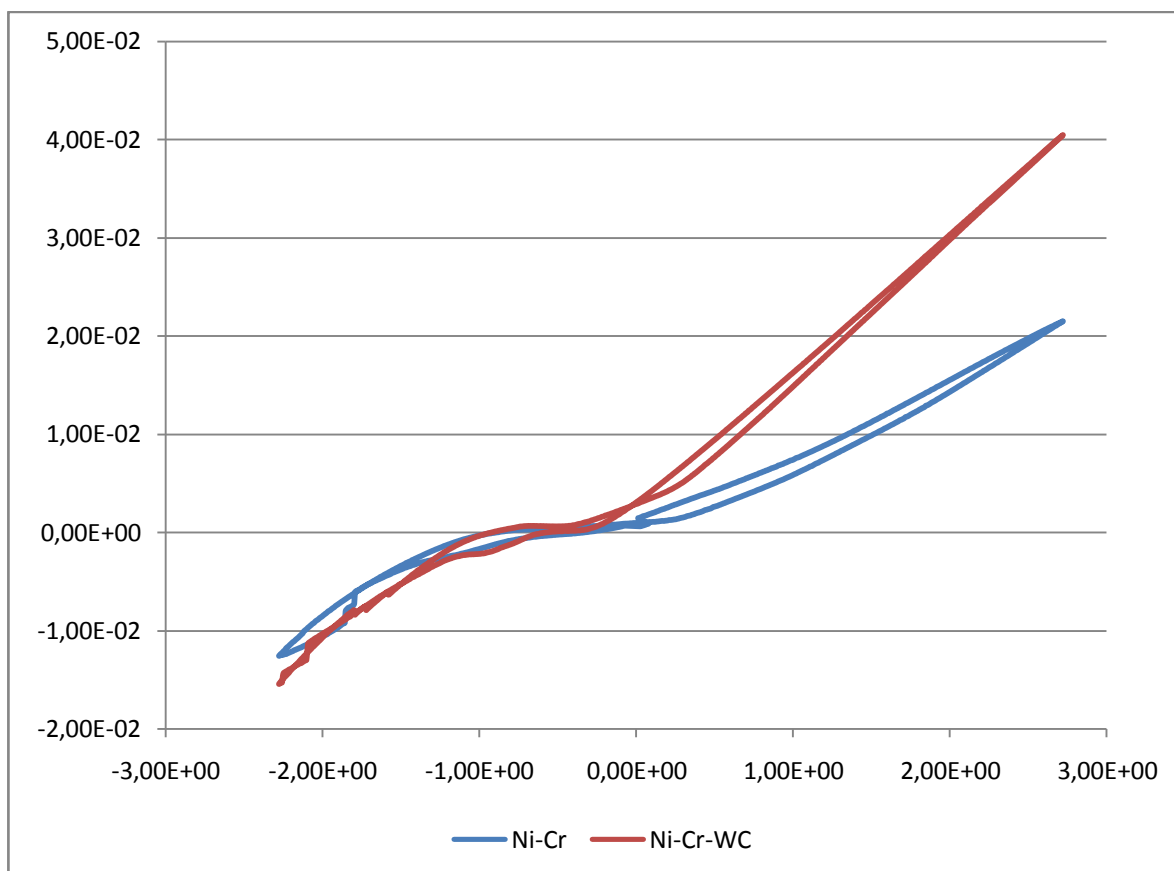
Chi-Squared: 0.000581

Weighted Sum of Squares: 0.042994



## ANEXO J. VOLTAMPEROGRAMA

- **Figura J-1.** Voltamperograma para Ni-Cr y Ni-Cr-WC



Fuente: Autores