

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN POR IMPACTO DE  
UNA SALMUERA SOBRE UN ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 304**

**ARMANDO JOSE PINEDO ALEAN  
FARIEL ALBERTO DEWDNEY MORALES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN POR IMPACTO  
DE UNA SALMUERA SOBRE UN ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 304**

**ARMANDO JOSE PINEDO ALEAN  
FARIEL ALBERTO DEWDNEY MORALES**

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para Optar al Título de  
Ingeniero Metalúrgico**

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

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2010**

## **DEDICATORIA**

**A Dios por darme en don de la Vida, darme fortaleza, dedicación y sabiduría para alcanzar esta gran meta.**

**A mis Padres, José Manuel y Jeaneth de Jesús, por su gran apoyo, enseñanzas y confianza depositada.**

**A mis abuelas, María del Rosario y Aura Esther por su gran ejemplo de vida, tesón, berraquera y lucha contra las adversidades.**

**A mis hermanos, Marla, Zico y Fiztgerald por su gran amistad.**

**A mi tío Cesar Enrique <q.e.p.d>, siempre lo llevo en mi mente y en mi corazón.**

**A Yuliana, por estar siempre a mi lado en los buenos y en los malos momentos y ser mí apoyo constante.**

**A todos mis demás familiares, que con su granito de arena fortalecieron esta lucha.**

**A todos mis amigos, por compartir mis alegrías y tristezas en los años difíciles.**

**FARIEL ALBERTO DEWDNEY MORALES.**

## **DEDICADO**

**A Dios, por darme sabiduría y fortaleza para culminar con éxito esta meta.**

**A mis padres, Armando Oscar y Betty Esperanza por su inmenso sacrificio, su amor incondicional y sabios consejos.**

**A mis hermanos, Maria Isabel y Erwin por su constante apoyo.**

**A mi abuela, Maria Concepción por sus enseñanzas.**

**A mi sobrino, Daniel David por ser un motivo más de lucha.**

**A Mónica, por su incansable colaboración y aprecio.**

**A mis demás familiares por su apoyo incondicional**

**A mis amigos por brindarme su sincera y desinteresada amistad.**

**Y a todos aquellos que siempre confiaron en mí.**

**ARMANDO JOSE PINEDO ALEAN.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Al grupo de investigaciones en corrosión de la Universidad Industrial de Santander, por facilitar sus instalaciones y equipos para el desarrollo del presente trabajo.

Al profesor Darío Yesid Peña Ballesteros, director del proyecto por su excelente orientación y su franca amistad.

Al profesor Custodio Vásquez Quintero, director del grupo de Investigaciones en corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración y orientación.

A los técnicos Fermín, Javier, Ambrosio, Mario y Domingo por la colaboración prestada para el desarrollo de esta investigación.

Y a todas aquellas personas que de manera desinteresada brindaron su colaboración en la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. ESTADO DEL ARTE	23
3. MARCO TEÓRICO	26
3.1 DEFINICIÓN CORROSIÓN - EROSIÓN	26
3.2 EROSIÓN	27
3.3 FACTORES QUE AFECTA LA EROSION	27
3.3.1 Morfología de las partículas.	27
3.3.2 Ángulo de impacto.	28
3.3.3 Tamaño de partícula.	28
3.3.4 Dureza Superficial.	29
3.3.5 Velocidad del Fluido.	29
3.4 FACTORES CRÍTICOS DE LA EROSIÓN–CORROSIÓN.	30
3.5 LA CAPA PASIVA EN ACEROS INOXIDABLES	30
3.6 ACCIÓN DEL IÓN CLORURO SOBRE EL ACERO INOXIDABLE	32
3.7 FORMA DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES	33
3.7.1 Corrosión por picadura.	33
3.7.2 Mecanismo de la Corrosión por Picadura.	35
3.8 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN	38
3.8.1 Extrapolación de Tafel.	38

3.8.2 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR).	39
3.8.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).	40
4. METODOLOGÍA	42
4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	42
4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO	42
4.3.1 Composición Química.	42
4.3.2 Dureza	43
4.4 CORTE Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	44
4.5 ANALÍISIS METALOGRAFICO	44
4.6 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE TRABAJO	46
4.7 VARIABLES DEL SISTEMA	46
4.8 ACONDICIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS	47
4.9 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	50
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1. POTENCIAL DE CORROSIÓN	54
5.2. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIE)	54
5.2.1. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 1,5 % p/p.	54
5.2.2. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.	58
5.2.3. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % p/p.	59
5.2.4. Circuitos Eléctricos Equivalentes.	62
5.3. MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL).	64
5.3.1. Diagramas RPL Para Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 1,5 % p/p.	64

5.3.2. Diagramas RPL para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.	66
5.3.3. Diagramas RPL para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % p/p.	66
5.4. EXTRAPOLACIÓN DE CURVAS TAFEL	68
5.4.1. Curvas Tafel para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 1,5 % p/p.	68
5.4.2. Curvas Tafel para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.	73
5.4.3. Curvas Tafel Para Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 3,5 % p/p.	75
5.5. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	81
5.5.1. Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 1,5 % p/p.	81
5.5.2. Pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % P/P	83
5.5.3. Análisis tridimensional de las superficies ensayadas	86
5.5.4. Análisis mediante los diagramas de Pourbaix.	88
Figura 10. Diagramas de Pourbaix Fe-Cl-H <sub>2</sub> O	88
6. CONCLUSIONES	90
7. RECOMENDACIONES	92
BIBLIOGRAFIA	93
ANEXOS	97

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Relación ángulo de impacto vs tipo de material	28
Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la intensidad crítica de flujo	29
Figura 3. Formación de capa pasiva	31
Figura 4. Mecanismo de corrosión por picadura	38
Figura 5. Método de extrapolación de Tafel.	39
Figura 6. Gráfica típica de la resistencia a la polarización.	40
Figura 7. Diagramas de impedancia Nyquist y Bode	41
Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología	43
Figura 9. Circuito equivalente para el sistema metal - salmuera 3,5 % p/p NaCl.	63
Figura 10. Diagramas de Pourbaix Fe-Cl-H <sub>2</sub> O	88
Figura 11. Diagramas de Pourbaix Cr-Cl-H <sub>2</sub> O	89

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ataque electrolítico	45
Tabla 2. Descripción de las soluciones de trabajo	46
Tabla 3. Variables del proceso experimental	47
Tabla 4. Matriz de pruebas erosión- corrosión	50
Tabla 5. Composición Química	53
Tabla 6. Determinación de dureza del acero AISI SAE 304	53
Tabla 7. Valores de resistencias y capacitancias para el sistema metal – Salmuera 3,5 % p/p NaCl	64
Tabla 8. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 1,5 % p/p NaCl.	72
Tabla 9. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 2.5 % p/p NaCl	75
Tabla 10. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 3.5 % p/p NaCl	79
Tabla 11. Valores de velocidad de corrosión para ensayos experimentales con ángulo de 10°.	80

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Variación del PCA por impacto de una salmuera sobre el acero AISI-SAE 304 a una velocidad de 4 m/s.	54
Gráfica 2. Pruebas EIE con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.	55
Gráfica 3. Pruebas EIE NaCl 1,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.	56
Gráfica 4. Pruebas EIE NaCl 1,5% p/p comparación todas las condiciones.	57
Gráfica 5. Pruebas EIE NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°	58
Gráfica 6. Pruebas EIE NaCl 3,5 % p/p a 4 m/s a 90° y a 10°	59
Gráfica 7. Pruebas EIE NaCl 3,5 % p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.	60
Gráfica 8. Pruebas EIE 3,5% NaCl p/p comparación todas las condiciones.	61
Gráfica 9. Diagramas Nyquist obtenidos en condiciones estáticas a diferentes concentraciones de salmuera.	62
Gráfica 10. Pruebas RPL con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.	65
Gráfica 11. Pruebas RPL con NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°.	66
Gráfica 12. Pruebas RPL con NaCl 3,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.	67
Gráfica 13. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.	68
Gráfica 14. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.	69
Gráfica 15. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p todas las condiciones.	70
Gráfica 16. Curvas Tafel con NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°.	74
Gráfica 17. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.	76
Gráfica 18. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.	77
Gráfica 19. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p todas las condiciones.	78
Gráfica 20. Curvas Tafel para diferentes ensayos a un ángulo de 10°.	81

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

	<b>Pág.</b>
Fotografía 1. Montaje de probetas en resina	44
Fotografía 2. Microestructura del acero AISI SAE 304	45
Fotografía 3. Banco de pruebas erosión-corrosión SPEVCEM2742	49
Tabla 4. Matriz de pruebas erosión- corrosión	50
Fotografía 4. Celda carga	51
Fotografía 5. Potenciostato GAMRY PC4/750 y sistema de computo	51
Fotografías 6. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 1,5 % p/p NaCl.	82
Fotografías 7. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 1,5 % p/p NaCl.	83
Fotografías 8. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl	84
Fotografías 9. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl.	84
Fotografías 10. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl.	85
Fotografía 11. Superficie y perfil de profundidad de la condición estática 1.5% p/p NaCl.	86
Fotografía 12. Superficie y perfil de profundidad de la condición a Vel = 7 m/s a 90° - 3.5 % p/p NaCl.	87
Fotografía 13. Superficie y perfil de profundidad de la condición a Vel = 7 m/s a 10° - 3.5 % p/p NaCl.	87

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI-SAE 304	98
ANEXO B. CONDICIONES ELECTROQUÍMICAS DE OPERACIÓN GENERALES PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	99
ANEXO C. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL - SALMUERA 3.5 % P/P NaCl – CONDICIÓN ESTÁTICA	100
ANEXO D. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL - SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 4 m/s a 90°	101
ANEXO E. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL - SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 4 m/s a 10°	102
ANEXO F. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL - SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 7 m/s a 90°	103
ANEXO G. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL - SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 7 m/s a 10°	104
ANEXO H. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 1,5% p/p	105
ANEXO I. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 2,5% p/p	107
ANEXO J. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 3,5% p/p	108

## RESUMEN

**TITULO: DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSION POR IMPACTO DE UNA SALMUERA SOBRE UN ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 304.\***

**AUTORES:** DEWDNEY MORALES, Fariel Alberto y PINEDO ALEAN, Armando José.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Acero inoxidable 304, banco de pruebas, solución de cloruro de sodio, ángulo de impacto, técnicas electroquímicas.

El acero inoxidable AISI-SAE 304 es empleado con mucha frecuencia en diferentes industrias tales como las lácteas, cerveceras, petroquímicas y sistemas de procesamiento de alimentos, entre otras. En ellas la calidad de sus productos o eficiencia de sus procesos giran en torno a la presencia del ion  $Cl^-$  especialmente cuando se halla formando parte del NaCl. Los efectos combinados de erosión por un líquido y los procesos de corrosión que generan la degradación del metal se denominan proceso erosión-corrosión, considerado como principal causante de falla estructural en medios que contienen cloruro debido a la destrucción de la película protectora, permitiendo la exposición de la superficie, y aumentando la velocidad de corrosión.

El objetivo principal de la investigación fue determinar la velocidad de corrosión en un acero inoxidable AISI –SAE 304 bajo impacto de un fluido de solución de cloruro de sodio, en ausencia de partículas sólidas; como una función del ángulo de impacto entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , variando la velocidad de impacto entre 4 y 7 m/s y la concentración de la salmuera entre 1.5 y 3.5 %p/p; utilizando un banco de pruebas para llevar a cabo ensayos de corrosión-erosión en materiales metálicos. Se emplearon las técnicas electroquímicas, Resistencia a la Polarización (RPL), Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) y Extrapolación de Tafel.

En los sistemas estudiados en esta investigación, se demuestra que la velocidad de corrosión aumenta a medida que aumenta la velocidad de impacto y disminuye el ángulo de ataque. La máxima velocidad de corrosión determinada fue  $3,78 \times 10^{-1}$  mpy, se obtuvo a una velocidad de 7m/s, concentración de 3.5% NaCl y un ángulo de impacto de 10 grados. Las técnicas electroquímicas mostraron una excelente opción para evaluar la resistencia a la corrosión de metales expuestos a la corrosión por impacto de salmueras a ángulos preferenciales y concentraciones conocidas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director. Ph.D. PEÑA BALLESTEROS, Darío Yesid.

## ABSTRACT

**TITLE: DETERMINATION OF CORROSION RATE OF STAINLESS STEEL AISI-SAE 304 BY BRINE IMPACT\***

**AUTHOR:** DEWDNEY MORALES, Fariel Alberto and PINEDO ALEAN, Armando José.\*\*

**KEYWORDS:** Stainless steel AISI-SAE 304, sodium chloride solution, impact angle electrochemical techniques

Stainless steel AISI-SAE 304 is frequently used in various industries such as dairy, brewing, petrochemical and food processing systems, among others. In them the quality of their products or efficiency of its processes revolves around presence of  $\text{Cl}^-$  especially when it is part of NaCl. The combined effects of fluid erosion and corrosion processes that generate the degradation of the metal is called erosion-corrosion process, considered as the main cause of structural failure in media containing chloride due to the destruction of the protective film, allowing exposure the surface, and increasing the rate of corrosion.

The main objective of the investigation was to determine the corrosion rate in a AISI- SAE 304 stainless steel under impact of a fluid jet of sodium chloride solution, in the absence of entrained solid particles; as a function of impact angle between  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , varying the velocity of impact between 4 and 9m/s and the concentration of the brine between 1.5 and 3.5 wt% of NaCl, the corrosion-erosion test were development in a test rig for metallic materials. The techniques used were lineal Polarization Resistance Lineal (RPL), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and extrapolation of Tafel.

The systems studied showed that the corrosion rate increases with increasing impact velocity and decreases the angle of impact. The highest corrosion rate determined was  $3,78 \times 10^{-1}$  mpy, was obtained at a speed of 7 m/s, concentration of 3.5% NaCl and a impact angle of 10 grades. The electrochemical techniques showed an excellent option to evaluate the resistance corrosion of metals exposed to corrosion by brine impact of preferential angles to known concentrations.

---

\*Degree Work.

\*\* Physical Chemistry Faculty of Engineering. School of Metallurgical Engineering. Director. Ph.D. PEÑA BALLESTEROS, Darío Yesid.

## INTRODUCCIÓN

Las pérdidas ocasionadas por el proceso corrosivo de los metales son, en general tan elevadas que han motivado un amplio desarrollo de la investigación en este campo. Estas pérdidas no sólo se generan por la necesidad de sustituir las estructuras corroídas sino también por otros efectos derivados tales como; interrupción en el funcionamiento de plantas industriales, daños de equipos adyacentes, pérdidas humanas o, en el mejor de los casos, la contratación de personal que controlen y mitiguen dicha corrosión.

El daño causado por los efectos combinados de erosión por partículas sólidas o por un líquido en un medio acuoso y los procesos de corrosión, es considerado como el principal causante de falla estructural en muchos ambientes; desde plataformas offshore, convertidores de energía y sistemas de procesamiento de alimentos. En cada caso la velocidad del daño es función del material (dureza, composición química), la partícula (ángulo de impacto, masa, concentración) y la solución (temperatura, pH, potencial electroquímico, presencia de iones tales como Cl<sup>-</sup>). Claramente obtener un manejo de los principales factores influyentes del daño requiere de mucha investigación sobre la variación de la velocidad de daño como función de estas variables independientes.

El acero inoxidable AISI-SAE 304 es utilizado con mucha frecuencia en un sinnúmero de ámbitos industriales, debido a su buena resistencia a la corrosión. sin embargo sus propiedades mecánicas no le permiten soportar los efectos mecánicos del desgaste. En algunos casos, la película protectora del acero inoxidable se puede llegar a destruir por efecto erosivo de un fluido exponiendo su superficie y aumentando la tasa de corrosión. Cuando la capa protectora no se puede regenerar se origina una pila galvánica entre la capa protectora y la zona

desgastada creándose una corrosión por picadura, caracterizada por presentarse como hoyos pequeños lisos, exhibiendo un patrón direccional relacionado con la trayectoria tomada por el fluido.

La corrosión por picadura es un problema de corrosión muy común en los aceros inoxidable, y muchas veces difícil de detectar o prevenir. Así mismo, el desempeño de estos aceros en medios que contienen cloruros puede variar significativamente de una aplicación a otra, concretamente cuando se considera la resistencia a la corrosión localizada.

El presente trabajo describe el comportamiento del acero inoxidable AISI –SAE 304 bajo impacto de una solución de cloruro de sodio en ausencia de partículas sólidas, dicho comportamiento se evaluó como una función del ángulo de impacto, la velocidad de impacto y la concentración del cloruro de solución la salmuera; parámetros de gran influencia en la velocidad de desgaste y degradación de la superficie en tribosistemas que sufren erosión-corrosión. El estudio se realizó mediante técnicas electroquímicas, con el fin de suministrar recomendaciones encaminadas a la solución del problema planteado y como contribución valiosa para posteriores investigaciones en el campo de la tribología y superficies.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la velocidad de corrosión-erosión por impacto de una salmuera sobre un acero inoxidable AISI 304 en un equipo de chorro sumergido, por medio de técnicas electroquímicas.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la velocidad de corrosión por medio de técnicas electroquímicas del acero inoxidable AISI 304 expuesto al impacto de una salmuera.
- Evaluar el efecto del ángulo, composición y la velocidad de impacto de la salmuera sobre la velocidad de corrosión- erosión del acero inoxidable AISI-SAE 304.

## 2. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de metodologías y herramientas que faciliten el entendimiento de los efectos sinérgicos entre corrosión y erosión de metales y aleaciones que tienen la capacidad de formar películas pasivas, han sido el pilar fundamental de muchos investigadores con objeto de suministrar ayuda valiosa tanto en los procedimientos implementados como en el análisis, discusión e interpretación de resultados.

De hecho, la literatura proporciona información acerca del comportamiento de los aceros inoxidable (específicamente AISI 304) bajo la interacción entre corrosión – erosión y los factores que influyen en el proceso corrosivo. Entre los aportes más destacados cabe citar los hechos por: E. HEITZ<sup>1</sup>, (1991) quien estudió el efecto del flujo sobre la corrosión y sugirió cuatro daños inducidos por el flujo del fluido: corrosión controlada por el transporte de masa, corrosión controlada por el transporte de fases, erosión-corrosión y cavitación-corrosión. La erosión-corrosión ocurre si el material es expuesto simultáneamente a la corrosión y a velocidades altas de flujo causando daños mecánicos. Las velocidades altas de flujo, y turbulencia y/o la presencia de partículas sólidas evitan la formación de capas protectoras, dejando el metal continuamente expuesto a ambientes corrosivos, acelerando así la velocidad de erosión-corrosión. Las diferentes geometrías tales como válvulas y codos incrementan la velocidad de corrosión-erosión debido a los cambios en el flujo.

Según B. VYAS<sup>2</sup>, (1995) la relación de corrosión, erosión y la interacción entre ellos depende del sistema ambiente-material. De hecho, la interacción en el caso de materiales metálicos puede tener un efecto sinérgicos o inhibitor, y su naturaleza es determinada por un sinnúmero de factores, entre los que se destacan la pasividad de la superficie del metal, la adherencia del producto de

corrosión, el estado metalúrgico del metal, la importancia de la difusión del oxígeno disuelto y la presencia de iones agresivos.

T. HONG y M. NAGUMO<sup>3</sup>, (1997) estudiaron el efecto de la concentración del ión cloruro en las primeras fases del picado de un acero inoxidable tipo 304 por medio de impedancias. El coeficiente de impedancia de Warburg aumentó con la concentración de ión cloruro a bajos potenciales en la región pasiva, cuando el proceso de difusión comenzó a ocurrir en la superficie. Para un picado que es nucleado bajo un potencial dado, existe una concentración mínima de cloruros en la cual el picado en la superficie del acero puede activar la etapa de propagación, y por debajo de la cual no se puede activar.

K. SASAKI y G.T. BURSTEIN<sup>4</sup>, (2007) utilizaron un acero inoxidable AISI 304 bajo el impacto del chorro del líquido de una solución de NaCl de 0,6 M en ausencia de partículas sólidas, donde se observó que el potencial de circuito abierto del acero se incrementa con el tiempo hasta alcanzar el potencial de picado. Esto es debido principalmente a la aceleración de la reacción catódica, a causa de que la velocidad de transferencia de masa de oxígeno se incrementa con el impacto del chorro de la solución. Una vez se ha alcanzado el potencial de corrosión, dicho potencial de circuito abierto disminuye por el crecimiento de picados estables producidos por el flujo del líquido. Así mismo mediante medidas de polarización encontraron que el fluido puede impedir la corrosión por picadura, debido a la remoción de los picados de manera continua cuando impacta el acero.

De igual manera, identificaron la velocidad de impacto y el ángulo de impacto como dos parámetros influyentes en la degradación de tribosistemas que sufren erosión-corrosión, encontraron que los valores máximos de velocidades de corrosión-erosión del acero AISI 304 ocurren en ángulos oblicuos entre 40° y 50°; así mismo determinaron que existe una mayor degradación a mayor velocidad de

impacto. También demostraron que la rugosidad superficial es un parámetro crítico en la determinación de los efectos del proceso de erosión-corrosión

Según H. UGLIG<sup>5</sup>, (1985), el número de picaduras se incrementa rápidamente con la concentración de NaCl y su profundidad en soluciones saturadas de NaCl se hace más grande mientras exista una disminución en el pH de la solución.

Y LU.C e M. IVES<sup>6</sup>, (1993) realizaron un estudio sobre el comportamiento de aceros inoxidable en soluciones acuosas que contienen cloruros con valores de pH neutros y ácidos. Determinaron la influencia del molibdeno y el nitrógeno en la resistencia al picado de estos aceros.

M. MATSUMURA<sup>7</sup>, (1991) estableció que la erosión puede aumentar la velocidad de corrosión por remoción de la película pasivante. En este caso, la velocidad total de daño puede ser estimada por la contribución de la corrosión medida a través de técnicas electroquímicas y la contribución de la erosión medida en condiciones estáticas.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 DEFINICIÓN CORROSIÓN - EROSIÓN**

Se puede definir la corrosión como un proceso de degradación del material que ocurre debido a la acción química o electroquímica, mientras que la erosión es un proceso de remoción mecánica acelerada de la superficie del material como el resultado del movimiento relativo de sólidos, líquidos, vapores o cualquier combinación de estos, los cuales son impactados sobre la superficie del material. Cuando estos dos procesos actúan juntos, el proceso que produce la degradación del material se conoce como corrosión– erosión<sup>8</sup>. Potencialmente, todas las aleaciones metálicas son susceptibles de experimentar corrosión-erosión en mayor o menor grado. Este tipo de corrosión perjudica especialmente a las aleaciones que se pasivan formando una película superficial protectora; la acción abrasiva puede erosionar la película dejando al descubierto la superficie metálica. Si la película protectora no es capaz de autogenerarse la acción abrasiva continua, y rápidamente la velocidad de corrosión puede ser severa.<sup>9</sup>

En algunos casos la película protectora del acero inoxidable puede llegar a ser destruida a causa del movimiento relativo entre la superficie y el fluido erosivo. Cuando la capa protectora no se puede regenerar se origina una pila galvánica entre la capa protectora y la zona desgastada originando corrosión localizada, causando un aumento en la velocidad de deterioro del metal.<sup>9</sup>

## **3.2 EROSIÓN**

La erosión es el proceso de desgaste mecánico o destrucción de un metal por la acción de la abrasión o la fricción causada por el flujo de líquido o gas (con sólidos suspendidos o sin ellos), que produce un daño localizado permanente y conlleva a la remoción de material por distintos mecanismos, principalmente deformaciones micro mecánicas y fractura, o la combinación de ambos.<sup>10</sup>

En el proceso de desgaste por erosión, existen dos mecanismos que constituyen la base del fenómeno, describiendo de esta manera el modo secuencial del daño. En materiales dúctiles, la incidencia del proceso erosivo genera una drástica deformación plástica localizada, así como endurecimiento por deformación y formación de costras. En tales casos, la geometría de la deformación debido al impacto del fluido o de las partículas sólidas depende principalmente de la velocidad de impacto. Por otro lado, en los materiales frágiles el deterioro es causado por agrietamiento, fractura y desprendimiento de pequeñas partes del material.<sup>11</sup>

Existe un extenso número de factores que presentan un papel determinante en el proceso erosivo de los materiales de ingeniería, principalmente de los aceros. RAO Y BUCKLEY<sup>12</sup> (1985), descubrieron que factores como la energía de superficie, la tensión, el volumen atómico, el punto de fusión y la dureza exhiben buena correlación con la erosión. A pesar de ello, estas propiedades no son satisfactorias para la predicción de la velocidad de erosión relativa de ciertos aceros.

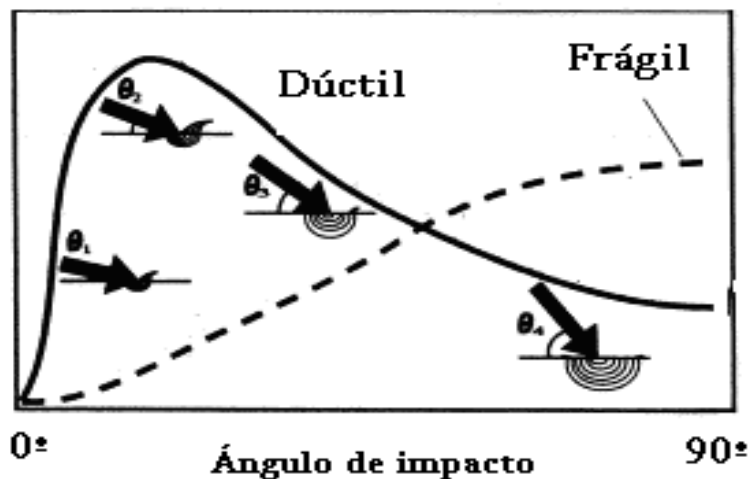
## **3.3 FACTORES QUE AFECTA LA EROSION**

**3.3.1 Morfología de las partículas.** Tanto para materiales dúctiles como frágiles se conoce que la erosión más efectiva se encuentra asociada a partículas con

morfología angular. La erosión en estado estacionario con partículas esféricas generalmente desarrolla una topografía de valles y colinas con el área de la misma siendo significativamente mayor que a las dimensiones del impacto propiamente dicho.

**3.3.2 Ángulo de impacto.** El ángulo de incidencia o el ángulo de ataque de las partículas o del fluido influyen ampliamente en la velocidad de erosión. La influencia del ángulo de impacto es dependiente del tipo de material (figura 1). Para materiales dúctiles la máxima pérdida por erosión ocurre a ángulos cercanos a los 20°. Para materiales frágiles la pérdida por erosión sucede a 90°.

**Figura 1. Relación ángulo de impacto vs tipo de material**



Fuente: CÁCERES JIMÉNEZ. Corrosión erosión recubrimientos de NbN

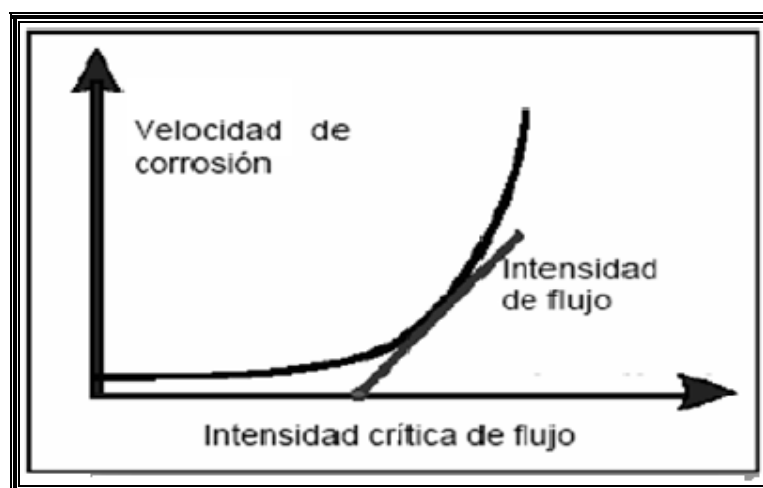
**3.3.3 Tamaño de partícula.** La comparación de este efecto con respecto a la velocidad de partícula se puede realizar correlacionando la energía de disipación con la pérdida de material a través de la determinación de los valores de la energía cinética de impacto requerida para remover la unidad de volumen del material de prueba. Para materiales dúctiles, la erosión relativa es esencialmente independiente del tamaño de partícula por encima de cierto valor crítico. STACK<sup>13</sup>

y colaboradores (2003) determinaron que la velocidad de erosión es dependiente del tamaño del erodente en el rango de 50 a 100  $\mu\text{m}$ , pero para valores de tamaño de partícula mayores a 100  $\mu\text{m}$ , la dependencia de la velocidad de erosión se reduce considerablemente.

**3.3.4 Dureza Superficial.** La dureza superficial es el parámetro habitualmente escogido para describir la velocidad de erosión de materiales dúctiles. La dureza es probablemente la variable más adecuada para caracterizar la respuesta a la erosión tanto en materiales dúctiles como frágiles.

**3.3.5 Velocidad del Fluido.** El flujo afecta a la velocidad de disolución del metal de diferentes formas. Por debajo de la intensidad crítica de flujo la velocidad de corrosión aumenta sólo gradualmente con el aumento de la intensidad de flujo (figura 2). Por encima de la intensidad crítica de flujo, la interacción entre el líquido y la pared llega a ser tan alta que las películas protectoras son destruidas por los elementos de turbulencia. En este caso, la disolución de la superficie del metal desprotegida es controlada por el transporte de masa.<sup>12</sup>

**Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la intensidad crítica de flujo**



Fuente: CORROSION NACEzpo 2006 paper 06112

### **3.4 FACTORES CRÍTICOS DE LA EROSIÓN–CORROSIÓN.**

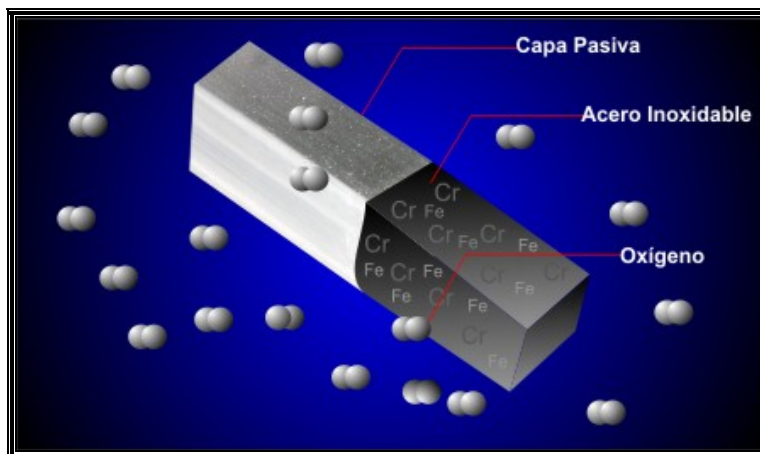
En la mayoría de los casos, la corrosión desempeña un papel importante de modo que muy pocas veces se presenta erosión pura. Por tal razón es necesario considerar la contribución de la corrosión en el proceso deterioro de un material.

- La velocidad de pérdida de metal depende de la concentración del medio, la velocidad de impacto y el ángulo de impacto.
- El aumento de la corrosividad del ambiente puede reducir la estabilidad de las películas protectoras y aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal. El metal se puede eliminar de la superficie como iones disueltos, o como productos sólidos que se retiran mecánicamente de la superficie del metal.
- Factores como temperatura, pH, presión y viscosidad, contribuyen a un aumento a la corrosividad del ambiente y generan un incremento en la susceptibilidad al deterioro del material. <sup>8</sup>

### **3.5 LA CAPA PASIVA EN ACEROS INOXIDABLES**

En la superficie de todos los aceros inoxidable y en presencia de un agente oxidante crece una capa rica en óxido de cromo llamada capa pasiva. Esta capa superficial es de espesor nanométrico (entre 10 y 50 nanómetros), su composición exacta todavía no es muy clara, pero se sabe que está basada en mezclas de óxidos de hierro y cromo, por lo que tiene una excelente plasticidad así como una gran capacidad de regeneración, ver figura 3.

**Figura 3. Formacion de capa pasiva**



Fuente: [http:// stainless steel.htm](http://stainlesssteel.htm)

La aparición de la capa pasiva tiene lugar por el contacto con el oxígeno del aire, siendo este un fenómeno que ocurre lentamente. Industrialmente el crecimiento de la capa pasiva se acelera colocando el material en contacto con agentes oxidantes.

Este sistema de protección es similar al que se consigue en otros productos aplicando una pintura o un tratamiento superficial como el galvanizado, niquelado, cromado, etc. La diferencia del acero inoxidable con estos otros tipos de protección es que la capa pasiva en los aceros inoxidables es generada por la propia aleación. Cuando esta película se rompe, el contacto con el oxígeno del ambiente produce el crecimiento de una nueva capa pasiva y el material vuelve a recuperar resistencia a la corrosión. Sin embargo, en determinadas condiciones microestructurales y bajo ciertas condiciones ambientales esta capa puede ser afectada de tal modo que se impida la auto-regeneración, y permitir la aparición de algún fenómeno de corrosión.<sup>13</sup>

Se dice que un material metálico está en estado de pasividad, cuando en un determinado medio es favorable termodinámicamente, una reacción de corrosión,

pero cuya velocidad del proceso es tan limitada que, prácticamente, hace imperceptible los efectos de la propia corrosión. Por el contrario, se dice que un material metálico se encuentra en estado de actividad si el proceso corrosivo es termodinámicamente posible, y ocurre con una velocidad de corrosión perceptible. Los aceros inoxidable pueden ser activos o pasivos según las condiciones en que se encuentren. En el primer caso se observan fenómenos corrosivos, en el segundo caso la velocidad de corrosión es muy baja y se degradan lentamente.<sup>14</sup>

### **3.6 ACCIÓN DEL IÓN CLORURO SOBRE EL ACERO INOXIDABLE**

Los iones cloruro destruyen la capa de los aceros inoxidable. Desde el punto de vista de la teoría de la película de óxido, el ion cloruro penetra en la película de óxido a través de los poros y otros defectos con mayor facilidad que otros iones, y puede dispersar en forma coloidal la película de óxido e incrementar su permeabilidad.

Por otra parte, de acuerdo con la teoría de la adsorción, el ión cloruro se adsorbe sobre la superficie del metal en competencia con el oxígeno disuelto u  $\text{OH}^-$ . El  $\text{Cl}^-$  una vez en contacto con la superficie del metal, favorece la hidratación de los iones del metal e incrementa la facilidad de estos iones a disolverse, efecto opuesto al del oxígeno adsorbido, que disminuye la velocidad de disolución del metal. En otras palabras, los iones cloruro adsorbidos aumentan la corriente de intercambio de la disolución anódica de los aceros inoxidable, sobre el valor que prevalece cuando el oxígeno cubre la superficie. El efecto es tan acentuado que los aceros inoxidable no pueden ser pasivados anódicamente en soluciones que contienen una concentración apreciable de  $\text{Cl}^-$ . La ruptura de la pasividad por el  $\text{Cl}^-$  suele ser local y no sobre toda la superficie pasiva situándose sobre puntos preferenciales debido quizás a pequeñas variaciones de estructura, y espesor de

la película pasiva. Se forman diminutos ánodos rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo.<sup>15</sup>

La diferencia de potencial entre estas áreas es grande (0,5 V o más) y la pila formada recibe el nombre de activa-pasiva. Las densidades altas de corrientes en los ánodos producen velocidades altas de penetración en el metal, acompañado de la protección catódica de la superficie del metal que rodea a los ánodos. Esto fija la localización del ánodo y produce corrosión del tipo denominado picaduras. Cuanto mayor sea el flujo de corriente menor probabilidad de que se inicie otra picadura en su proximidad. De aquí que el número observado de picaduras profundas por unidad de superficie sea, por lo general, menor que la densidad de picaduras más pequeñas de poca profundidad.

De los cloruros, merece atención especial el NaCl. La velocidad de corrosión de los cloruros aumenta con el contenido de sal hasta el 3% de NaCl, a partir de esta concentración la corrosión disminuye. La salmuera saturada es menos corrosiva que el agua destilada. Esta baja velocidad se debe a la considerable disminución del O<sub>2</sub> con el aumento de la concentración de NaCl.<sup>15</sup>

### **3.7 FORMA DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES**

Los aceros inoxidable encuentran una gran disminución en sus propiedades tribológicas debido a un ataque localizado, particularmente a la corrosión por picadura. Muchos problemas de corrosión se pueden evitar comprendiendo su génesis, los riesgos involucrados y la forma de mitigarlos.

**3.7.1 Corrosión por picadura.** Es una corrosión localizada cuyo mecanismo puede ser análogo con respecto al de la corrosión intersticial. Como todos estos tipos de corrosión, ésta es particularmente agresiva y peligrosa, pues actúa en profundidad

en pequeñas áreas muy circunscritas y fáciles de escapar a un control visual, e incluso cuidadoso, logrando dejar fuera de servicio una instalación porque progresa hasta perforar la parte atacada.

La corrosión por picadura puede presentarse en una sección transversal, y ser bien de tipo penetrante, o bien de tipo cavernoso. El progreso de la perforación sigue normalmente el de la gravedad, tanto que para cambiar la dirección de la propagación de picado en el interior de una pared es suficiente a veces cambiar su inclinación con respecto a la vertical. La corrosión por picadura se desarrolla partiendo evidentemente, de la superficie en los que resulta más difícil una condición de pasividad estable. Para que se desarrolle un ataque de corrosión por picado deben coexistir diversas causas, como el tipo de ambiente en el que se encuentre inmerso el acero inoxidable y la presencia de zonas favorables de ataque, como por ejemplo el límite de grano.<sup>14</sup>

El ambiente está constituido generalmente por soluciones diluidas de carácter oxidante débil en las que están presentes iones específicos, como los iones cloro y bromo. Las condiciones para que se desarrolle la picadura es que la mayor parte de la superficie se encuentre en estado pasivo y solo en algunas zonas muy pequeñas de la misma en estado activo. Los iones halógenos ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{Br}^-$ ), de acción específica, consiguen finalmente romper la pasividad en la zona donde es más débil. La condición para que suceda la rotura del estrato pasivo en el punto débil está determinada por la combinación de cuatro parámetros que son: la resistencia intrínseca del acero inoxidable a este tipo de corrosión, la concentración de la solución agresiva, el tipo de los iones agresivos y la temperatura superficial del acero inoxidable. Los ambientes típicos capaces de desarrollar la corrosión por picado son: el agua de mar y en general las aguas que contienen iones cloro, sobre todo si están estancadas.<sup>14</sup>

El ataque corrosivo actúa en dos fases sucesivas. Si se considera una solución acuosa aireada de sal común con pH de alrededor de 7, la primera fase es la incubación, durante la cual los iones agresivos actúan sobre el sustrato pasivo y consiguen romperlo en los puntos de menor resistencia. No se sabe con certeza el tiempo de iniciación, que a veces es breve y otras veces prolongado. Durante esta fase, la velocidad de crecimiento de la picadura es irregular. Cuando concluye el estado de incubación, se desarrolla la segunda fase de crecimiento de la picadura, la cual puede desarrollarse por dos tipos de proceso: penetrante o cavernoso.<sup>15</sup>

En el fondo de la picadura, situado en la zona anódica durante la incubación, tienen lugar un paso rápido de disolución de iones metálicos, mientras que en las zonas catódicas circundantes se realiza la reducción del oxígeno mediante la formación de iones grupos hidroxilo (OH<sup>-</sup>). Las zonas catódicas resultan así protegidas por la zona anódica de la picadura. El flujo de corriente entre la zona anódica y la zona catódica mantiene la continuidad en el transporte de iones metálicos a la solución. En el fondo de la picadura se manifiesta una acumulación de iones cloro que permiten la formación de cloruros metálicos fácilmente hidrolizables. Esta acumulación de iones cloro aumenta la acidez de la solución en el fondo del picado (disminución de pH), acelerando la velocidad de penetración del ataque, mientras que la ausencia de oxígeno en la profundidad de la picadura impide cualquier tentativa de reconstrucción de la película pasiva.<sup>14</sup>

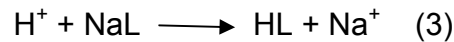
**3.7.2 Mecanismo de la Corrosión por Picadura.** Al corroerse, el metal pasa a la solución en forma de iones:



En general, se estudian metales cuyos iones no son estables con el agua. Como resultado de ello estos iones reaccionan con las moléculas de agua del medio corrosivo y alcanza un equilibrio termodinámico según la siguiente reacción:



Esta reacción muestra la etapa simple de la hidrólisis de los iones metálicos. Si el medio corrosivo contiene sales de ácidos débiles es decir pocos disociados los protones producidos en la reacción anterior reaccionará con la sal del ácido débil dando:



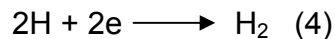
Donde L, es el anión de un ácido débil, por ejemplo acetato, borato, silicato, etc. La reacción consumirá los protones producidos por la reacción (2) y no habrá modificaciones importantes del pH como resultado de la reacción (1).

En cambio, si el medio contiene solo aniones de ácidos fuertes, tales como sulfuros, cloruros, bromuros, etc., los aniones no captan protones según la reacción (3). De este modo al sumarse las reacciones (2) y (1) se ve que el proceso de corrosión lleva una acumulación de protones, es decir la formación de una zona de acidificación localizada.

Como se conoce por los diagramas de Pourbaix, una disminución del pH hace que los óxidos que pasivan el metal dejen de ser estables. De esta forma, si la disolución del metal ocurre en presencia de sales fuertes, se producen acidificaciones localizadas que conducen a la despasivación del metal y al picado.<sup>16</sup>

También se conoce que los iones de los ácidos débiles se oponen a la acidificación localizada mediante la reacción (3), y actúan como inhibidores del picado. Tal es el caso de los cromatos, boratos, carbonatos, etc., que inhiben el picado en presencia de cloruros.

En una solución ácida hay otra reacción, que también es función del potencial y que actúa captando protones; es la reacción de reducción de hidrógeno:



Dicha reacción es tanto más rápida cuanto menor sea el potencial del electrodo. Si se opera a un cierto potencial al cual las dos primeras reacciones aseguran una acidificación localizada y dan lugar a un picado. Si se comienza a bajar el potencial del electrodo la reacción (1) se hará cada vez más lenta y por consiguiente, la producción de protones según la reacción (2) se hará también más lenta.

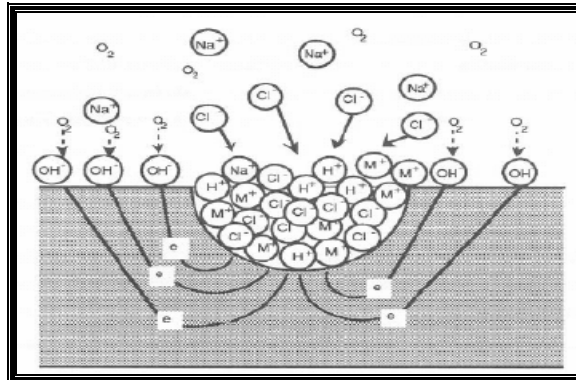
Al bajar el potencial la velocidad de reacción (4) ira en aumento. Finalmente habrá un potencial al cual la cantidad de protones producidos por la suma de las dos primeras reacciones es igual a la cantidad de protones consumidos por (4). Por debajo de este potencial la reacción (4) consume más protones que los producidos por (1) y (2). De este modo si hubiera alguna acidificación desaparecería por debajo de este potencial, es decir, que si existieran picaduras activas, éstas se desactivarían. Se observa que hay un potencial por encima del cual se puede presentar el picado. Por debajo de dicho potencial la acidificación localizada no puede producirse y no hay peligro de picado del metal.<sup>16</sup>

Este potencial se determinará como potencial de corrosión del metal en la solución ácida en el interior de la picadura. De este modo el potencial de picado debe ser mayor o igual a dicho potencial de corrosión.

La diferencia entre ambos está dada por la polarización del electrodo dentro de la picadura y por la caída óhmica en la solución.

La figura 4 muestra como los productos insolubles de la corrosión al presentarse picado forman una barrera que actúa de barrera física a la difusión del oxígeno al ánodo. El cátodo tiene acceso al oxígeno de toda la solución.<sup>16</sup>

**Figura 4. Mecanismo de corrosión por picadura**

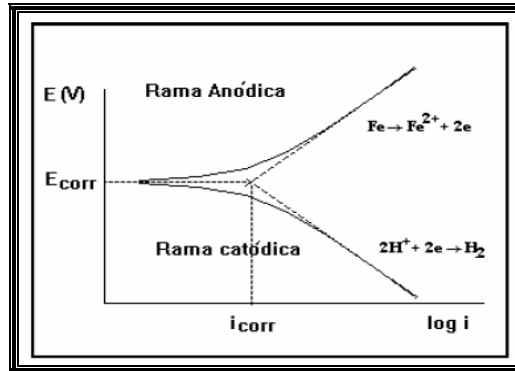


Fuente: VERA CRUZ R.P, NISHIKATA AC. Pitting corrosion mechanism of stainless steels under wet-dry exposure in chloride –containing environments.

### **3.8 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN**

**3.8.1 Extrapolación de Tafel.** Es una polarización de alto campo, en la que se aplican sobre potenciales de 250 a 300 mV tanto en sentido catódico, como anódico. Con esta técnica se obtiene la velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) por la extrapolación de las regiones catódica y anódica en el potencial de corrosión (ver figura 5). Además, es posible calcular las pendientes de Tafel, que son parámetros cinéticos útiles en el cálculo de la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ). La mayor desventaja que presenta esta técnica es que hace parte de las pruebas destructivas. <sup>17</sup>

**Figura 5. Método de extrapolación de Tafel.**



Fuente: VALLE M, A; PÉREZ L, T; y MARTÍNEZ M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado.

**3.8.2 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR).** El método de resistencia a la polarización lineal (LPR) es una técnica que proporciona un método más exacto para determinar la velocidad de corrosión. El método de LPR se basa en la aplicación de un nivel establecido de corriente, seguido de un monitoreo de potencial o una aplicación de un potencial específico seguido de un monitoreo de corriente (ver figura 6). En el experimento se obtienen los datos variando el potencial alrededor del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) en un rango de  $\pm 25$  mV para no salirse de la región lineal de Tafel y una velocidad típica de barrido de 0,1mV/s. Para calcular la velocidad de corrosión usando el método de LPR, se calcula primero  $i_{corr}$  con la ecuación (5), la cual está basada en la relación de Stern-Geary (ecuación 6).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 R_p (\beta_a + \beta_c)} \quad (5) \qquad I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (6)$$

Aquí  $R_p$  es la resistencia a la polarización, en  $\Omega cm^2$ , y  $\beta_A$  y  $\beta_C$  son constantes de Tafel, las cuales pueden ser obtenidas de las graficas de Tafel.



Z es la impedancia del circuito, V (w) es el potencial como función de la frecuencia e I (w) es la corriente como función de la frecuencia. Cuando se aplica una señal de voltaje en corriente alterna, se obtiene una respuesta en corriente de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

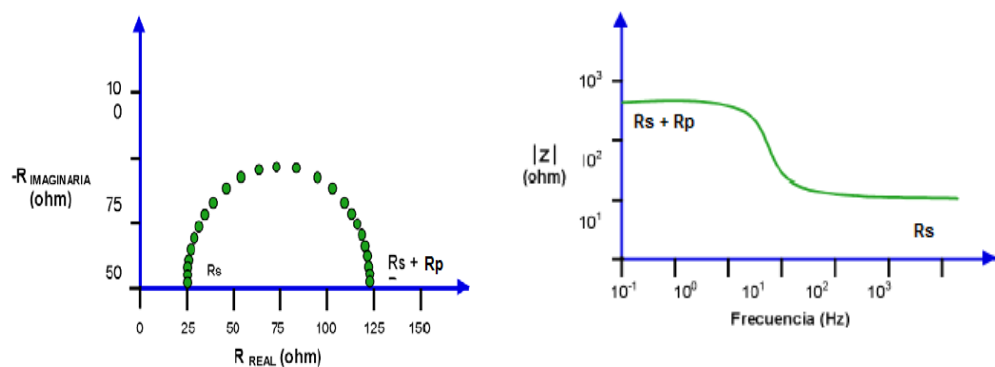
$$V = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$I = I_{\max} \sin(\omega t + \theta) \quad (10)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de fase y es muy útil para aproximar las características de los elementos eléctricos a diferentes frecuencias.

La figura 7 muestra los Diagramas de Nyquist y de Bode. Para el diagrama de Nyquist, la magnitud del componente real de impedancia se incrementa cuando se aleja del origen y los puntos de alta frecuencia se localizan cerca del origen de la gráfica, mientras que los puntos de baja frecuencia corresponden a un incremento en magnitud de los componentes de impedancia.<sup>18</sup>

**Figura 7. Diagramas de impedancia Nyquist y Bode**



Fuente: VERA CRUZ R.P, NISHIKATA AC. Impedance monitoring of pitting corrosion of stainless steel under a wet dry cyclic condition in chloride containing environment.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

La metodología llevada a cabo en esta investigación se ha planteado con el fin de determinar la velocidad de corrosión-erosión por impacto de una salmuera de concentración variable sobre un acero inoxidable AISI 304 en un equipo de chorro sumergido, por medio de técnicas electroquímicas.

El desarrollo experimental adoptado se encuentra dividido como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 8.

### **4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta primera etapa, se revisó el estado del arte y se recopiló la información necesaria con el fin de determinar los fundamentos teóricos del proyecto; basados en distintas fuentes como: artículos, tesis de grados, libros, páginas web, revistas, bases de datos y normas técnicas.

### **4.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO**

Como material de trabajo se utilizó el acero inoxidable austenítico AISI SAE 304 adquirido en la Compañía General de Aceros S.A.

**4.3.1 Composición Química.** El análisis de la composición para determinar el porcentaje de los elementos presentes en el acero inoxidable AISI SAE 304, se

realizó mediante técnica de espectroscopía de emisión óptica (E.E.O) de acuerdo a la norma ASTM E-415 2005, (ver anexo A)

**4.3.2 Dureza.** Se midió la dureza a la sección transversal de la probeta, con un medidor de dureza Clark en la escala Rockwell A, con una carga aplicada de 60Kg y un indentador con punta de diamante de acuerdo a las especificaciones establecidas en la norma ASTM-10 de 2001, (ver tabla 6).

**Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología**

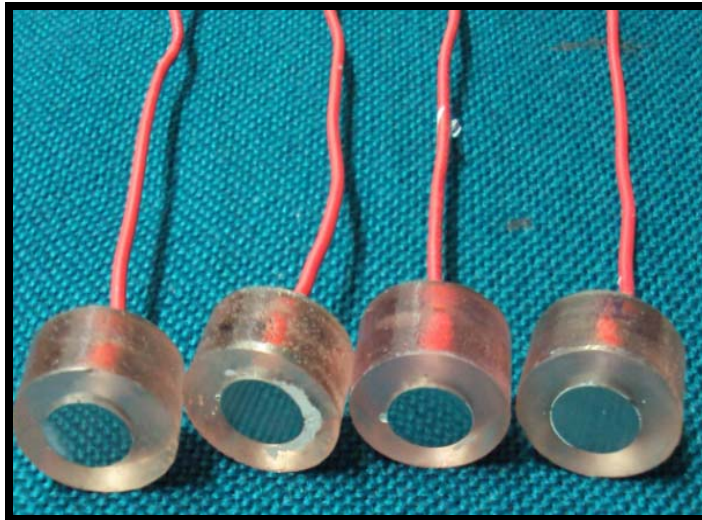


Fuente: Los Autores

#### 4.4 CORTE Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas se obtuvieron de un corte transversal realizado a una barra cilíndrica de acero inoxidable AISI SAE 304; éstas se cortaron mediante un disco de diamante, obteniendo probetas de aproximadamente, 15 mm de diámetro y 15 mm de espesor. Posteriormente, las probetas fueron soldadas a alambres de cobre aislados con el fin de hacer un contacto eléctrico para su funcionamiento como electrodo de trabajo y montadas en resina como se puede observar en la fotografía 1. Una vez acondicionadas las probetas fueron pulidas con papel abrasivo de carburo de silicio desde 80 hasta 600, desengrasadas con agua y etanol, y secadas con aire caliente como lo establece la Norma ASTM E3-01.

**Fotografía 1. Montaje de probetas en resina**



Fuente: Los Autores

#### 4.5 ANALÍISIS METALOGRAFICO

Para el análisis metalográfico se tomaron varias probetas, las cuales fueron llevadas hasta papel de carburo de silicio 600, seguida de un pulido mecánico en

paños (fino y grueso) con alúmina de granulometría desde 3 a 0,05  $\mu\text{m}$  y atacadas electrolíticamente, ver tabla 1.

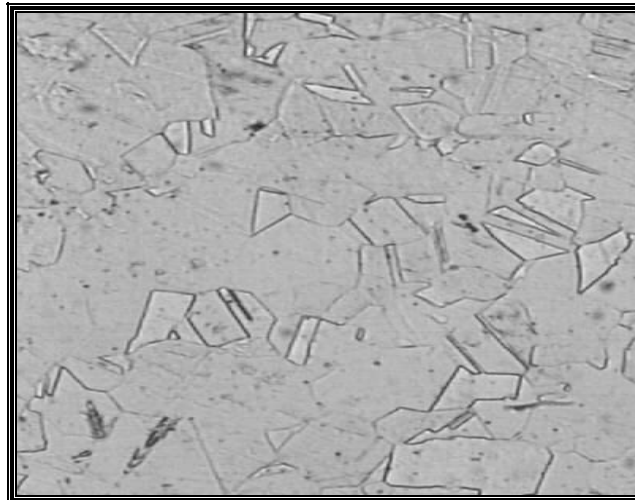
**Tabla 1. Ataque electrolítico**

Electrolito	10 gr. Ácido Oxálico 100cc de agua destilada
Temperatura	24°C
Condición Eléctricas	6 Volts.
Material Cátodo	Acero Inoxidable
Tiempo	Variable

Fuente: G. L. Kehl. Fundamentos teóricos de la práctica metalúrgica.

Después del ataque electrolítico y mediante el analizador de imágenes LEICA Q500MC, se identificó la microestructura de granos austeníticos, propia de este tipo de acero a un aumento 200X, como se puede observar en la fotografía 2.

**Fotografía 2. Microestructura del acero AISI SAE 304**



Fuente: Los Autores

#### 4.6 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE TRABAJO

Como medio corrosivo se preparó, tres soluciones de agua destilada con diferentes porcentajes de NaCl, grado analítico con el fin de simular las características propias de una salmuera, ver tabla 2.

**Tabla 2. Descripción de las soluciones de trabajo**

	<b>Volumen Solución (L)</b>	<b>% p/p de NaCl</b>	<b>Peso de NaCl (g)</b>
<b>Solución 1</b>	50	1.5	750
<b>Solución 2</b>	50	2.5	1250
<b>Solución 3</b>	50	3.5	1750

Fuente: Los Autores

#### 4.7 VARIABLES DEL SISTEMA

Para evaluar la influencia de cada variable independiente y su relación con la variable dependiente, se desarrolló un diseño experimental factorial a dos niveles  $2^k$  para los ensayos de erosión-corrosión, que junto a las pruebas de condiciones estáticas, permite determinar el número de ensayos a realizar para obtener la mayor información posible sobre el proceso en estudio, ver tabla 3.

**Tabla 3. Variables del proceso experimental**

EQUIPO	PRUEBAS	VELOCIDAD DE IMPACTO m/s	ÁNGULO DE IMPACTO	CONCENTRACIÓN DE SOLUCIÓN NaCl p/p	T(°C)	OBJETIVO
BANCO PARA PRUEBAS DE CORROSIÓN-EROSIÓN SPEVCEM 2742	RP EIS TAFEL	4	10	1.5%	Ambiente	Velocidad de Corrosión
		5,5	50	2.5%		
		7	90	3.5%		

Fuente: Los Autores

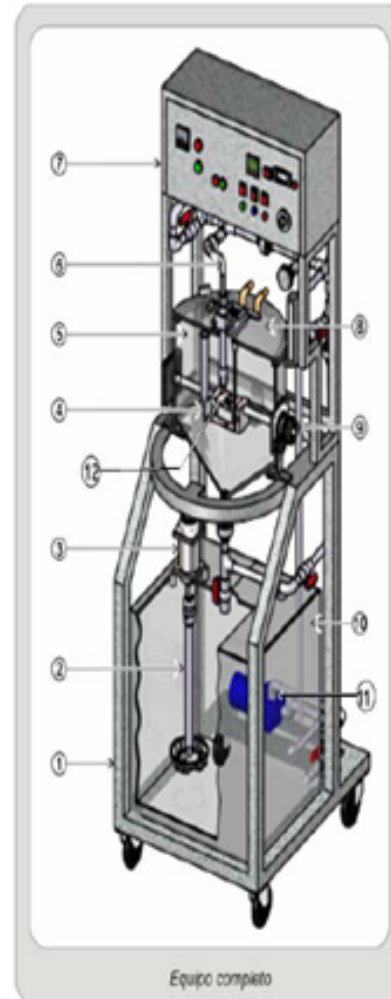
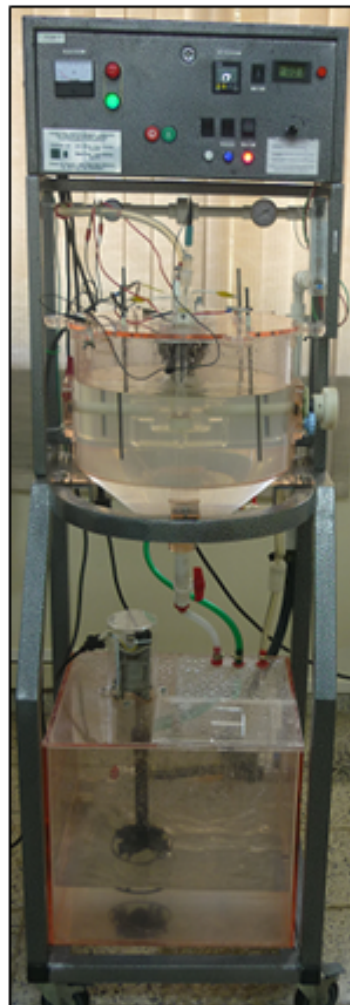
#### 4.8 ACONDICIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS

Para el desarrollo de la presente investigación, se utilizó el banco de pruebas **SPEVCEM2742** para evaluar los efectos de la erosión-corrosión en materiales metálicos el cual se encuentra en el Grupo de Investigación en Corrosión de la Universidad Industrial De Santander (GIC), el cual funciona de la siguiente manera: una solución de cloruro de sodio (NaCl) es recirculada por una bomba centrífuga desde un tanque de almacenamiento con capacidad de 100 litros hasta una boquilla por medio de una línea de tubería de ½”, donde se acelera la solución para impactar la cara plana de una probeta. Esta última se encuentra conectada por medio de un cableado al tablero de control, se establece el puerto de conexión con el potencióstato, y se controlan las puestas en marcha y parada de los diferentes equipos (bomba y agitador).

La muestra se ubica en su respectiva portaprobetas, el cual es un dispositivo mecánico que permite variar el ángulo de impacto, respecto a la normal entre el eje de simetría del flujo y la superficie de la probeta en cualquier ángulo preestablecido entre 0° y 90°.

Después de impactar la probeta, el fluido pasa desde la celda de carga hasta el tanque de almacenamiento. Esta celda de carga conecta al tanque por dos líneas de evacuación: una superior, que sirve como control de nivel, y una inferior, que sirve como línea de descarga al tanque de almacenamiento; en el tanque de almacenamiento se encuentra un dispositivo encargado de mantener la homogeneidad de la mezcla durante la prueba. La velocidad de impacto del chorro en el *SPEVCEM2742* se permite controlar de dos formas, a través de válvulas que restringen el flujo y/o regulando el voltaje del motor de la bomba centrífuga por medio de un variador de voltaje. La velocidad máxima de impacto desarrollada por el equipo es de 7 m/s sobre la muestra y una mínima monitoreable de 2 m/s, (ver fotografía 3).

**Fotografía 3. Banco de pruebas erosión-corrosión SPEVCEM2742**



Lista de partes equipo SPEVCEM2742			
Nº	Nombre	Nº	Nombre
1	Estructura	7	Caja de control
2	Eje	8	Tapa Celda de Carga
3	Motor-Reductor Dispositivo de Agitación	9	Mecanismo Variador de Angulo
4	Mecanismo Portaprobeta	10	Tanque de Almacenamiento
5	Celda de Carga	11	Bomba centrifuga
6	Línea Conexión Boquilla	12	Boquilla(Acero inoxidable 4mm-1/2 ")

Fuente: TORRES, M., SEBA, J. Diseño, construcción, montaje y puesta a punto de un banco de pruebas para evaluar la corrosión erosión en materiales metálicos. Universidad Industrial de Santander. 2008.

#### 4.9 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Las mediciones electroquímicas de las distintas pruebas EIE, Tafel y Rp (ver anexo A) se efectuaron mediante el potencióstato-galvanostato GAMRY PC4/750 bajo apoyo de un sistema de cómputo para la visualización de las gráficas, ver fotografía 5. Todas las pruebas se llevaron a cabo acorde a las condiciones de cada ensayo. La tabla 4 detalla la matriz experimental para los ensayos realizados.

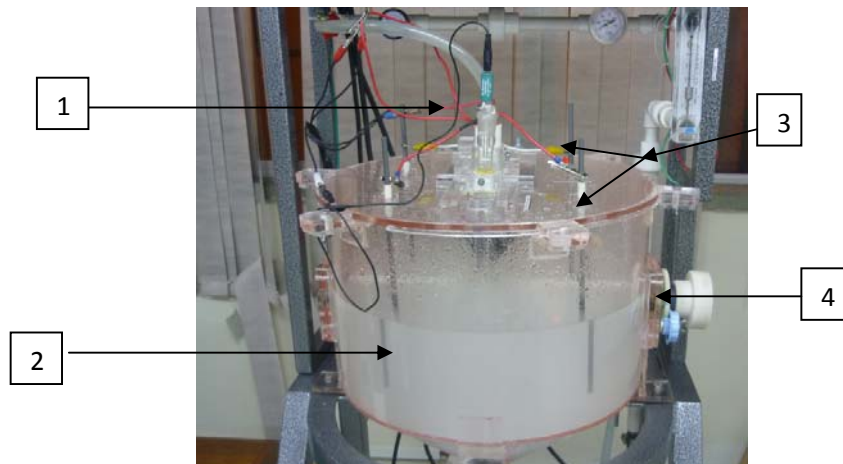
**Tabla 4. Matriz de pruebas erosión- corrosión**

ENSAYO	VELOCIDAD DE IMPACTO (m/s)	CONCENTRACIÓN (%p/p)	ÁNGULO(°)	ENSAYOS A REALIZAR
1	4 (0.8 GPM)	1.5	90	RP EIE TAFEL
2	4	1.5	10	
3	4	3.5	90	
4	4	3.5	10	
5	7 (1.4 GPM)	1.5	90	
6	7	1.5	10	
7	7	3.5	90	
8	7	3.5	10	
9	5.5 (1.1 GPM)	2.5	50	
10	5.5	2.5	50	
11	ESTÁTICA	1.5	-----	
12	ESTÁTICA	2.5	-----	
13	ESTÁTICA	3.5	-----	

Fuente: Los autores

La fotografía 4 muestra detalladamente los componentes de la celda de impacto del equipo.

#### Fotografía 4. Celda carga



Fuente: Los Autores

1. Electrodo de referencia Ag/AgCl.
2. Solución de trabajo.
3. Contraelectrodos de grafito.
4. Perilla para ajustar ángulos de impacto.

#### Fotografía 5. Potenciostato GAMRY PC4/750 y sistema de computo



Fuente: Los autores

Para cada desarrollo de las pruebas electroquímicas fue necesario estabilizar el potencial del electrodo de trabajo antes de cada ensayo, por lo cual se procedió a determinar el potencial de circuito abierto (*PCA*) para cada una de las probetas durante 10 a 15 minutos, según la norma *ASTM G-5-94 "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements"*.

Las simulaciones mostradas en la tabla 7 para los circuitos equivalentes del numeral 5.2.4 se realizaron en el software z-view 2.9.

Los diagramas de Pourbaix mostrados en las figuras 10 y 11 para los sistemas Fe-Cl-H<sub>2</sub>O y Cr-Cl-H<sub>2</sub>O a 25 °C, respectivamente, se realizaron en el software *OUTOKUMPU HSC CHEMISTRY*<sup>®</sup>, que se encuentra en la sala de cómputo de la escuela de Ingeniería Metalúrgica-UIS.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y se analizan los resultados de cada una de las pruebas electroquímicas desarrolladas. Se mostrarán los resultados de las pruebas de Impedancias (*EIE*), Resistencia a la Polarización Lineal (*RPL*) y Curvas Tafel, de acuerdo con las actividades propuestas en la Metodología.

En la tabla 5 y tabla 6, se presentan los resultados del análisis de la composición química y la dureza determinada del material del material de trabajo sobre el cual, se determinaron las velocidades de corrosión a diferentes concentraciones del electrolito, ángulos de impacto y velocidades de impacto de la solución.

**Tabla 5. Composición Química**

Elemento	Fe	Cr	Ni	Mn	S	P	Si	C	Mo	N
<b>Composición % AISI SAE 304</b>	70,5	17,7	8,74	1,32	0,03	0,04	0,5	0,03	0,27	0,135

Fuente: Técnica de espectroscopia de emisión de chispa Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja.

**Tabla 6. Determinación de dureza del acero AISI SAE 304**

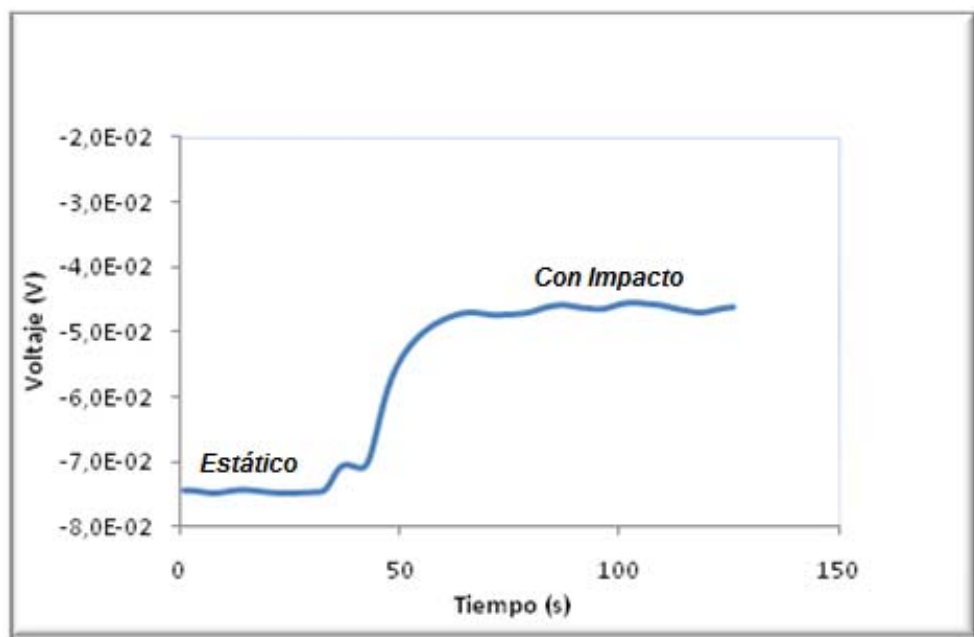
Puntos	Dureza Rockwell A	Dureza Brinell
1	53	145
2	52	140
3	51	137
4	52	140
5	53	145
6	52	140
Dureza promedio	52	140

Fuente: Medidor de dureza Clark (Hardness Tester - UIS)

## 5.1. POTENCIAL DE CORROSIÓN

En la gráfica 1 se observa la variación del *Potencial de Circuito Abierto (PCA)* por el impacto de la salmuera a una velocidad de 4 m/s (velocidad mínima de ensayo), donde se muestra el desplazamiento del potencial hacia valores más nobles. El tiempo total de estabilización dinámico fue aproximadamente dos (5) minutos. Primero se procedió a estabilizarlo estáticamente por 15 minutos y luego se impactó la probeta con la salmuera y se registró la variación del *PCA*.

**Gráfica 1. Variación del PCA por impacto de una salmuera sobre el acero AISI-SAE 304 a una velocidad de 4 m/s.**



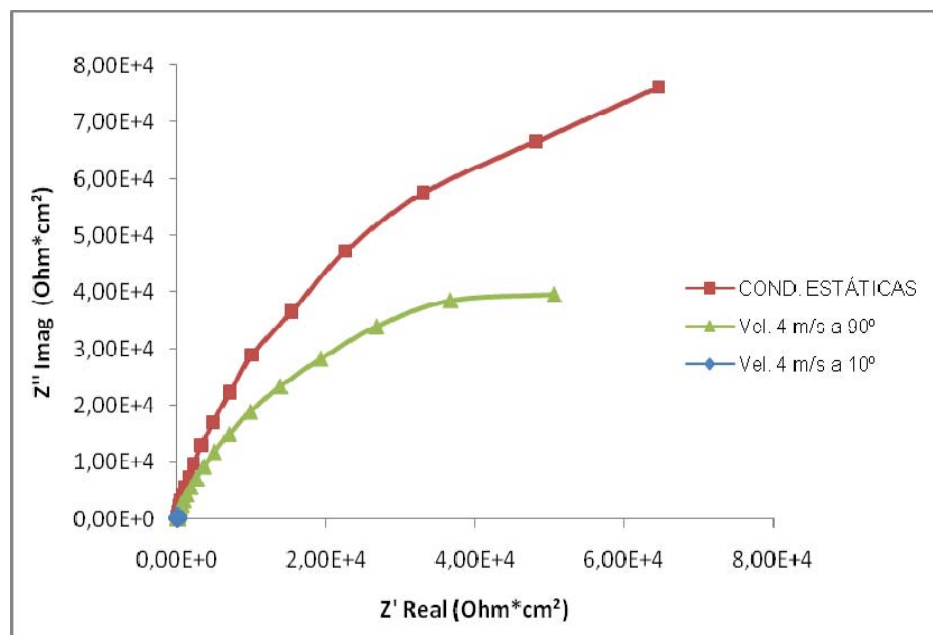
Fuente: Los Autores.

## 5.2. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIE)

**5.2.1. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 1,5 % p/p.** En las gráficas 2 y 3 se muestran los diagramas de Nyquist a diferentes

velocidades y ángulos de impacto de chorro sumergido a una concentración de salmuera de 1,5 % de NaCl. Se evidenció un comportamiento electroquímico diferente, ya que a medida que decrece el ángulo de impacto desde 90° a 10° a una misma velocidad, ocurre una disminución del valor de *Resistencia a la Polarización (RP)*, lo cual se ve de manera gráfica en la disminución del arco del domo del Nyquist. Esto quiere decir que aquellas condiciones que exhiben un menor diámetro del domo de los diagramas de Nyquist presentan una mayor velocidad de corrosión. Comparando las gráficas 2 y 3, se observa que a medida que aumenta la velocidad de impacto, para un mismo ángulo, ocurre una disminución del valor de *Resistencia a la Polarización (RP)*.

**Gráfica 2. Pruebas EIE con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.**



Fuente: Los Autores.

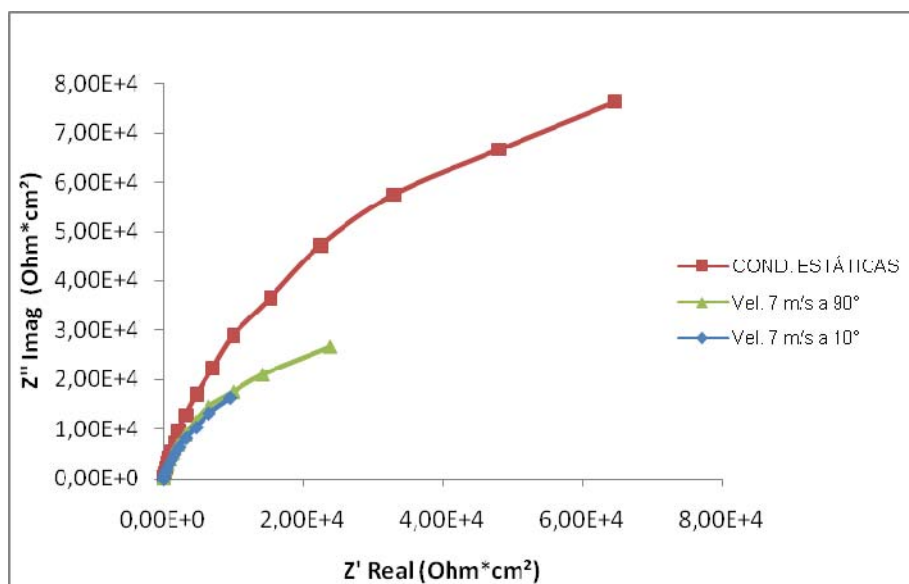
En las gráficas de las impedancias se observa la comparación de los resultados obtenidos de las diferentes condiciones de trabajo con el “Blanco” que en este caso, es el ensayo a condiciones estáticas, o es decir la prueba se realizó sin impacto de chorro. La prueba estática presentó un mayor valor de *RP*, esto se

puede explicar de la siguiente manera: el impacto de la salmuera sobre la superficie del acero inoxidable *AISI-SAE 304* debilita o remueve la capa pasiva característica de este tipo de materiales lo que conlleva a un aumento de la velocidad de corrosión.

Como se observa en estas figuras todos los diagramas de Nyquist son semicírculos casi perfectos característicos de un proceso controlado por transferencia de carga, cabe resaltar que los semicírculos presentan una pequeña depresión del arco del domo a lo largo del eje de  $Z'_{Real}$  cuya causas posibles son el incremento de la rugosidad superficial o por efectos geométricos que conllevan a una repartición no homogénea de la densidad de corriente sobre la superficie del material.<sup>23</sup>

En las gráficas 2 y 3 se observa que los semicírculos del Nyquist se muestran parcialmente, es decir, el semicírculo no cierra completamente a bajas frecuencias. Esta situación es propia de una relación RC grande (donde R es la resistencia y C la capacitancia del material), característica de metales pasivos.<sup>24</sup>

**Gráfica 3. Pruebas EIE NaCl 1,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.**



Fuente:

Los  
56

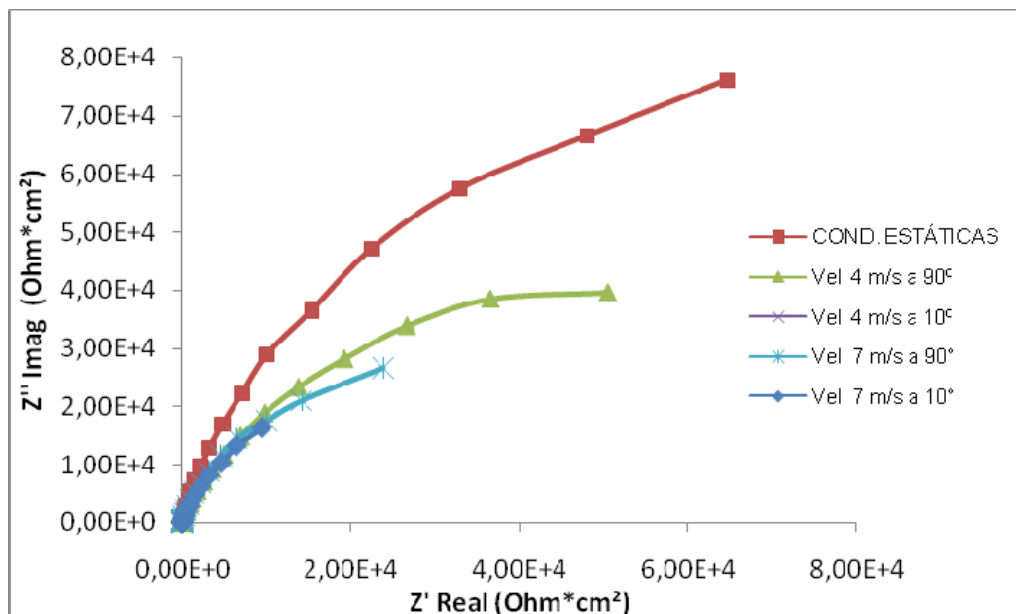
Autores.

En los diagramas de Nyquist mostrados anteriormente no se evidencia la *Resistencia de la solución (Rs)*, que debe calcularse en el límite a altas frecuencias del eje  $Z'_{Real}$  como un desplazamiento del domo hacia la derecha del eje. Esto se debe a que la *Rs* de la salmuera es muy pequeña (debido a su conductividad elevada).

En la gráfica 3 de las pruebas EIE a 7 m/s a 90° y 7 m/s a 10° no se observa diferencia apreciable en los diámetros del domo del Nyquist, esto se debe a que posiblemente los valores de *Rp* son muy cercanos entre sí.

En la gráfica 4 se observan todas las pruebas EIE NaCl 1,5% p/p donde se comprueba que el domo del diagrama del Nyquist disminuye, comparando la condición estática con las dinámicas, de igual forma se observa que a medida que disminuye el ángulo de choque desde 90° a 10° y aumenta la velocidad de impacto de la salmuera, disminuye el valor de la resistencia a la polarización *Rp*.

**Gráfica 4. Pruebas EIE NaCl 1,5% p/p comparación todas las condiciones.**



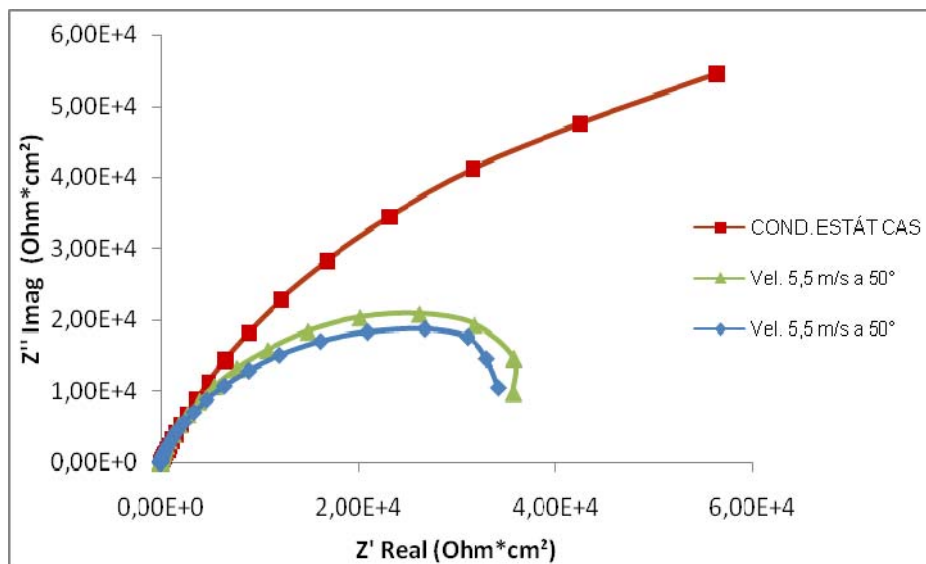
Fuente: Los Autores.

**5.2.2. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.** En el diagrama de Nyquist de la gráfica 5 se observa el mismo comportamiento reportado en los ensayos anteriores, donde el “blanco” a condiciones estáticas presenta un valor mayor de Resistencia a la Polarización en comparación con el ensayo a velocidad a 5,5 m/s a 50°. De acuerdo a la tabla 6 donde se muestra la matriz de pruebas de corrosión- erosión que determinó el diseño experimental, donde se indica que en las condiciones intermedias (velocidad de 5,5 m/s y ángulo de 50°) es necesario realizar una prueba repetitiva.

Como se puede observar, los domos de los diagramas de Nyquist del ensayo y su repetición no difieren significativamente en cuanto a forma, altura y valor de resistencia a la polarización ( $R_p$ ).

La distorsión del semicírculo a bajas frecuencias ocurre o puede estar asociada a efectos corrosivos de disolución en la superficie de la probeta o rugosidad superficial.<sup>25</sup>

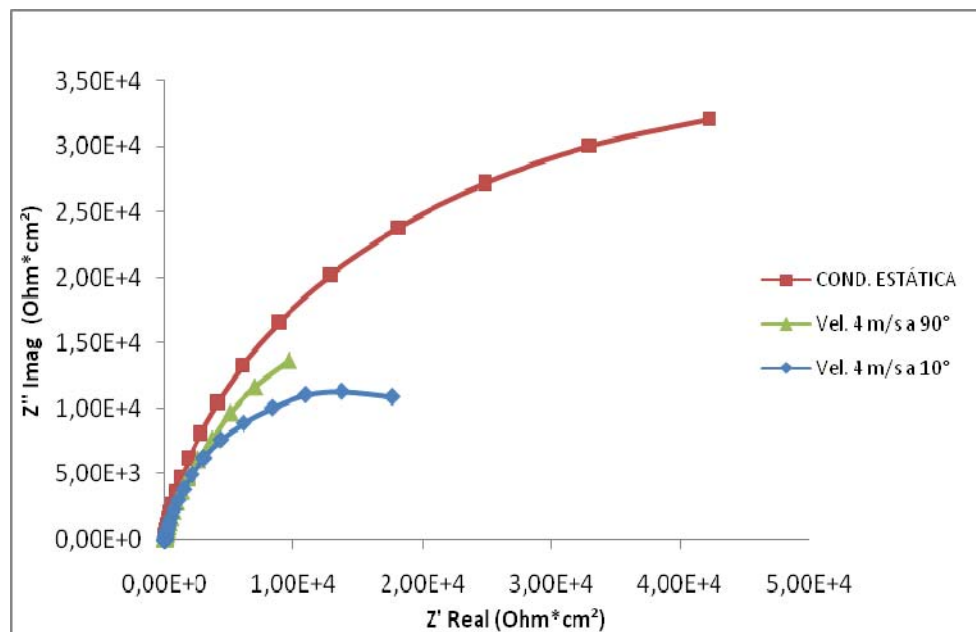
**Gráfica 5. Pruebas EIE NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°**



Fuente: Los Autores.

**5.2.3. Diagramas de Nyquist para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % p/p.** En este tipo de diagramas se observó el mismo comportamiento descrito en los numerales 5.2.1 y 5.2.2, en el cual se evidenció que a medida que se aumenta la velocidad (de estática a dinámicas) aumenta la corrosión, mostrado en un decrecimiento del domo del Nyquist debido al rompimiento o remoción de la capa pasiva por efecto del impacto y por acción de los iones de  $\text{Cl}^-$  que penetran y deterioran la película protectora de óxido de cromo <sup>13</sup>, (ver gráfica 6).

**Gráfica 6. Pruebas EIE NaCl 3,5 % p/p a 4 m/s a 90° y a 10°**



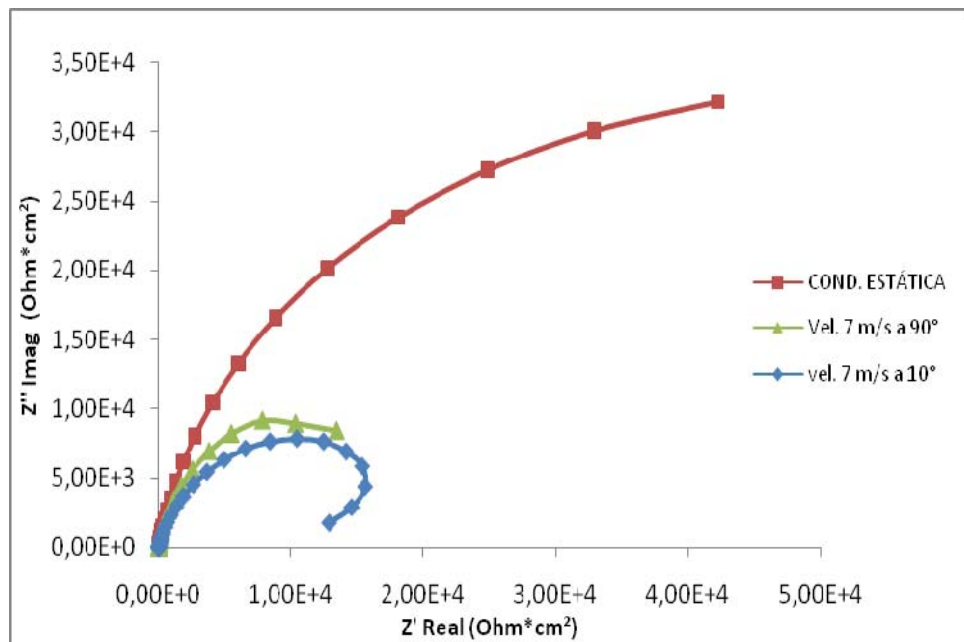
Fuente: Los Autores.

Como se observa en estas figuras todos los diagramas de Nyquist son semicírculos casi perfectos característicos de un proceso controlado por transferencia de carga como se expuso previamente.

En la gráficas 6 y 7 se observa que a medida que el ángulo disminuye de 90° a 10°, disminuye el valor de  $R_p$ , lo que conlleva a un aumento de la velocidad de corrosión para ambas velocidades de ensayo (4 m/s y 7 m/s), esto se evidencia

gráficamente en la disminución del domo del diagrama del Nyquist comportamiento característico de los materiales dúctiles cuyo ángulo máximo donde ocurre la erosión mayor es cercano a los 20°. <sup>12</sup>

**Grafica 7. Pruebas EIE NaCl 3,5 % p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.**



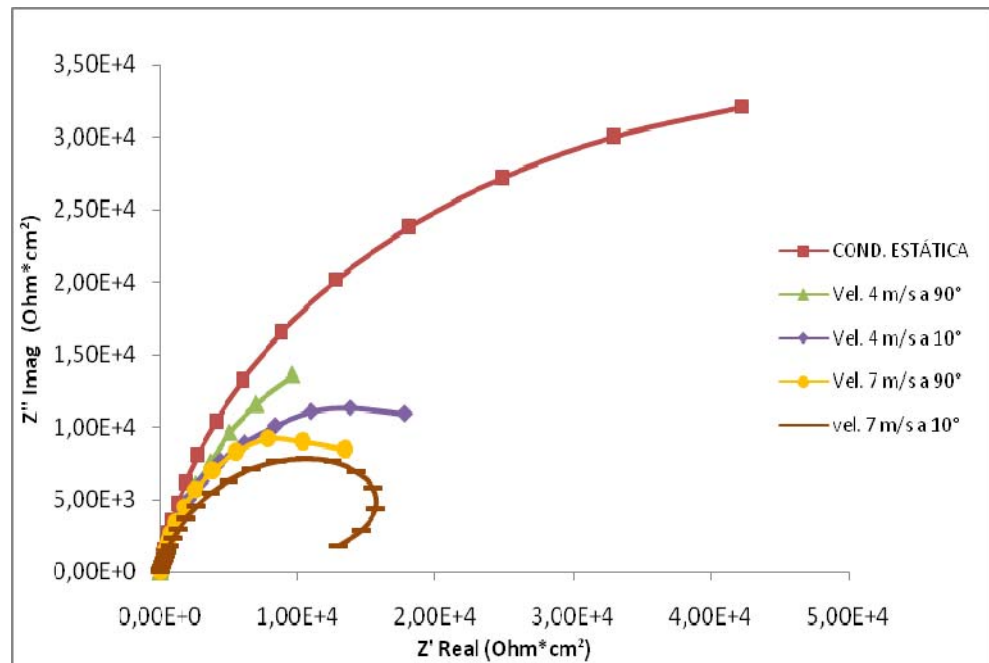
Fuente: Los Autores.

En la gráfica 7, a la condición de ensayo a velocidad de 7 m/s a 10° se observa un cerramiento del domo a bajas frecuencias, este cerramiento no alcanzó a traslapar el eje Z' Real, por lo cual no se puede catalogarlo como típico comportamiento de arco inductivo, y su presencia se puede explicar de la siguiente manera; la distorsión del semicírculo a bajas frecuencias ocurre o puede estar asociado a efectos corrosivos de disolución en la superficie de la probeta. <sup>25</sup>

En la gráfica 8 los diagramas de Nyquist para estas condiciones de ensayo evidenciaron que la resistencia a la polarización disminuye a medida que aumenta

la velocidad del fluido, lo que indica que la velocidad de corrosión aumenta posiblemente debido a la disminución o rotura de la capa pasiva.

**Gráfica 8. Pruebas EIE 3,5% NaCl p/p comparación todas las condiciones.**



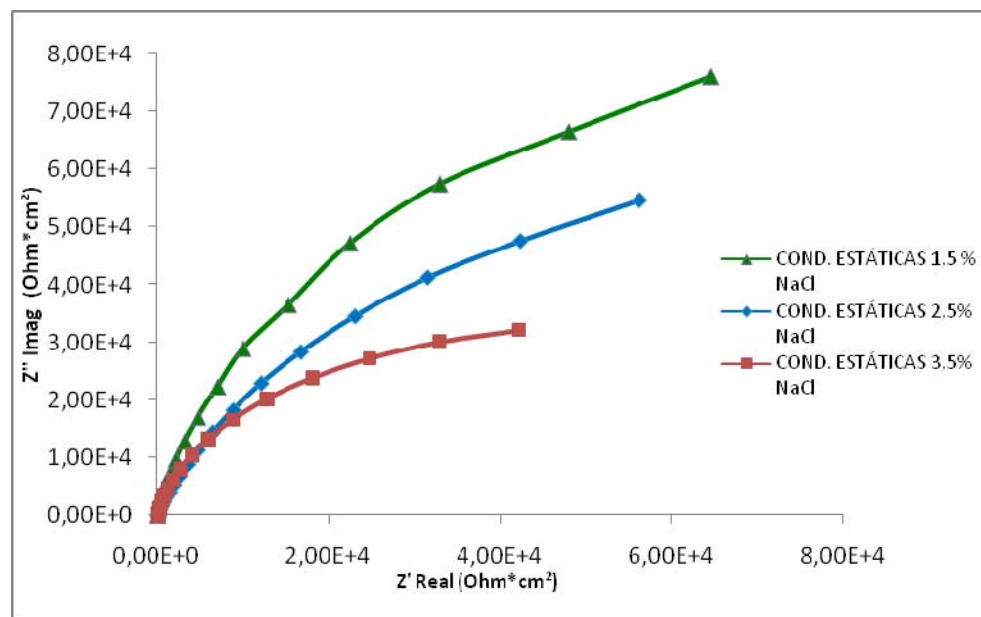
Fuente: Los Autores.

Por otra parte, el comportamiento con referencia al ángulo de impacto, muestra que a medida que el ángulo decrece de la posición de incidencia normal hasta 10°, la resistencia a la polarización  $R_p$  disminuye, lo que indica un aumento en la velocidad de corrosión, lo que concuerda con lo expuesto en los párrafos anteriores, cuyo comportamiento se vio reflejado a lo largo de los ensayos.

Cabe resaltar, que en las gráficas de las EIE a 1.5% de NaCl, las de 2.5% de NaCl y las de 3.5% p/p de NaCl, el semicírculo capacitivo muestra la influencia de las propiedades dieléctricas de la doble capa electroquímica, evidenciado en los domos casi perfectos mostrados, los cuales son característicos de un proceso controlado por transferencia de carga.

En los diagramas Nyquist de la gráfica 9 se aprecian las diferentes condiciones estáticas a distintas concentraciones de cloruros, cuyos domos muestran que a medida que se incrementa el porcentaje de cloruros, disminuye la resistencia a la polarización, lo que indica aumento en la velocidad de corrosión. Una información de suma importancia que muestran los gráficos de impedancias es la resistencia de la solución ( $R_s$ ), la cual no se aprecia en las curvas del Nyquist pero juega un papel importante en los procesos corrosivos de esta investigación, ya que a medida que aumenta la cantidad de sal en solución esta se hace más conductora favoreciendo los reacciones de corrosión, el paso de corriente, y posteriormente el deterioro de la capa pasiva de acero inoxidable por mayor cantidad de ataque de los cloruros.

**Grafica 9. Diagramas Nyquist obtenidos en condiciones estáticas a diferentes concentraciones de salmuera.**



Fuente: Los Autores.

**5.2.4. Circuitos Eléctricos Equivalentes.** Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos (resistencias, capacitancias, inductores y otras

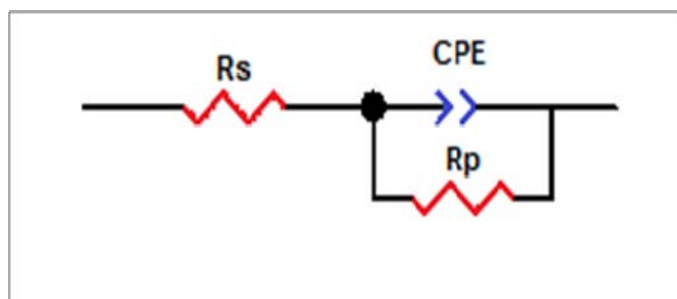
formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta, a toda frecuencia, de una celda de corrosión.<sup>24</sup>

Cuando el análisis de los datos de EIE se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtiene los diferentes valores de parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, Tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión.<sup>24</sup>

Tomando como base el análisis anterior se propuso un modelo de circuito equivalente para tratar de interpretar el significado de la celda electroquímica el cual fue validó para todos los diagramas de impedancia. La figura 9, muestra el circuito equivalente que consta de  $R_s$  que es la resistencia de la solución, un elemento de fase constante ( $CPE$ ) que se asocia al comportamiento de la capacitancia de la doble capa electroquímica y que está en paralelo con  $R_p$ , que es la resistencia a la polarización del material.

Para el análisis por circuitos equivalentes se tomaron los resultados de las EIE realizadas en la salmuera de 3,5% de NaCl con las que se obtuvieron las mayores velocidades de corrosión, y por lo tanto, mayor deterioro de la superficie del material.

**Figura 9. Circuito equivalente para el sistema metal - salmuera 3,5 % p/p NaCl.**



Fuente: Los Autores.

En la tabla 7 se adjuntan los valores de los elementos de los circuitos eléctricos resultantes del ajuste de los datos experimentales de los ensayos al acero AISI-SAE 304 en la solución a 3,5% p/p de NaCl. En los anexos C al G, se presentan los circuitos equivalentes para cada una de las pruebas, los respectivos diagramas de Bode y las simulaciones respectivas. El CPE consta de 2 componentes CPE-T (transferencia de carga) y CPE-P (fase de la capacitancia).

**Tabla 7. Valores de resistencias y capacitancias para el sistema metal – Salmuera 3,5 % p/p NaCl**

CONDICIONES EXPERIMENTALES	Rs (Ohm*cm <sup>2</sup> )	CPE (F)		Rp (Ohm*cm <sup>2</sup> )
		CPE-T	CPE-P	
<b>COND. ESTÁTICAS</b>	3,002	1,29E-04	8,91E-01	68182
<b>Vel = 4 m/s a 90°</b>	3,451	7,21E-05	8,41E-01	45503
<b>Vel = 4 m/s a 10°</b>	1,321	8,34E-05	8,71E-01	26934
<b>Vel = 7 m/s a 90°</b>	3,929	5,24E-05	8,81E-01	22555
<b>Vel = 7 m/s a 10°</b>	2,246	8,21E-05	8,44E-01	18651

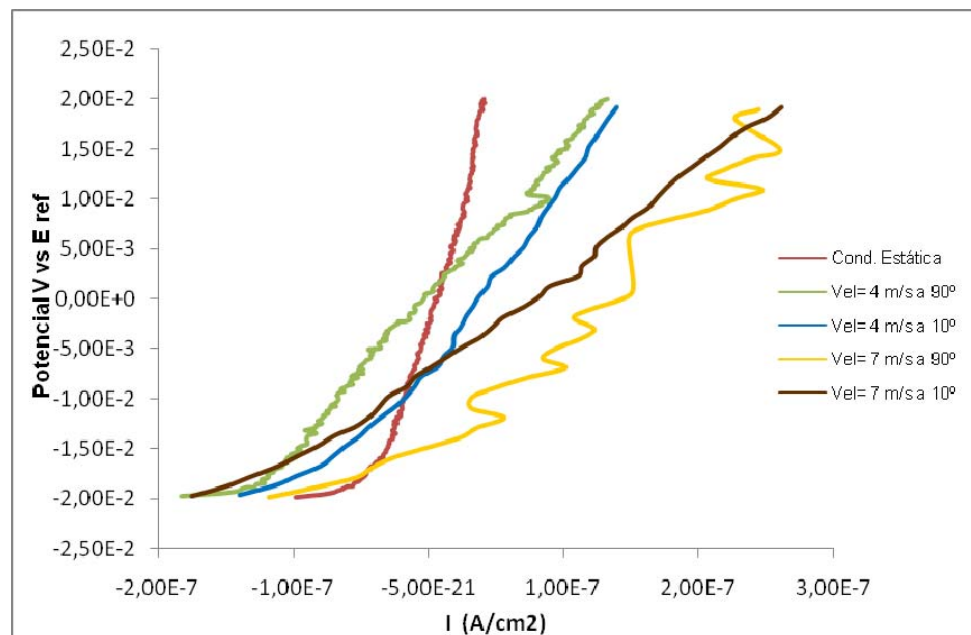
Fuente: Los Autores.

### 5.3. MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL).

**5.3.1. Diagramas RPL Para Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 1,5 % p/p.** En la gráfica 10, se muestran los diagramas de polarización del acero inmerso en la salmuera a 1,5 % p/p de NaCl en condiciones estáticas, a diferentes velocidades y ángulos de impacto. Se puede observar que la resistencia a la polarización disminuye (valores menores de pendiente) a medida que aumenta la

velocidad de impacto, de 4 a 7 m/s. A su vez, la  $R_p$  disminuye a medida que decrece el ángulo de choque de  $90^\circ$  a  $10^\circ$ . Este comportamiento es análogo al que se indicó en la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímicas (EIE), descrito en los párrafos anteriores, para todas las condiciones experimentales.

**Gráfica 10. Pruebas RPL con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a  $90^\circ$  y a  $10^\circ$ .**



Fuente: Los Autores.

En la gráfica 3 de las pruebas EIE se observó que las condiciones experimentales a 7 m/s a  $90^\circ$  y 7 m/s a  $10^\circ$  con NaCl 1,5% p/p, no mostraron diferencias apreciables en el diámetro del domo del Nyquist, esto se ratifica en el diagrama de  $R_p$ , donde se observan pendientes similares.

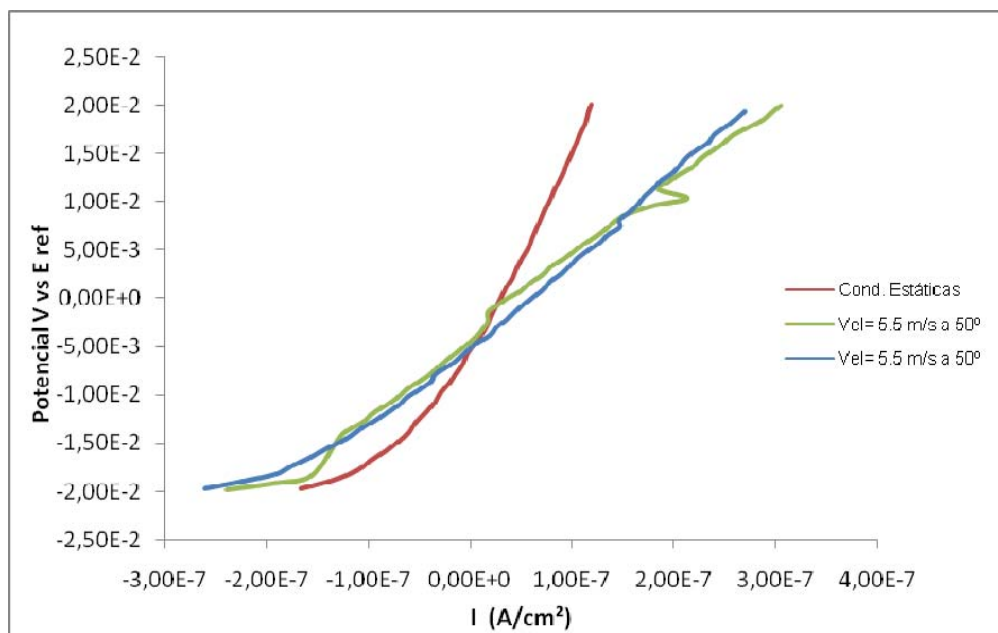
Cabe resaltar que las gráficas de  $R_p$  presentan ruido, alteraciones o perturbaciones a lo largo de su recorrido debido al efecto del impacto de la salmuera sobre la superficie del metal que conlleva a desplazamientos del potencial.

### 5.3.2. Diagramas RPL para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.

En la gráfica 11 se muestran los diagramas de polarización para el acero inmerso en la salmuera a 2.5 % en peso de NaCl en condiciones estáticas y a una velocidad y ángulo de impacto de 5.5 m/s a 50° respectivamente. En condiciones estáticas, el acero presentó valores mayores de pendiente, lo que indica un mayor valor de  $R_p$  y por tanto, mayor resistencia a la corrosión comparada con las condiciones dinámicas de velocidad a 5.5 m/s y 50° de ángulo de impacto.

De igual manera se observa, en la condición dinámica, una buena reproducibilidad de los resultados, lo que garantiza la fiabilidad de los mismos.

**Gráfica 11. Pruebas RPL con NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°.**



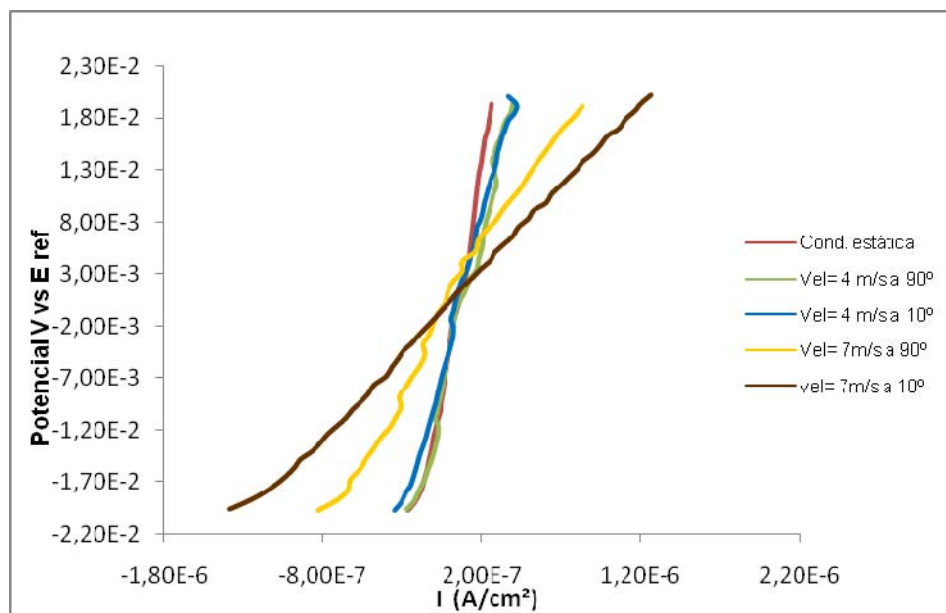
Fuente: Los Autores.

### 5.3.3. Diagramas RPL para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % p/p.

Se observa en la gráfica 12 los diagramas *RPL*, en donde a medida que aumenta la velocidad de impacto y el ángulo decrece de 90° a 10° disminuye la resistencia

a la polarización y por ende mayor velocidad de corrosión, este mismo comportamiento se observó para todas las concentraciones.

**Gráfica 12. Pruebas RPL con NaCl 3,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.**



Fuente: Los Autores.

Todas las gráficas de RPL mostradas anteriormente fueron utilizadas para determinar la resistencia a la polarización  $R_p$  del material de trabajo, para esto se ajustó cada una de las curvas con un polinomio de segundo grado, para así obtener la ecuación que representa cada gráfica y determinar la pendiente de la curva (valor de  $R_p$ ).

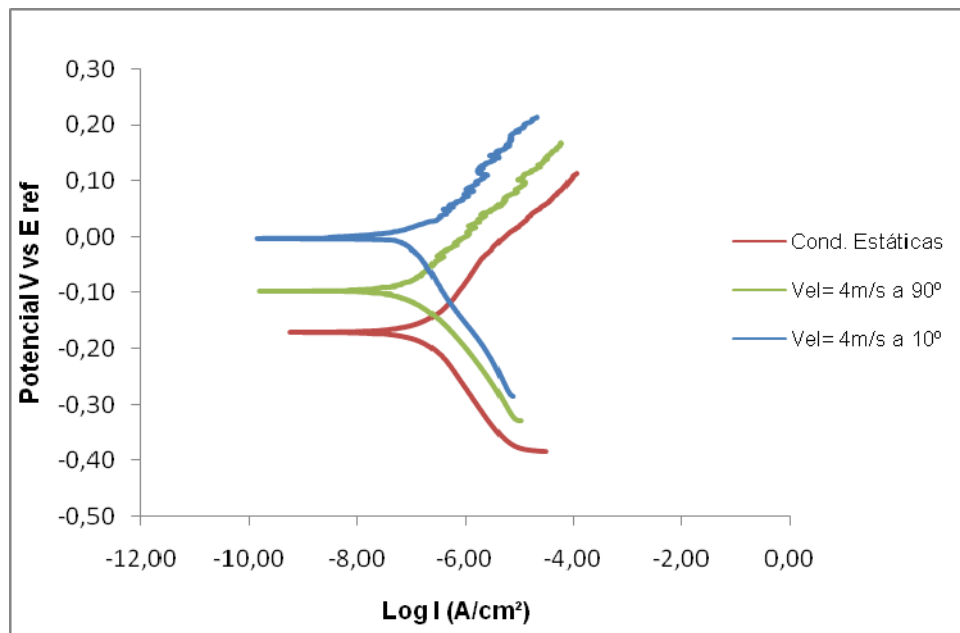
En los anexos H al J se detallan cada una de las curvas con sus respectivos polinomios de tendencia.

## 5.4. EXTRAPOLACIÓN DE CURVAS TAFEL

En esta sección se analizaron los datos obtenidos por medio de la extrapolación de las curvas Tafel. El método utilizado para el cálculo de las pendientes catódica y anódica para los electrodos de trabajo fue realizado según la norma *ASTM G-102-99*.

**5.4.1. Curvas Tafel para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 1,5 % p/p.** En la grafica 13 se observa que el potencial de corrosión se hace más positivo a medida que disminuye el ángulo de impacto, de igual manera al comparar la condición estática con las dinámicas, aumenta el potencial.

**Gráfica 13. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.**



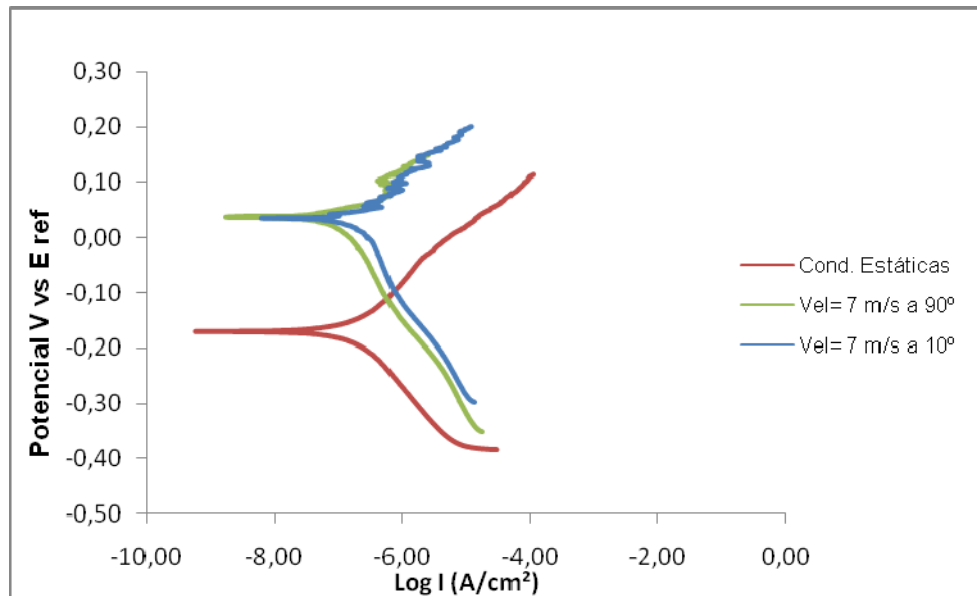
Fuente: Los Autores.

Del mismo modo se aprecia un leve aumento de la densidad de corriente al aumentar la velocidad de impacto (de estática a dinámica) y disminuir el ángulo

de choque de 90° a 10°, lo que conlleva a un aumento en la velocidad de corrosión.

En la gráfica 14 se evidencia un comportamiento similar a lo expresado anteriormente. Se observa un aumento del potencial hacia valores más positivos y un aumento de las densidades de corriente, a medida que aumenta la velocidad de impacto (comparando la condición estática y las condiciones dinámicas) y decrece el ángulo.

**Gráfica 14. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.**

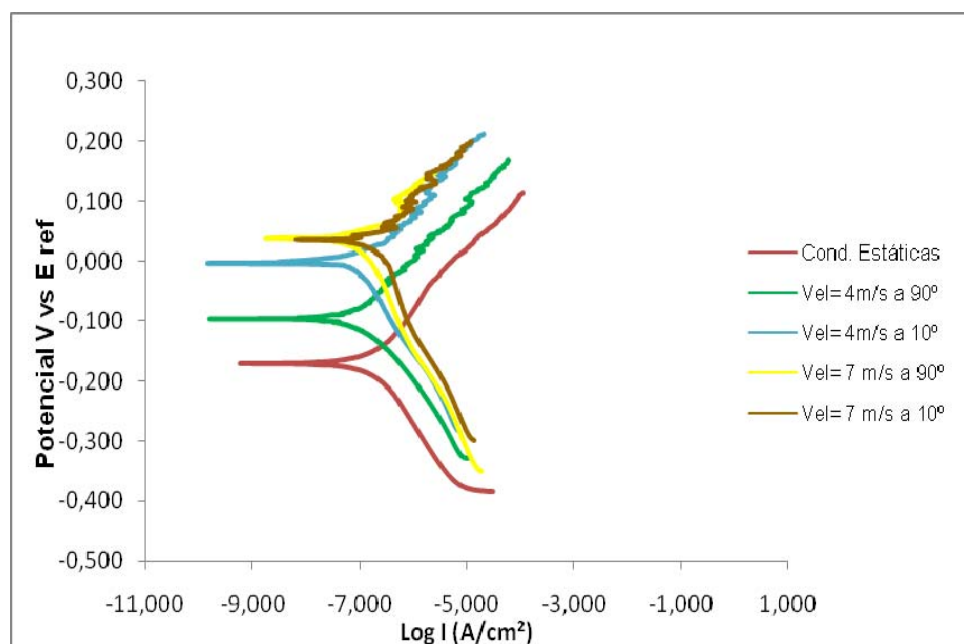


Fuente: Los Autores.

Es importante resaltar que posiblemente debido al impacto de la salmuera sobre la superficie del acero se presentaron ruido o perturbaciones en la rama anódica de las curvas Tafel, lo que dificultó en parte la realización con precisión de las extrapolaciones para hallar los valores de dicha pendiente.

En la gráfica 15 se muestran todas las condiciones de los ensayos Tafel a 1.5 % de salmuera donde se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente, comparando las diferentes velocidades a un mismo ángulo, se evidencia que a medida que aumenta la velocidad, aumenta la densidad de corriente y a medida que disminuye el ángulo de impacto de 90° a 10° manteniendo la velocidad constante, se observa de igual manera un incremento en la densidad de corriente.

**Gráfica 15. Curvas Tafel con NaCl 1,5% p/p todas las condiciones.**



Fuente: Los Autores.

En estas gráficas se observa que la etapa controlante es la transferencia de carga o activación, evidenciado por las pendientes de las curvas en las zonas anódica y catódica.

Por medio de estos diagramas de extrapolación se determinan las pendientes anódicas y catódicas, se calcularon los valores de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) y junto con los valores de  $R_p$  hallados con las curvas de

polarización mencionadas en el numeral 5.3 y anexo G al I, con el objetivo de calcular los valores de la velocidad de corrosión (*mpy*).

En la tabla 8 se anexan los valores de las extrapolaciones de Tafel,  $\beta_a$  y  $\beta_c$ , los valores de  $R_P$ ,  $i_{corr}$  y velocidad de corrosión en *mpy*.

Tabla 8. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 1,5 % p/p NaCl.

<b>EXTRAPOLACION DE CURVAS TAFEL*</b>						
<b>NaCl 1.5% p/p</b>	<b><math>\beta</math> anódico (mV/década)</b>	<b><math>\beta</math> catódico (mV/década)</b>	<b>RP (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	<b>I corr (<math>\mu</math>A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E corr (V)</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mpy)</b>
<b>COND. ESTATICAS</b>	93,50	115,60	171094	1,99E-01	-0,171	7,57E-02
<b>Vel = 4 m/s a 90°</b>	51,50	51,60	127839	2,24E-01	-0,097	8,50E-02
<b>Vel = 4 m/s a 10°</b>	39,90	125,10	104603	2,51E-01	0,003	9,53E-02
<b>Vel = 7 m/s a 90°</b>	93,70	146,60	79995	2,69E-01	0,037	1,02E-01
<b>Vel = 7 m/s a 10°</b>	44,40	274,60	89011	3,16E-01	0,036	1,20E-01

Fuente: Los autores.

$$* mpy = 0,1218 * I_{corr} * PE / d$$

PE: peso equivalente = 25.12 g

d: Densidad = 8.06 g/cm<sup>3</sup>

En la tabla anterior se mostraron los valores de la extrapolación de Tafel, donde es importante recalcar:

Las condiciones experimentales que presentaron mayores velocidades de corrosión fueron la de velocidad de 7 m/s a 90°, seguido de 7 m/s a 10°, esto se evidencia en los valores  $R_p$  (comportamiento similar explicado en el análisis de la gráfica 3) y los valores  $i_{corr}$  de la tabla 8. De igual forma se observa ruido anódico en las condiciones dinámicas, que podría explicarse, en parte, por el impacto de la solución que dificulta hallar con precisión los valores de las pendientes  $\beta_a$  y  $\beta_c$ , o a algún regeneramiento no estable de la capa pasiva debido a la presencia de oxígeno disuelto en solución, ya que estas pruebas no son desaireadas.

El valor de la velocidad de corrosión para la prueba estática es la menor, en comparación con las demás pruebas, resultado que se esperaba, debido a los altos valores de  $R_p$  observados en la técnica de polarización lineal (*RPL*).

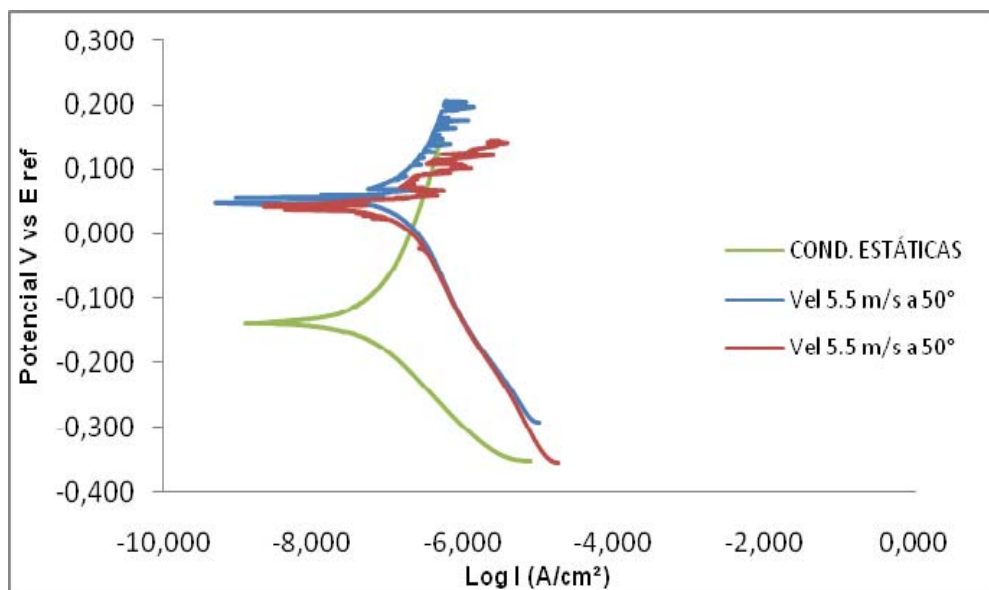
En general las  $\beta_a$  y  $\beta_c$  presentan valores disímiles entre sí y no se observa que tiendan a una corriente límite, lo que conlleva a decir que la etapa controlante del proceso es la activación por transferencia de carga. La prueba a 4 m/s a 90° presenta valores de pendiente cercanos, lo que da lugar de pensar, probablemente, que en esta prueba pudo haberse presentado un control mixto, que contrasta con lo dicho anteriormente.

#### **5.4.2. Curvas Tafel para pruebas realizadas con salmuera - NaCl 2,5 % p/p.**

Para estas pruebas se observa que se presenta el mismo comportamiento descrito en los numerales anteriores, es decir, la velocidad de corrosión aumenta a medida que aumenta la velocidad de impacto de la salmuera, se evidencia en las curvas por un desplazamiento hacia la derecha, hacia valores mayores de densidad de corriente de corrosión, a la vez se observa en las gráficas ruido anódico que puede indicar que hay rompimiento y estabilización de la capa pasiva o por otra

parte debido al impacto de la salmuera sobre la superficie del acero, que a su vez afectó las mediciones en la celda de carga a este ángulo en específico, ya que el electrolito después de impactar la probeta, impactaba el luggin donde se encontraba el electrodo de referencia de Ag/AgCl. Ver gráfica 16.

**Gráfica 16. Curvas Tafel con NaCl 2,5% p/p a 5.5 m/s a 50°.**



Fuente: Los Autores.

En la grafica anterior se puede ver que el ensayo a 5.5 m/s a 50° y su repetición presentan curvas muy similares, tendiendo valores parecidos de  $I_{corr}$ , que muestra la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados experimentales. Cabe resaltar, que debido al impacto de la salmuera.

En la tabla 9 se detallan los valores obtenidos en estas condiciones experimentales.

**Tabla 9. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 2.5 % p/p NaCl**

<b>NaCl 2.5% p/p</b>	<b><math>\beta</math> anódico (mV/década)</b>	<b><math>\beta</math> catódico (mV/década)</b>	<b>RP (<math>\Omega</math>h*cm<sup>2</sup>)</b>	<b>I corr (<math>\mu</math>A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E corr (V)</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mpy)</b>
<b>COND. ESTÁTICAS</b>	71,10	104,10	161190	6,31E-02	-0,140	2,39E-02
<b>Vel = 5,5 m/s a 50°</b>	6,90	130,90	79781	1,99E-01	0,047	7,55E-02
<b>Vel = 5,5 m/s a 50°</b>	87,60	152,90	79298	2,24E-01	0,043	8,50E-02

Fuente: Los Autores.

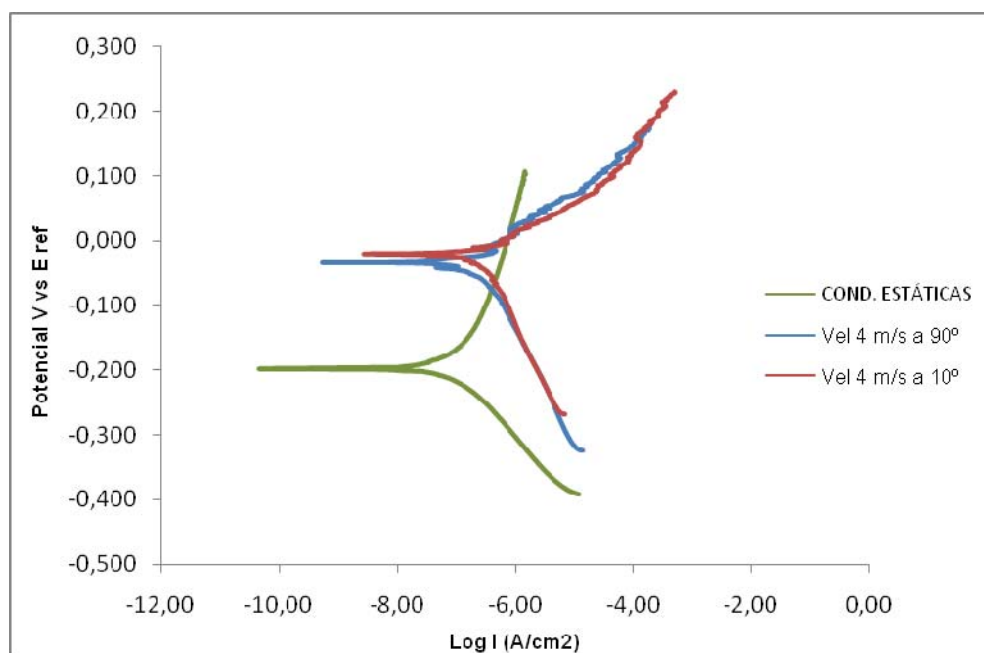
En la tabla anterior se observó que la prueba dinámica presentó mayor valor de velocidad de corrosión que la prueba estática. Cabe notar que el ensayo a 5.5 m/s a 50°, presentó un valor de velocidad de corrosión (*mpy*) parecido al de la repetición (valores de *R<sub>p</sub>* y *I<sub>corr</sub>* parecidos), como se ha venido indicando, al alto ruido anódico puede ser producido por el impacto del electrolito en la superficie del material de trabajo o por el regeneramiento y estabilización de la capa pasiva.

#### **5.4.3. Curvas Tafel Para Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 3,5 % p/p.**

En estas curvas se evidenció el mismo comportamiento reportado en párrafos anteriores donde se muestra que a medida que aumenta la velocidad aumenta los valores de densidad de corriente y por ende la corrosión. La variación del ángulo de 90° a 10° a la misma velocidad, mostró que hay un pequeño aumento en las densidades de corriente casi imperceptible, que conlleva a afirmar que los valores *I<sub>corr</sub>* son muy cercanos. Ver gráfica 17.

Se observa a la vez, que la etapa controlante del proceso es la transferencia de carga, visto por los valores de las pendientes anódica y catódica cuyos valores son diferentes entre sí. A la vez no se observa que las curvas tiendan a un valor de corriente límite característico de un control por difusión o transferencia de masa.

**Gráfica 17. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p a 4 m/s a 90° y a 10°.**

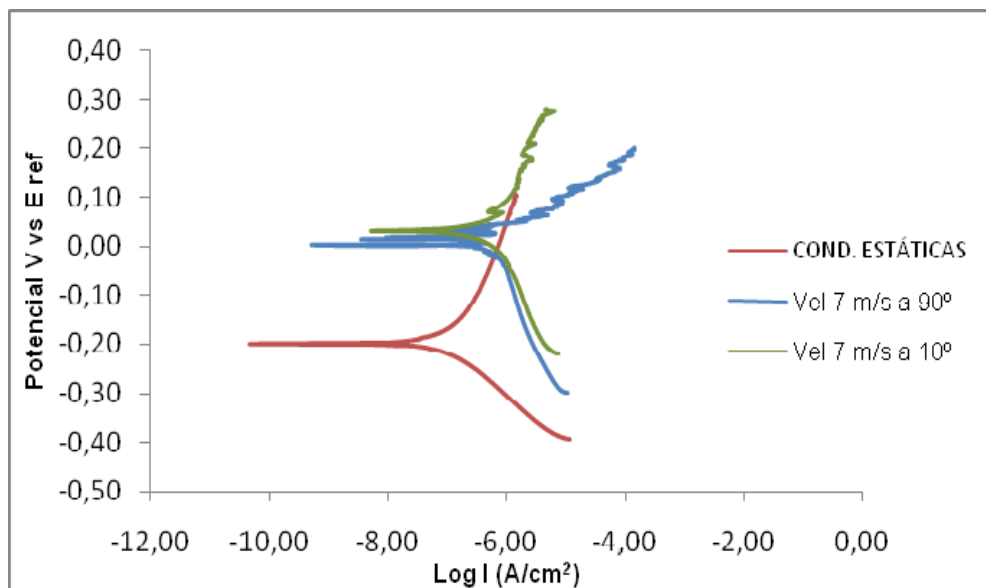


Fuente: Los Autores.

En la gráfica 18, para las condiciones experimentales de salmuera a 3,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°, se observó el mismo comportamiento descrito anteriormente, donde a medida que ángulo disminuye de 90° a 10°, a la misma velocidad de impacto, aumenta la velocidad de corrosión debido al aumento de la densidad de corriente.

Las fluctuaciones del potencial o ruido en la rama anódica de las graficas anteriores, como ya se mencionó, pueden indicar que hay rompimiento o estabilización de la capa o película pasiva característica de los aceros inoxidable.

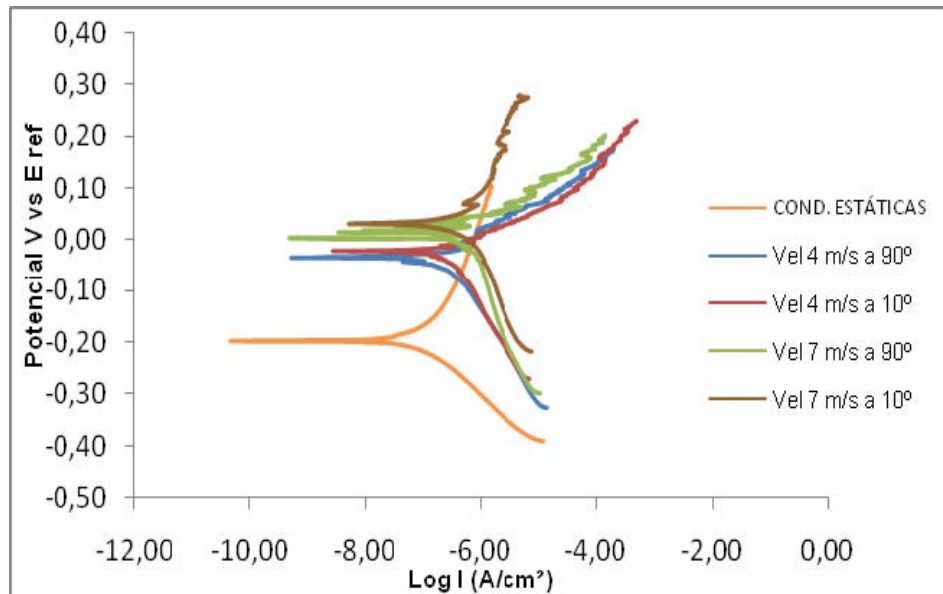
**Gráfica 18. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p a 7 m/s a 90° y a 10°.**



Fuente: Los Autores.

En la gráfica 19 se muestran todos los ensayos realizados, donde se observan los comportamientos de las curvas Tafel descritos en los párrafos anteriores para las pruebas en la salmuera de 3.5 % p/p. Se observa que la curva se desplaza hacia la derecha a medida que aumenta la velocidad (de estática a dinámica) hacia valores de densidades de corriente mayores, lo que indica mayores velocidades de corrosión; al comparar las condiciones a diferente velocidad y mismo ángulo, se observa que a medida que aumenta la velocidad, y a medida que disminuye el ángulo de 90° a 10° manteniendo la misma velocidad, aumenta las densidades de corriente y por ende las velocidades de corrosión.

**Gráfica 19. Curvas Tafel con NaCl 3,5% p/p todas las condiciones.**



Fuente: Los Autores.

En la tabla 10, se detallan los valores de las pendientes  $\beta_a$  y  $\beta_c$ , los valores de  $R_P$ ,  $i_{corr}$  y velocidad de corrosión en mpy obtenidos en estas condiciones experimentales.

Tabla 10. Valores de la extrapolación de curvas Tafel para la salmuera a 3.5 % p/p NaCl

<b>EXTRAPOLACION DE CURVAS TAFEL</b>						
<b>NaCl 3.5% p/p</b>	<b><math>\beta</math> anódico (mV/década)</b>	<b><math>\beta</math> catódico (mV/década)</b>	<b>RP (<math>\Omega</math>h*cm<sup>2</sup>)</b>	<b>I corr (<math>\mu</math>A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E corr (V)</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mpy)</b>
<b>COND. ESTATICAS</b>	106	90	80750	1,26E-01	-0,199	4,78E-02
<b>Vel = 4 m/s a 90°</b>	59	94	59179	2,51E-01	-0,034	9,53E-02
<b>Vel = 4 m/s a 10°</b>	39,80	115,60	57192	3,98E-01	-0,021	1,51E-01
<b>Vel = 7 m/s a 90°</b>	18,10	298	28615	7,08E-01	0,003	2,69E-01
<b>Vel = 7 m/s a 10°</b>	92,70	166,80	24493	1,00E00	0,032	3,78E-01

Fuente: Los Autores.

Analizando los valores obtenidos por los cálculos de extrapolación de las curvas Tafel reportados en la tabla 10, se observa que el mayor valor de velocidad de corrosión se obtuvo en la condición de máxima velocidad y menor ángulo de impacto (Vel= 7 m/s y 10°), comportamiento característico de materiales dúctiles expuestos a corrosión-erosión, cuyos ángulos son cercanos a los 20°. <sup>13</sup> A la vez se observa que los valores de la resistencia a la polarización disminuyen a medida que aumenta la velocidad y disminuye el ángulo de impacto, el mismo comportamiento reportado en los ensayos de impedancias y resistencia a la polarización lineal.

En la tabla 11 se comparan los valores de velocidad de corrosión calculados para todos los ensayos experimentales a un ángulo de 10°. Es importante notar que para la condición de 7 m/s, se presentó los mayores valores de corrosión durante esta investigación. Se evidencia además que a medida que aumenta la velocidad y la concentración de salmuera, aumenta la corrosión.

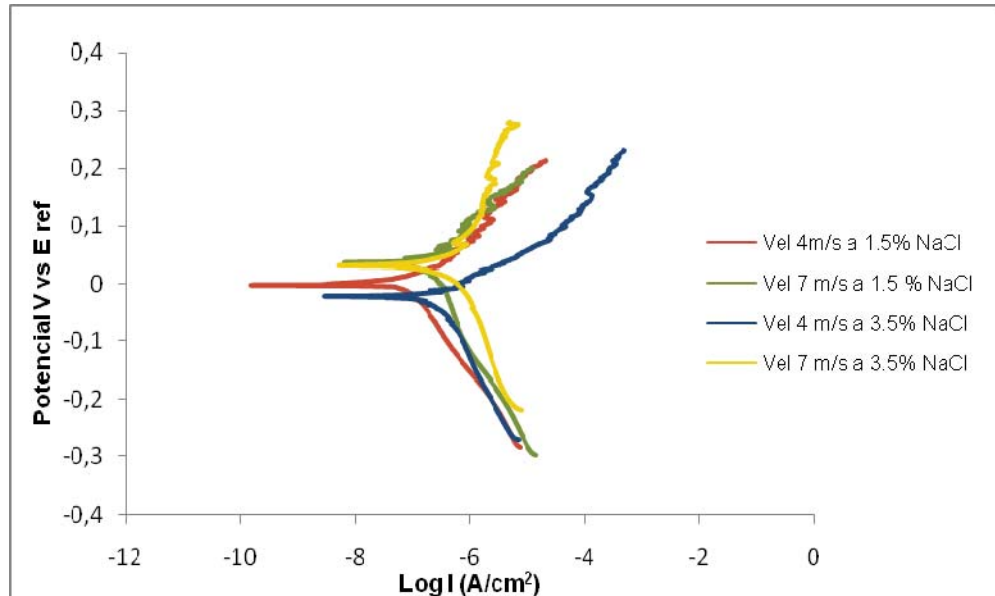
**Tabla 11. Valores de velocidad de corrosión para ensayos experimentales con ángulo de 10°.**

	<b>Condiciones Experimentales</b>	<b>Velocidad De Corrosión (mpy)</b>
<b>Ángulo 10°</b>	4 m/s a 1,5% NaCl	$9,53 \cdot 10^{-2}$
	7 m/s a 1,5% NaCl	$1,20 \cdot 10^{-1}$
	4 m/s a 3,5% NaCl	$1,51 \cdot 10^{-1}$
	7 m/s a 3,5% NaCl	$3,78 \cdot 10^{-1}$

Fuente: Los Autores.

En la gráfica 20, se muestran las curvas Tafel para todas las condiciones a un ángulo de 10°, que ratifica el comportamiento observado.

**Gráfica 20. Curvas Tafel para diferentes ensayos a un ángulo de 10°.**



Fuente: Los Autores.

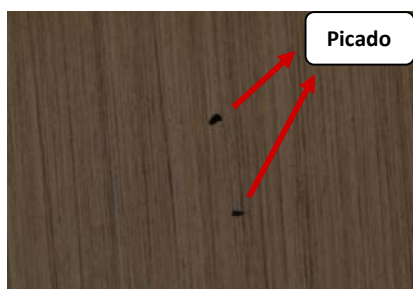
## 5.5. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

Se observaron las superficies de las probetas del acero inoxidable *AISI-SAE 304*, mediante el microscopio Olympus BX51, en los laboratorios del Grupo de Investigación en Corrosión *GIC*, dentro de las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de determinar los cambios morfológicos de corrosión que presentó el material expuesto al impacto de la salmuera, la influencia de concentraciones diferentes de electrolito, y a ángulos preferenciales y velocidades variables de impacto.

**5.5.1. Pruebas Realizadas Con Salmuera - NaCl 1,5 % p/p.** En la fotografías 6, se observa que la probeta a la condición estática presentó corrosión por picado, el acero 304 es susceptible a este tipo de corrosión en aguas estancadas con NaCl. A la vez se observa que el ensayo a 4 m/s a 90°, presentó corrosión por picado

(con productos de corrosión), de menor tamaño, debido por el efecto del chorro que previene un aumento considerable de concentración de las especies corrosivas para la etapa de propagación del picado. Es importante mencionar que cuando ocurre picado existe una etapa de incubación y posterior una etapa de propagación, la velocidad de impacto del chorro probablemente hace que la etapa de propagación no ocurra o disminuya.

#### Fotografías 6. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 1,5 % p/p NaCl.



a. Estática. 100X



b. Estática. 500X



c. Vel = 4 m/s a 90°. 100X

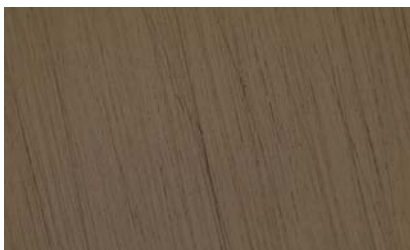


d. Vel = 4 m/s a 90°. 200X

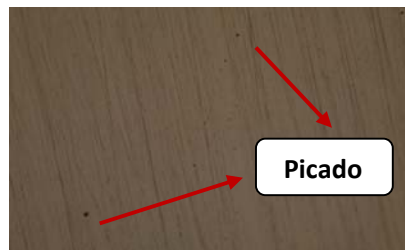
Fuente: Microscopio Olympus Bx51.

En las fotografías (7.a, b, c, d, e y f), se observa que se presentó corrosión por picado, de menor tamaño (en comparación con la prueba estática), no se observan productos de corrosión debido a que el impacto del chorro lava la superficie del metal, a la vez reduce o remueve el espesor de la capa protectora continuamente en la superficie y posiblemente puede impedir o minimizar la etapa de propagación de la corrosión por picado o localizada.<sup>4</sup>

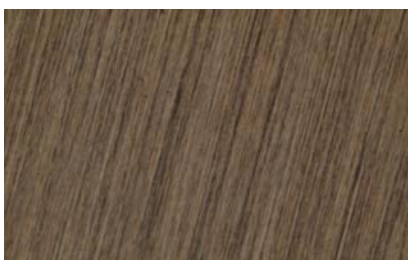
**Fotografías 7. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 1,5 % p/p NaCl.**



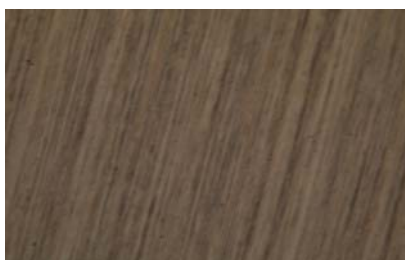
a. Vel = 4 m/s a 10°. 100X



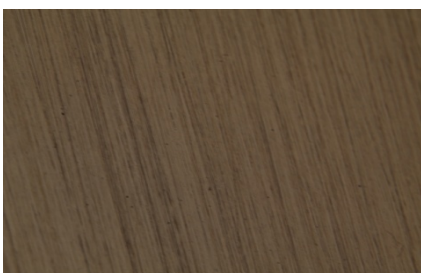
b. Vel = 4m/s a 10°. 200X



c. Vel= 7m/s a 90°. 100X



d. Vel= 7 m/s a 90°. 200X



e. Vel= 7 m/s a 10°. 100X



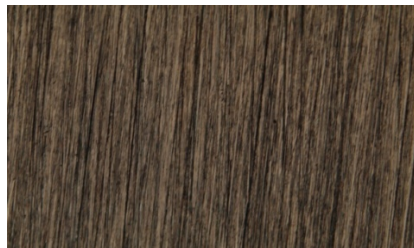
f. Vel= 7 m/s a 10°. 200X

Fuente: Microscopio Olympus Bx51.

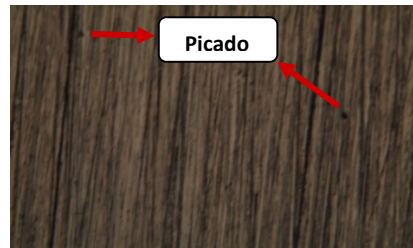
**5.5.2. Pruebas realizadas con salmuera - NaCl 3,5 % P/P.** En la fotografía 8, se observa que la probeta a condiciones estáticas presentó picado debido al ataque del ion cloruro que penetra la capa pasiva en los puntos de menor debilidad o de discontinuidad local, a la vez la condición experimental, 4 m/s a 90° (8.c, 8.d), presentó corrosión por picado debido al deterioro de la película pasivante por el impacto de la solución y posterior ataque de la superficie, que por la misma acción expuesta anteriormente, el chorro probablemente no permite o minimiza el ataque localizado por picado. Este tipo corrosión por picado, no está

claro en que sitios del metal ocurren (dentro o en el límite del grano), posiblemente se deban a inclusiones o microporosidades de la superficie o discontinuidad estructural.

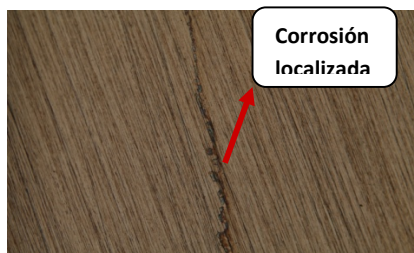
### Fotografías 8. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl



a. Estática. 100X



b. Estática. 200X



c. Vel= 4 m/s a 90°. 100X



d. Vel= 4 m/s a 90°. 200X

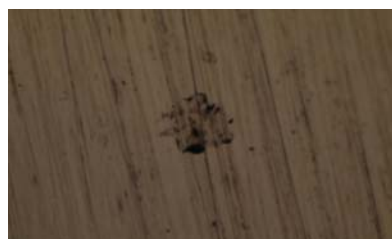
Fuente: Microscopio Olympus Bx51.

En la fotografía 9, se muestran las probetas a velocidad de 4 m/s a 10° (9.a-9.b), igualmente presentó corrosión por picado como las fotografías anteriores.

### Fotografías 9. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl.



a. Vel = 4 m/s a 10°. 200X



b. Vel = 4 m/s a 10°. 500X

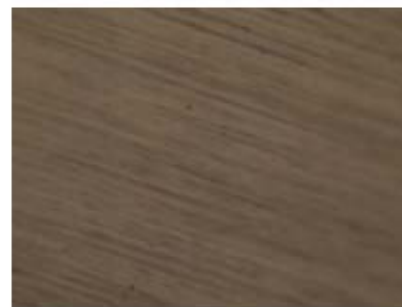
Fuente: Microscopio Olympus Bx51.

En la fotografía 10, se observa que para todas las condiciones experimentales indicadas (10.a, b, c, d, e), se muestra corrosión por picado con poca presencia de productos de corrosión (visto a estos aumentos), debido al impacto del electrolito de alta velocidad (velocidad 7 m/s) sobre la superficie de la probeta puede remover tanto la capa pasiva como los productos de corrosión que se forman. Cabe resaltar, que mediante lo observado en las curvas Tafel, más concretamente en el ruido que presentaron las curvas en la zona anódica, se puede afirmar que posiblemente, la corrosión por picados presentadas en las probetas, son picados metaestables que se forman y tienden a desaparecer, por la acción del chorro que aumenta la concentración de  $O_2$  en la superficie y la capa pasiva trata de regenerarse.

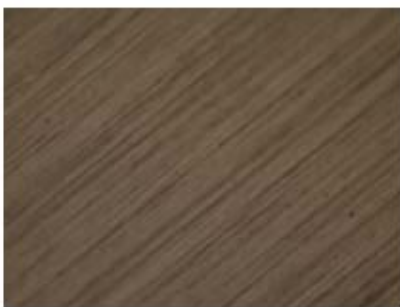
**Fotografías 10. Probetas expuestas a ensayos con salmuera 3,5 % p/p NaCl.**



a. Vel= 7 m/s a 90°. 200X



b. Vel= 7 m/s a 90°. 500X



c. Vel= 7 m/s a 10°. 200X



d. Vel= 7 m/s a 10°. 500X

Fuente: Microscopio Olympus Bx51.

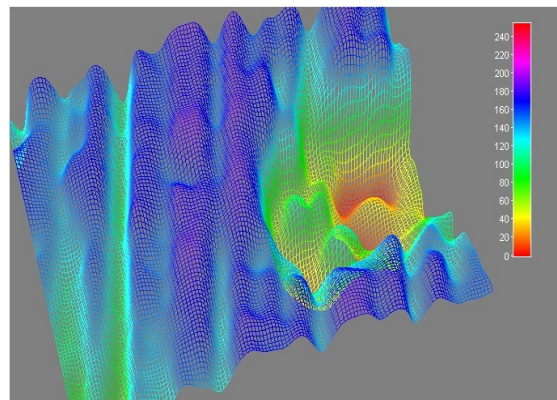
**5.5.3. Análisis tridimensional de las superficies ensayadas.** En esta sección se analizaron las imágenes tridimensionales resultantes de las pruebas experimentales. Estas imágenes fueron tomadas en el *microscopio Imager Z1-Carl Zeiss*, perteneciente al Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS), de la escuela de Física sede Guatiguara-UIS. En estos análisis se mostraran los resultados de las superficies y los perfiles de profundidad de las probetas.

En las fotografías 11.a y 11.b, se muestra la probeta a condiciones estáticas a 1,5% p/p de NaCl, donde se observa corrosión por picado debido al ataque del ion  $Cl^-$ , que rompe la película pasiva y corroe el metal, a la vez se observa los valles y crestas producidos por el lijado (numero 600). En los valles ocurre corrosión localizada, debido al estancamiento de la solución en un espacio pequeño, que permite que ocurra un diferencial de concentración y se presente el deterioro.

**Fotografía 11. Superficie y perfil de profundidad de la condición estática 1.5% p/p NaCl.**



a . Superficie Cond. Estática. 1000X



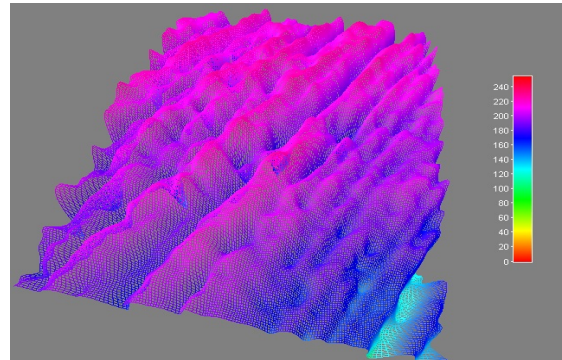
b. Perfil Cond. Estática. 1000X

Fuente: Microscopio Imager Z1-Carl Zeiss.

En las fotografías 12.a y 12.b, se observa corrosión por picaduras, en pequeños orificios, cabe resaltar que el impacto de la salmuera, remueve la capa pasiva y

limpia los productos de corrosión, como también impide que el picado se propague.

**Fotografía 12. Superficie y perfil de profundidad de la condición a Vel = 7 m/s a 90° - 3.5 % p/p NaCl.**



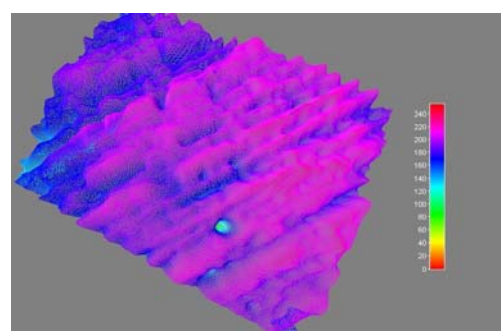
a. Superficie Vel = 7 m/s a 90°. 1000X

b. Perfil Vel = 7 m/s a 90°. 1000X

Fuente: Microscopio Imager Z1-Carl Zeiss.

En las fotografías 13.a y 13.b se observa que el material presentó corrosión por picado (muy pequeños, no alcanzan a propagarse), las crestas y valles del lijado son menos visibles y se distinguen pocos productos de corrosión en la cara de la probeta, debido a la acción del impacto del chorro a alta velocidad.

**Fotografía 13. Superficie y perfil de profundidad de la condición a Vel = 7 m/s a 10° - 3.5 % p/p NaCl.**



a. Superficie Vel = 7 m/s a 10°. 1000X

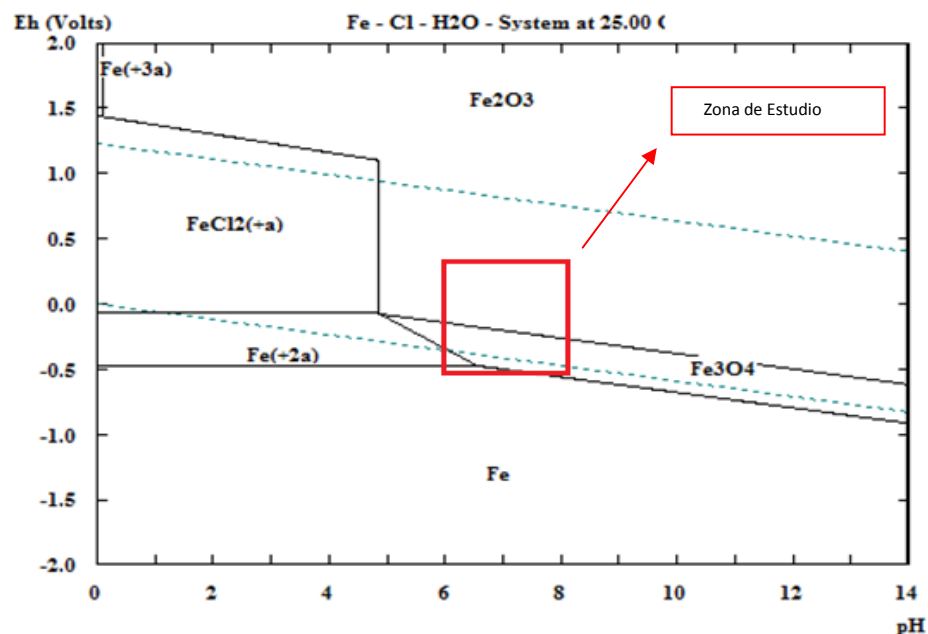
b. Perfil Vel = 7 m/s a 10°. 1000X

Fuente: Microscopio Imager Z1-Carl Zeiss.

**5.5.4. Análisis mediante los diagramas de Pourbaix.** Mediante los diagramas de Pourbaix se puede determinar las zonas de estabilidad (corrosión, inmunidad y pasivación) de un material en un sistema acuoso, a la vez permite predecir según el rango de pH y potencial de trabajo de ciertas condiciones experimentales, ver los posibles especies presentes en el sistema de estudio.

En el diagrama de Pourbaix de la figura 10 se observa la zona de estudio (recuadro rojo), donde la solución presenta un pH=7. En esta zona se puede observar la formación de óxidos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y una pequeña zona de inestabilidad de disolución del Fe a  $\text{Fe}^{2+}$ . Cuando ocurre picado se presenta una disminución local del pH debido a la formación de  $\text{H}^+$  dentro de la superficie de penetración el cual acelera la disolución anódica dando origen a la formación de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{FeCl}_2$ .<sup>26</sup>

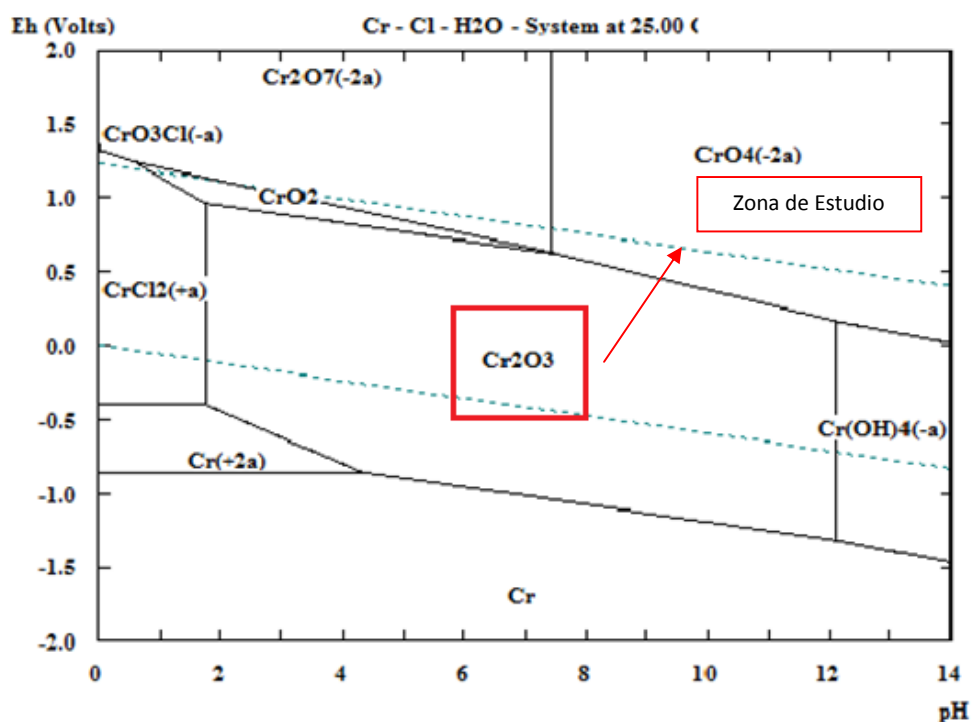
**Figura 10. Diagramas de Pourbaix Fe-Cl-H<sub>2</sub>O**



Fuente: Outokumpu HSC chemistry<sup>®</sup>.

En la zona de estudio de la figura 11, se observa la presencia de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en una amplia región de estabilidad, al igual que en el comportamiento descrito en el diagrama anterior, una vez existe disminución del pH ocurre una oxidación del Cr a  $\text{Cr}^{+2}$  acompañada de la formación de  $\text{CrCl}_2$ . Por lo tanto, se puede concluir que, en este tipo de sistemas, el ion cloruro penetra en la película de óxido con mayor facilidad que otros iones, e incrementa la disolución e hidrólisis de los metales.<sup>26</sup>

**Figura 11. Diagramas de Pourbaix Cr-Cl-H<sub>2</sub>O**



Fuente: Outokumpu HSC chemistry®.

## 6. CONCLUSIONES

Se determinó la velocidad de corrosión del acero inoxidable AISI-SAE 304, en salmuera a diferentes concentraciones, velocidades impacto y ángulos de choque, mediante las técnicas electroquímicas Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE), Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Extrapolación de Tafel.

- Las técnicas electroquímicas utilizadas mostraron una excelente opción para evaluar la resistencia a la corrosión de metales expuestos a la corrosión por impacto de salmueras a ángulos preferenciales y concentraciones conocidas.
- Se comprobó que la velocidad de impacto del fluido sobre la superficie del material, influye decisivamente en el aumento de la velocidad de corrosión del acero. Dicho impacto rompe o remueve la capa pasiva característica de este tipo de materiales, dejando la superficie expuestas a un mayor ataque corrosivo.
- El aumento en la concentración de cloruros aumenta la velocidad de corrosión, debido al incremento de los valores de densidad de corriente y a la disminución de la resistencia a la polarización del sistema, a si mismo, los iones  $\text{Cl}^-$ , rompen la película pasiva, aumentan la corriente de disolución anódica y favorecen la disolución de los metales.
- La máxima velocidad de corrosión determinada fue  $3,78 \cdot 10^{-1}$  mpy, se obtuvo a una velocidad de 7m/s, concentración de 3,5% NaCl y un ángulo de choque de  $10^\circ$ .

- El ataque corrosivo se incrementa con la disminución en el ángulo de impacto, donde se determinó que el mayor deterioro en los sistemas ocurrió a un ángulo de 10°. Esto es debido a las propiedades intrínsecas del material que lo hacen susceptible al daño preferencial cuando se expone a ángulos oblicuos.
- Una vez se inicia la incubación del picado, las velocidades altas de impacto del chorro impiden su crecimiento y el inicio de otras picaduras, de allí que el número de picaduras profundas sea, por lo general, menor que las picaduras más pequeñas de poca profundidad.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Llevar a cabo las pruebas con arena u otro solido con la salmuera para determinar posteriores fenómenos corrosivos que pudiesen presentarse.

## BIBLIOGRAFIA

1. HEITZ, E. Chemo-Mechanical effects of Flow on Corrosion. Corrosion Vol.47, 1991.
2. VYAS, B. Synergistic effect of erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl. Paper, wear Elsevier 49 (1995).
3. HONG, T. AND NAGUMO M. The effect of chloride concentration on early stages of pitting for type 304 stainless steel revealed by the ac impedance method. Department of Materials Science and Engineering, pág 285-293, Shinjuku-Ku, Tokyo, Japan.
4. UGLIG, H. Corrosion Handbook. Ed. John Wiley & Sons 1985, pág 165.
5. LU, Y.C Y I VES M.M. Synergism of alloying elements and pitting corrosion resistance of stainless steel. Institute for material research, McMaster University, Ontario, Canada, and Department of Materials Science & Engineering, State University of New York, New York, U.S.A. pág 89-96.
6. SASAKI, K. y BURSTEIN, G.T. Erosion–corrosion of stainless steel under impingement by a fluid jet. Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, United Kingdom. Paper, Corrosion Science 49 (2007). pág. 92–102.

7. MATSUMURA, M. Y OKA, ISIJ Erosion–corrosion of Fe in aqueous slurries. Some views on a new rationale for defining the erosion-corrosion interaction. Department of Mechanical Engineering of Strahclyde, Glasgow. Paper, Elsevier 49 (2007). pág. 92–102.
8. MACHUCA M, Jesús A. “Evaluación del daño por erosión- corrosión de un acero AISI SAE 1020 por medio de técnicas electroquímicas, en un medio multifasico salmuera - CO<sub>2</sub> - arena. Trabajo de grado de maestría en el área de ingeniería metalúrgica. Universidad Industrial de Santander.
9. PAITAN. Q. Álvaro. Termodinámica de la corrosión. Facultad de ingeniería metalúrgica y de materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú.
10. VINCENT. M.C., MILLER. H.B., D. and. KAUFMAN, P.B., Erosion by Proppant: A Comparison of the Erosivity of Sand Ceramic Proppants during Slurry Injection and Flowback of Proppant. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S.A 2004.
11. PEÑA, D. Introducción a la Erosión de Materiales. Artículo. Revista Ion Centro de estudios de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Vol. 17, No 1. 2001.
12. RAO, P.V. and BUCKELY, D.H. Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based in their properties. Paper, Wear. Elsevier.1985
13. TORRES, A. Conocimientos básicos del acero inoxidable. Cedinox. Madrid, 1998, pág. 3-39.

14. DICAPRIO, G. Notas históricas y producción de aceros inoxidable. Aceros inoxidable Grupinox. Barcelona, 1999.
15. PEÑA, D; PINILLA, A. Predicción de la corrosión localizada de los aceros inoxidable AISI SAE 304 y 316 en soluciones de NaCl. Trabajo de grado en el área de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial del Santander. 1992.
16. BAKER, M.A, CASTLE J.E. The initiation of pitting corrosion of stainless steels. Department of Materials Science and Engineering, University of Surrey, Guildford, U.K. pág. 1295-1312.
17. KELLY, R. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, New York USA.2003.
18. BARD, A,J. Electrochemical Methods. Fundamentals and applications, John Wiley & Sons 2002.
19. VERA CRUZ R.P, NISHIKATA AC. Pitting corrosion mechanism of stainless steels under wet-dry exposure in chloride –containing environments.
20. VALLE M, A; PÉREZ L, T; y MARTÍNEZ M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado.
21. Fuente: [http:// metalurgia y corrosión electroquimica.htm](http://metalurgia-y-corrosion-electroquimica.htm).
22. Kehl, G. L. Fundamentos teóricos de la práctica metalúrgica
23. C. GABRIELLI, “Identification of Electrochemical ProInstrumentation Group”, 1980, Solartron, Farnborough, Hampshire, UK.

24. FLÓREZ, M. Juan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química, UNAM. <http://depa.pquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>
25. MONTOYA, Juan E. Evaluación de la Capacidad Protectora de Recubrimientos Ni-SiC y Ni-Co-W depositados por proyección térmica. Dyna, Año 76, Nro. 160, Medellín, 2009. pág. 195-206.
26. JONES, D.A. Principles and prevention of corrosion, 2da ed. Prentice Hall, 1996. Pág. 215.

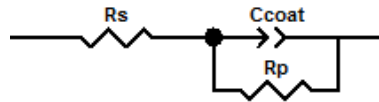
## **ANEXOS**



**ANEXO B. CONDICIONES ELECTRQUÍMICAS DE OPERACIÓN GENERALES  
PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS**

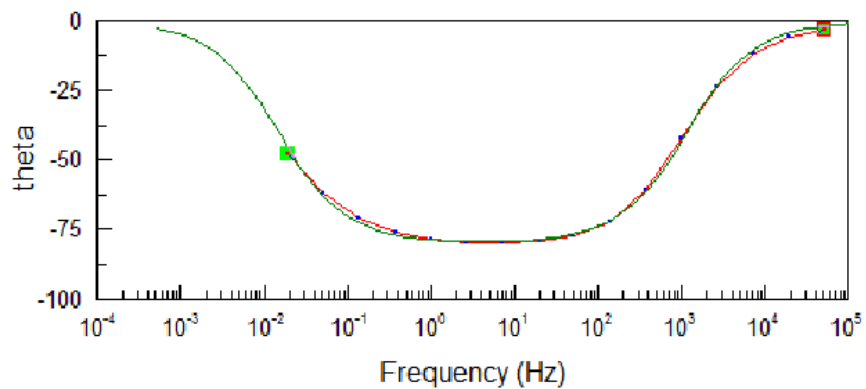
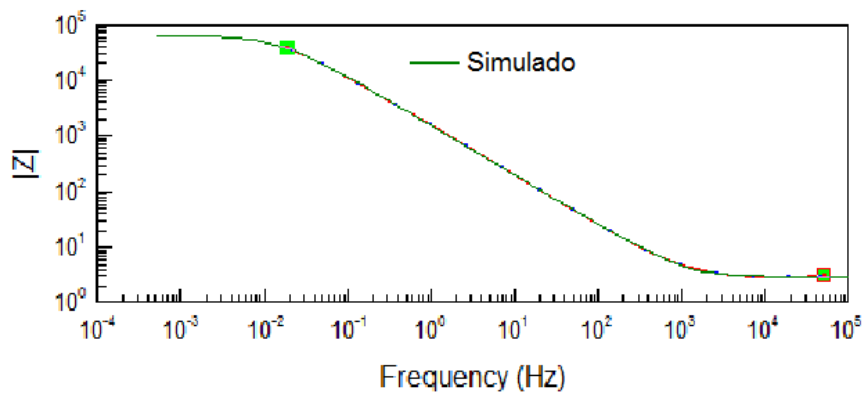
<b>Resistencia a la Polarización Lineal</b>	<b>Espectroscopia de Impedancia Electroquímica</b>	<b>Extrapolación de Tafel</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Potencial Inicial: -0,02V vs <math>E_{corr}</math></li> <li>❖ Potencial Final: 0,02v vs <math>E_{corr}</math></li> <li>❖ Vel. De Barrido: 0,17mV/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Frecuencia Inicial: 100000 Hz</li> <li>❖ Frecuencia Final: 0,01Hz</li> <li>❖ Voltaje AC: 20 mV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Potencial Inicial: -0,25V vs <math>E_{corr}</math></li> <li>❖ Potencial Final: 0,25V vs <math>E_{corr}</math></li> <li>❖ Vel. De Barrido: 0,17mV/s</li> </ul>

**ANEXO C. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL -  
SALMUERA 3.5 % P/P NaCl – CONDICIÓN ESTÁTICA**

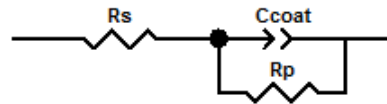


<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rs	Free(±)	3,002	0,038637	1,287
Ccoat-T	Free(±)	0,00012892	1,4868E-06	1,1533
Ccoat-P	Free(±)	0,89102	0,0024276	0,27245
Rp	Free(±)	68182	2405,5	3,5281

Chi-Squared: 0,010334  
 Weighted Sum of Squares: 0,9921

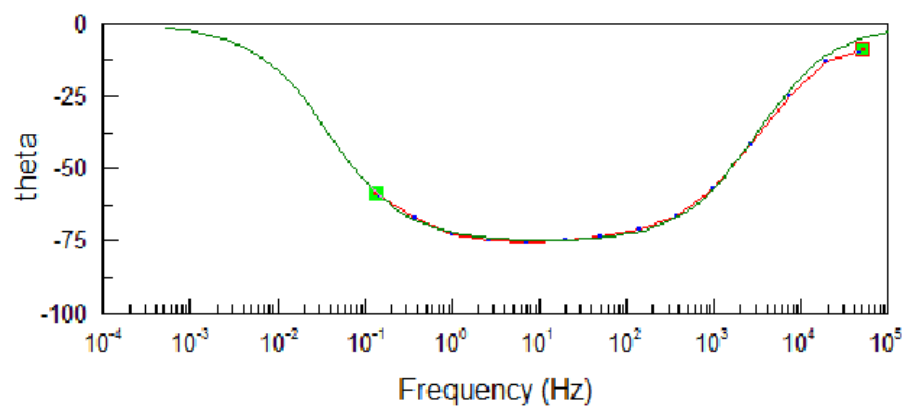
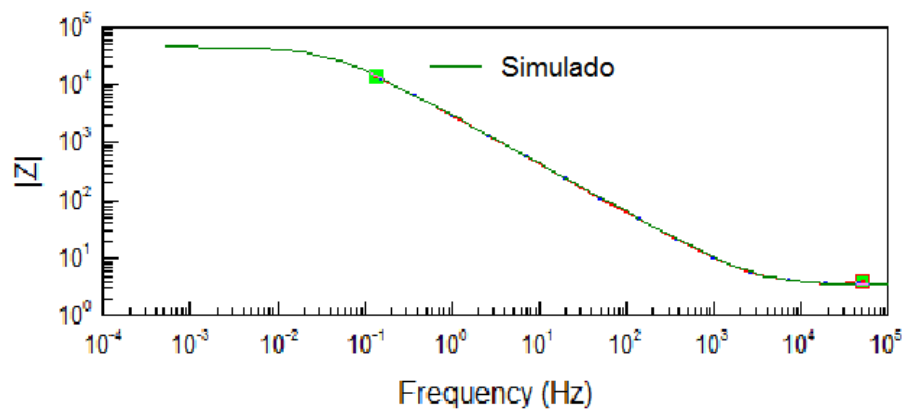


**ANEXO D. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL -  
SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 4 m/s a 90°**

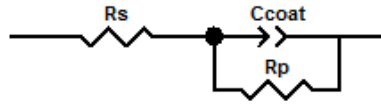


<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
$R_s$	Free( $\pm$ )	3,451	0,0491	1,4228
$C_{coat-T}$	Free( $\pm$ )	7,2141E-05	1,0072E-06	1,3962
$C_{coat-P}$	Free( $\pm$ )	0,84067	0,002461	0,29274
$R_p$	Free( $\pm$ )	45503	3443,6	4,3267

Chi-Squared: 0,0019519  
 Weighted Sum of Squares: 0,046845

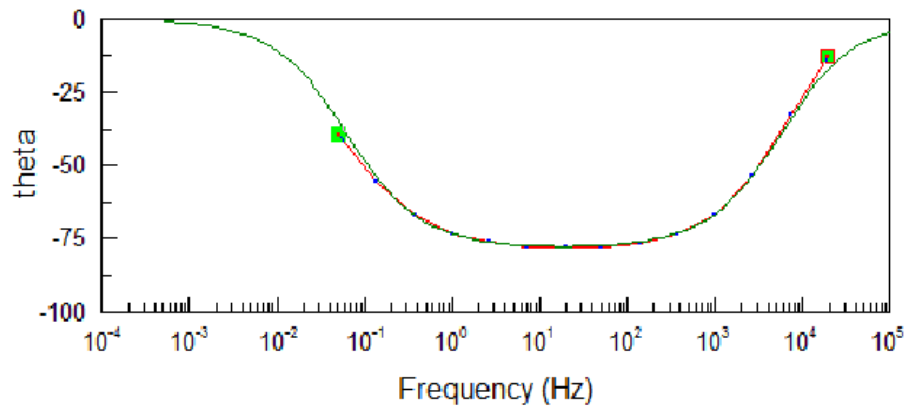
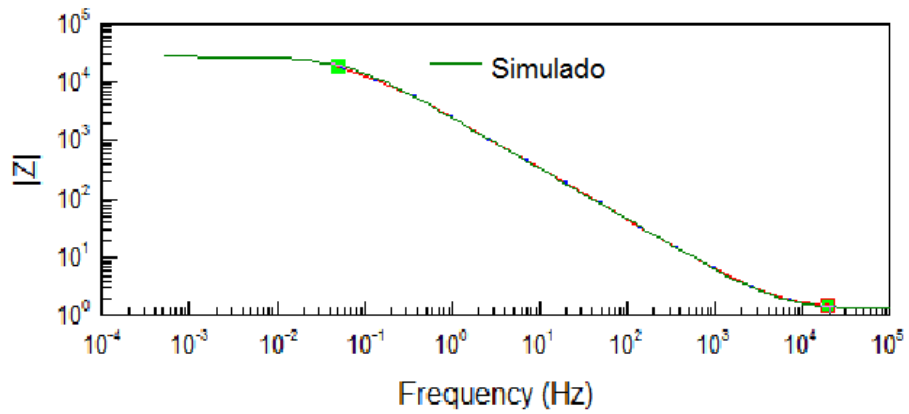


**ANEXO E. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL -  
SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 4 m/s a 10<sup>0</sup>**

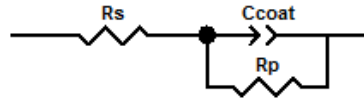


<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
$R_s$	Free(±)	1,321	0,030236	2,2889
$C_{coat-T}$	Free(±)	8,3385E-05	1,2386E-06	1,4854
$C_{coat-P}$	Free(±)	0,87075	0,0025164	0,28899
$R_p$	Free(±)	26934	923,92	3,4303

Chi-Squared: 0,0024874  
 Weighted Sum of Squares: 0,059698

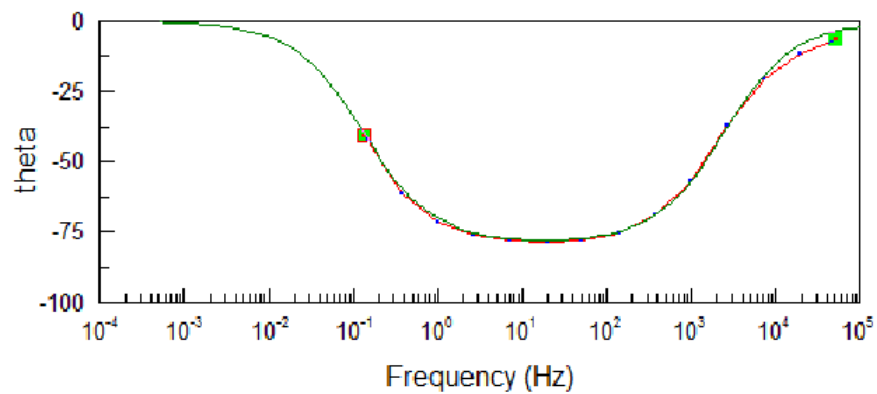
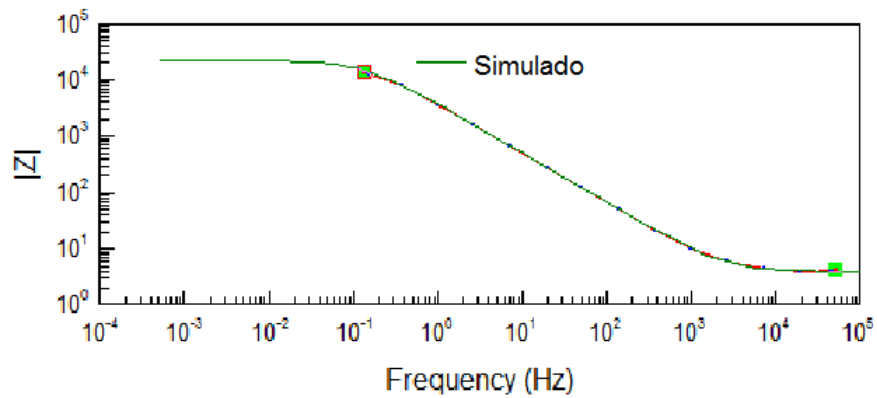


**ANEXO F. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL -  
SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 7 m/s a 90°**

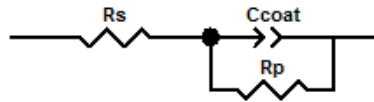


<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rs	Free(±)	3,929	0,049247	1,2534
Ccoat-T	Free(±)	5,2446E-05	7,3103E-07	1,3939
Ccoat-P	Free(±)	0,88124	0,0024352	0,27634
Rp	Free(±)	22555	718,07	3,1836

Chi-Squared: 0,0018451  
Weighted Sum of Squares: 0,044281

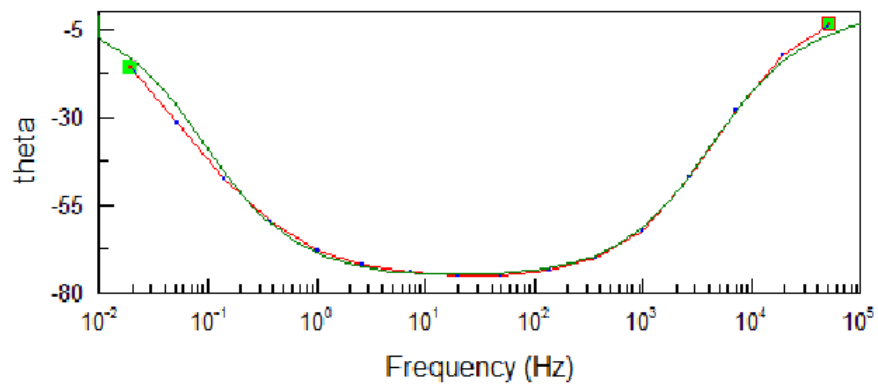
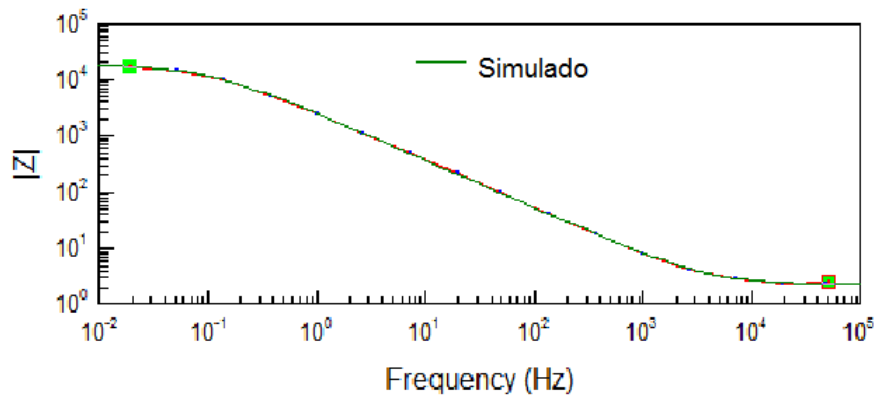


**ANEXO G. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA METAL -  
SALMUERA 3.5 % p/p NaCl – Vel = 7 m/s a 10<sup>0</sup>**



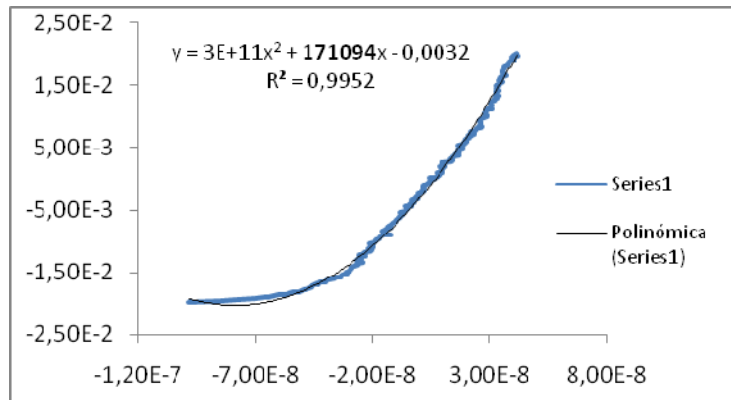
Element	Freedom	Value	Error	Error %
$R_s$	Free(±)	2,246	0,050823	2,2628
$C_{coat-T}$	Free(±)	8,2087E-05	1,6985E-06	2,0691
$C_{coat-P}$	Free(±)	0,84438	0,0035318	0,41827
$R_p$	Free(±)	18651	524,07	2,8099

Chi-Squared: 0,0043089  
Weighted Sum of Squares: 0,12065

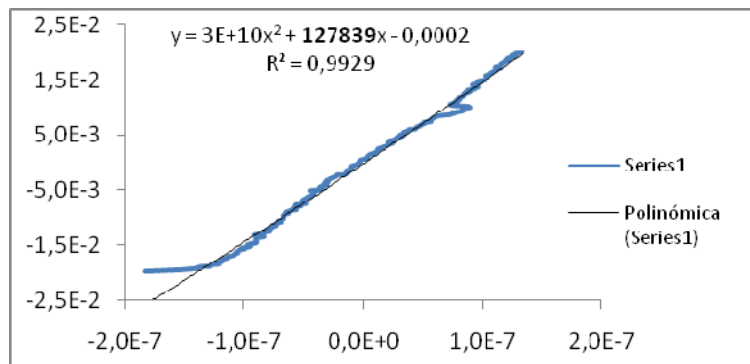


## ANEXO H. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 1,5% p/p

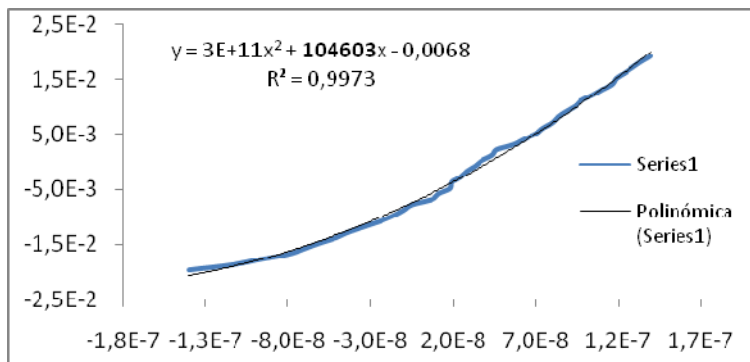
### Condición Estática



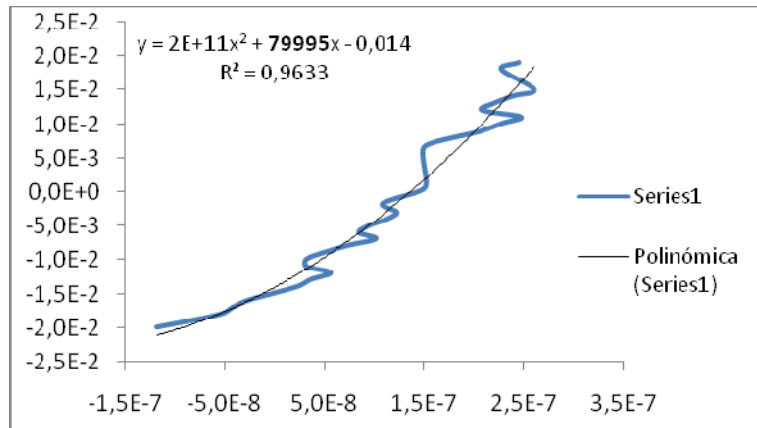
### Condiciones Vel = 4 m/s a 90°



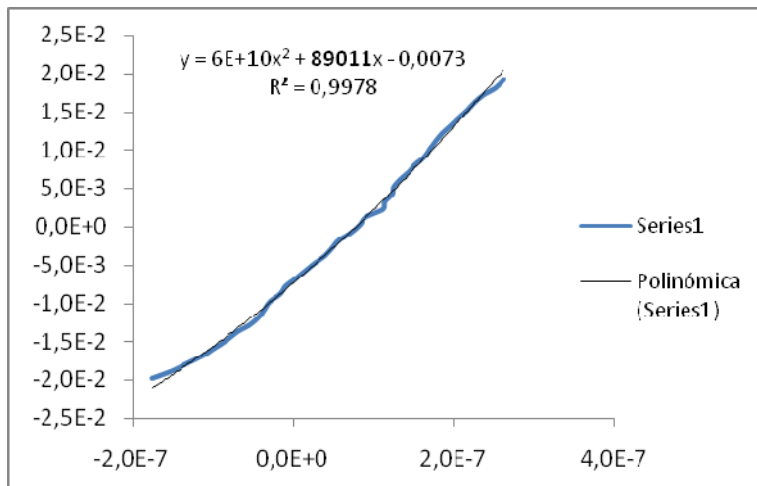
### Condiciones Vel = 4 m/s a 10°



### Condiciones Vel = 7 m/s a 90°

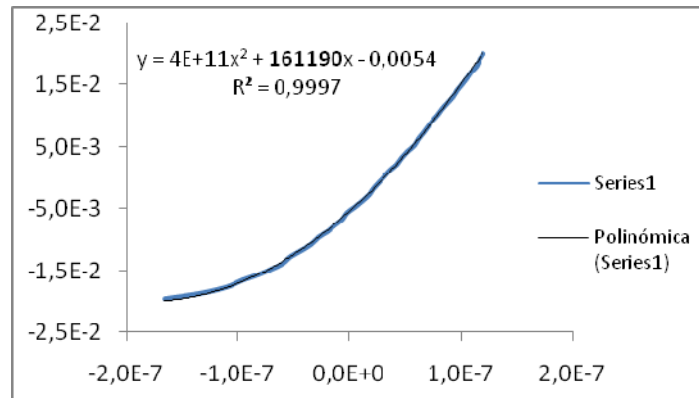


### Condiciones Vel = 7 m/s a 10°

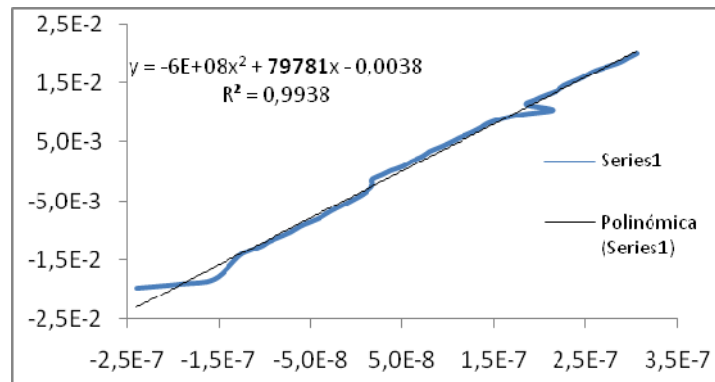


## ANEXO I. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 2,5% p/p

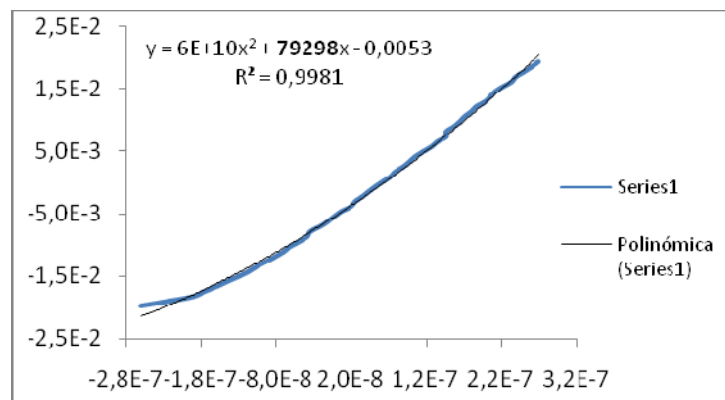
### Condición Estática



### Condiciones Vel = 5.5 m/s a 50°

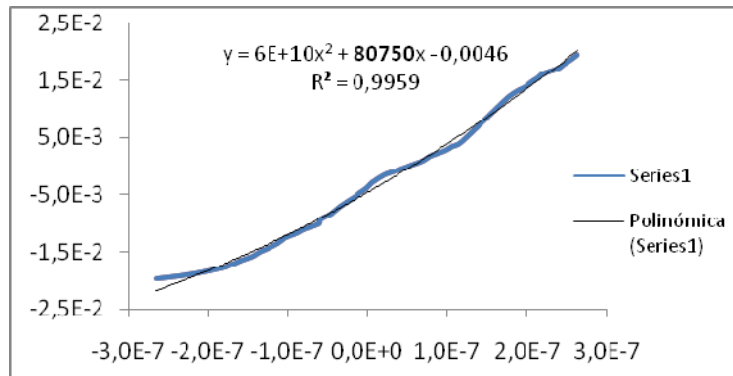


### Condiciones repetición Vel = 5.5 m/s a 50°

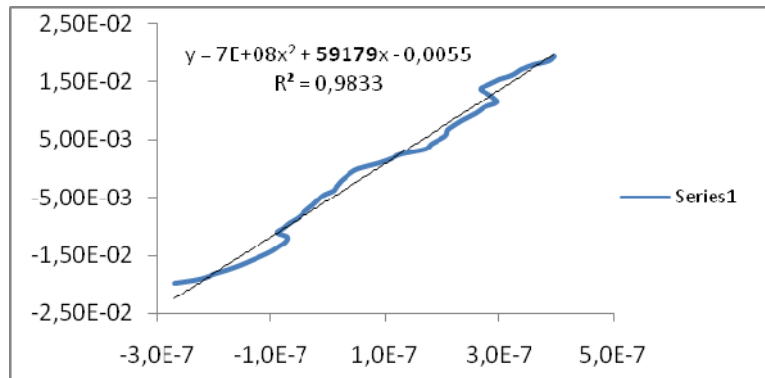


**ANEXO J. DIAGRAMAS DEL MÉTODO DE RESISTENCIA A LA  
POLARIZACIÓN LINEAL (RPL) NaCl 3,5% p/p**

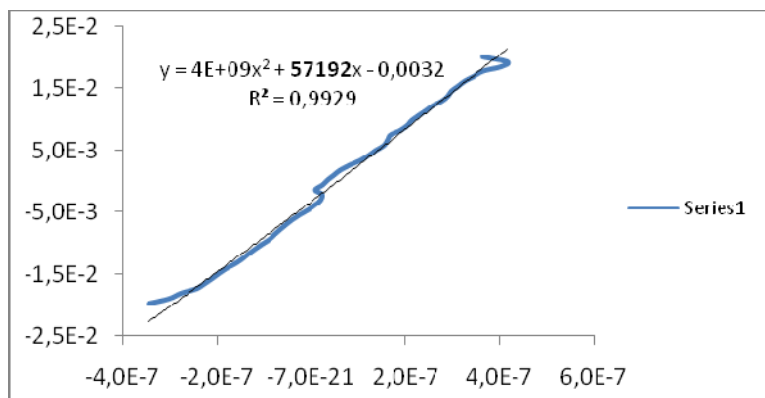
**Condición Estática**



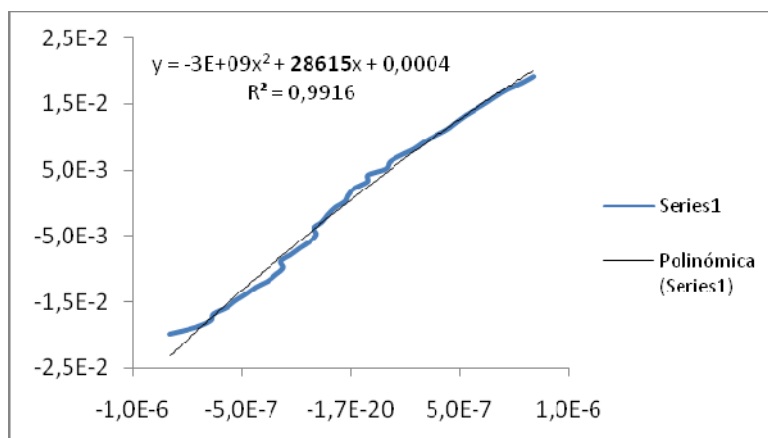
**Condiciones Vel = 4 m/s a 90°**



**Condiciones Vel = 4 m/s a 10°**



### Condiciones Vel = 7 m/s a 90°



### Condiciones Vel = 7 m/s a 10°

