

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AGENTE DE LIMPIEZA EN EL  
COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430  
MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.

GERSON JAHIR LIZCANO PULIDO

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

2013

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AGENTE DE LIMPIEZA EN EL  
COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430  
MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.

GERSON JAHIR LIZCANO PULIDO

TRABAJO DE GRADO, PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO.

DIRECTOR:

PH.D. DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS

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

## DEDICATORIA

*Este proyecto está dedicado en primer lugar a Dios, por haberme concedido la vida, entendimiento y sabiduría durante mis años de estudio.*

*A mis padres Luis E. Lizcano y Evila Pulido por darme su amor, apoyo y todo el sacrificio que realizaron para que yo obtuviera este logro.*

*A mi hermana Angie K. Lizcano por su apoyo incondicional.*

*A mis amigos, con los que compartí durante mi transcurso en la Universidad, Andrés Felipe, Jesús G., Carlos Q., Harold, Carlos G., Albert, Sandra T, Diana V., Andrea P., Cusi, Jackeline , Liliana, Henry B., Jonathan C., Oscar y Cesar M.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC), por el apoyo prestado y facilitarme el uso de sus instalaciones. A mi director Dr. Darío Yesid Peña por su apoyo y dedicación.

A la Ing. Liliana, Anderson y el profesor Custodio Vásquez Quintero por su tiempo, apoyo y colaboración durante el proyecto.

A todos los técnicos de la escuela por su colaboración prestada.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales por su apoyo.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO TEORICO .....	18
2.1 ACERO INOXIDABLE.....	18
2.1.1 Aceros inoxidables ferríticos.....	18
2.1.2 Acero AISI 430.....	19
2.2 MÉTODOS DE LIMPIEZA.....	21
2.2.1 Métodos físicos.....	21
2.2.2 Métodos químicos.....	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 ETAPA 1: PREPARACIÓN SUPERFICIAL.....	24
3.1.1 Caracterización del material.....	24
3.2 ETAPA 2: PREPARACIÓN DE LOS AGENTES DE LIMPIEZA Y PRUEBAS DE INMERSIÓN.....	24
3.2.1 Preparación de los agentes de limpieza .....	24
3.2.2 Inmersión de las muestras en las soluciones de limpieza simuladas .....	25
3.3 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN.....	26
3.3.1 Caracterización electroquímica.....	26
3.3.2 Celda electroquímica .....	26
3.3.3 Caracterización física y química .....	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
4.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 430.....	29
4.2 CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL POR ESPECTROSCOPIA DE ARCO O CHISPA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430.....	30

4.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430 EN LOS DIFERENTES AGENTES DE LIMPIEZA.....	31
4.4 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 430 EN LOS DIFERENTES AGENTES DE LIMPIEZA.....	39
4.1.1 Evaluación del potencial a circuito abierto .....	39
4.1.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)-Diagramas de Nyquist	42
4.1.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica-Diagramas de Bode .....	46
4.1.4 Simulación por circuitos equivalentes .....	48
4.1.5. Resistencia a la polarización lineal (RPL).....	51
4.1.6 Polarización potenciodinámica.....	53
4.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	57
4.2.1 Extrapolación de Tafel .....	57
4.2.2 Cálculo de la velocidad de corrosión .....	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BILIOGRAFICAS .....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS.....	77

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación gráfica de los aceros inoxidable ferríticos de la serie 400.....	20
<b>Figura 2</b> metodología experimental realizada en la presente investigación .....	23
<b>Figura 3.</b> Montaje experimental para la pruebas de caracterización electroquímica de las muestras de acero inoxidable en los agentes de limpieza. ....	27
<b>Figura 4.</b> Micrografía óptica del acero inoxidable AISI 430 previo al ataque químico.....	29
<b>Figura 5.</b> Micrografía óptica del acero inoxidable AISI 430 posterior al ataque químico.....	30
<b>Figura 6.</b> Micrografías electrónicas de barrido de las muestras de acero inoxidable AISI 430 a) análisis composicional EDS y b) morfológico a 50.000X.....	32
<b>Figura 7.</b> Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 5% (v/v) de ácido acético, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión.....	34
<b>Figura 8.</b> Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 7% (v/v) de NaOH, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión. ....	35
<b>Figura 9.</b> Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) peróxido de hidrógeno y 1% de ácido sulfúrico, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión. ....	37
<b>Figura 10.</b> Diagrama potencial vs. Tiempo para las muestras de acero inoxidable .....	39
<b>Figura 11.</b> Diagramas de equilibrio termodinámico potencial vs pH del sistema Fe-Cr-H <sub>2</sub> O, usado en las muestras inmersas en solución peroxiacética y de ácido acético.....	40

<b>Figura 12.</b> Diagramas de equilibrio termodinámico potencial vs pH para el sistema Fe-Cr-H <sub>2</sub> O-Na, usado en las muestras inmersas en solución de NaOH .....	41
<b>Figura 13.</b> Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de ácido acético durante diferentes tiempos de inmersión .....	42
<b>Figura 14.</b> Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de hidróxido de sodio durante diferentes tiempos en inmersión .....	44
<b>Figura 15.</b> Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de peróxido de hidrógeno y ácido acético durante diferentes tiempos en inmersión ..	45
<b>Figura 16.</b> Diagramas de Bode para la muestra inmersa en diferentes agentes de limpieza y durante diferentes tiempos en inmersión a) solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética .....	47
<b>Figura 17.</b> Representación de las interfases para un sistema compuesto por una subcapa interna densa y compacta, y una capa externa porosa o defectuosa; con su circuito equivalente representativo .....	49
<b>Figura 18.</b> Representación de las interfases para un sistema metal-electrolito; con su circuito equivalente tipo Randles .....	51
<b>Figura 19.</b> Curvas de resistencia a la polarización lineal a) Solución ácido acético, b) Solución de hidróxido de sodio y c) Solución peroxiacético .....	52
<b>Figura 20.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución de ácido acético a diferentes tiempos de inmersión .....	54
<b>Figura 21.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio a diferentes tiempos de inmersión .....	55
<b>Figura 22.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución peroxiacética a diferentes tiempos de inmersión .....	57
<b>Figura 23.</b> Curvas de extrapolación de Tafel a) Solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética .....	58

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Composición química del acero inoxidable AISI 430.....	19
<b>Tabla 2.</b> Variables seleccionadas para el comportamiento del acero inoxidable AISI 430 en agentes de limpieza. ....	26
<b>Tabla 3.</b> Condiciones para la caracterización electroquímica.....	27
<b>Tabla 4.</b> Espectro composicional-elemental del acero inoxidable AISI 430 usado en la investigación. ....	31
<b>Tabla 5.</b> Valores de resistencia a la polarización para las muestras de acero inoxidable AISI 430 en diferentes agentes de limpieza.....	53
<b>Tabla 6.</b> Parámetros obtenidos mediante la técnica de extrapolación de Tafel para el acero inoxidable AISI 430 .....	60
<b>Tabla 7.</b> Velocidades de corrosión para el acero inoxidable AISI 430 con base en la técnica de resistencia a la polarización lineal y extrapolación de Tafel.....	61

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Listado de reactivos empleados en la investigación.....	77
<b>Anexo B.</b> Listado de equipos empleados en la investigación. ....	78
<b>Anexo C.</b> Determinación de las pendientes de Tafel. ....	79
<b>Anexo D.</b> Determinación de la velocidad de corrosión.....	82
<b>Anexo E.</b> Espectros composicionales EDS aplicados a las muestras de acero inoxidable inmersas en a) solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética. ....	84
<b>Anexo F.</b> Simulación del circuito equivalente correspondiente al sistema de un sustrato metálico compuesto por una capa densa y una capa porosa en su superficie .....	85
<b>Anexo G.</b> Simulación del circuito equivalente tipo Randles correspondiente al sistema de un sustrato metálico en contacto directo con un electrolito. ....	88

## RESUMEN

### TÍTULO:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AGENTE DE LIMPIEZA EN EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430 MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS\*.

### AUTOR:

LIZCANO Pulido Gerson\*\*.

### PALABRAS CLAVES:

Acero inoxidable AISI 430, agente de limpieza, corrosión, pruebas electroquímicas.

### DESCRIPCIÓN:

Con el propósito de garantizar su resistencia e integridad física de los productos fabricados a los ambientes corrosivos, en la presente investigación se evaluó el efecto que presenta el uso de diferentes agentes de limpieza en el daño por corrosión del acero inoxidable AISI 430. Muestras de acero inoxidable AISI 430 fueron inmersas en 3 diferentes soluciones de limpieza simuladas (Medio 1: Solución 5% (v/v) ácido acético, Medio 2: Solución 7% (w/v) NaOH, Medio 3: Solución 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1% (v/v) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.) por 3 y 7 días. Posteriormente las muestras fueron caracterizadas mediante pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal (RPL), Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), seguimiento del potencial en el tiempo y polarización potenciodinámica, con el fin de determinar el efecto del agente de limpieza y su tiempo en inmersión en la velocidad de corrosión del material.

La caracterización morfológica de la superficie del acero con el tiempo en inmersión sugirió que el tipo de daño por corrosión visto en las muestras se obedeció a un proceso de corrosión por picado, principalmente en las muestras con componentes ácido, los cuales causan una disolución del cromo en la capa pasiva de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y en el material, lo cual genera una caída en los valores de la resistencia a la transferencia de carga, causando un aumento en la velocidad de corrosión de los sustratos. En cuanto a las muestras inmersas en NaOH presentaron un menor desgaste corrosivo debido a la formación de productos de corrosión al tercer día, los cuales pasivan la superficie de la muestra, incrementando la impedancia y la resistencia a la polarización del material, disminuyendo la velocidad de corrosión; sin embargo dicho producto experimenta disolución al séptimo día, por lo que le material aumenta su velocidad de corrosión.

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ph.D. PEÑA Ballesteros Dario Yesid

## ABSTRACT

**TITLE:**

EVALUATION OF THE EFFECT OF CLEANING AGENT ON THE CORROSION BEHAVIOR OF AISI 430 STAINLESS STEEL BY ELECTROCHEMICAL TEST \*.

**AUTHOR:**

LIZCANO Pulido Gerson \*\*

**KEYWORDS:**

Stainless steel AISI 430, cleaning agent, corrosion, electrochemical tests.

**DESCRIPTION:**

In order to ensure strength and physical integrity of the products manufactured to corrosive environments, in this investigation, the effect presented using different cleaning agents damage from corrosion of stainless steel AISI 430. Samples of AISI 430 stainless steel were immersed in 3 different cleaning solutions simulated (Agent 1 : Solution 5 % (v/v) acetic acid , agent 2 : Solution 7 % (w/v) NaOH , agent 3 : Solution 16 % (v/v) acetic acid , 23% (v/v) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and 1% (v/v) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.) for 3 and 7 days. The samples were characterized by testing electrochemical linear polarization resistance (LPR), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), monitoring of the potential over time and potentiodynamic polarization, in order to determine the effect of the cleaning agent and its time immersion in the corrosion rate of material.

Morphological characterization of the surface of the steel with immersion time suggested that the type of corrosion damage seen in the samples is due to a pitting corrosion process, mainly in samples with acid components, which cause a solution of chromium in the passive layer of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the material, which causes a decrease in the values of the resistance to charge transfer, causing an increase in the corrosion rate of the substrates. As for the samples immersed in NaOH had a lower corrosion wear due to formation of corrosion products on the third day , which passivate the surface of the sample, increasing the impedance and polarization resistance of the material, decreasing the rate of corrosion, but the product undergoes dissolution on the seventh day, so that material increases its corrosion rate .

\*Work degree

\*\*Physicochemical engineering faculty. Metallurgical and science materials engineering school.. Directress: Ph.D. PEÑA Ballesteros Dario Yesid

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado crecimiento vertiginoso en los precios de comercialización del níquel, a valores muy cercanos al de los metales preciosos. Este fenómeno ha causado un aumento en los costos de producción de los productos de acero inoxidable austenítico; el cual es uno de los aceros más utilizados por las industrias químicas y manufactureras, gracias a su excelente resistencia a la corrosión, su soldabilidad y su buena conformabilidad. Al ser indispensable la utilización del níquel como elemento estabilizante de la fase austenita en los aceros inoxidables austeníticos, es de esperar que el incremento en los precios del níquel, incrementen los costos de fabricación de estos aceros; disminuyendo la comercialización de productos fabricados con acero inoxidable austenítico. Lo anterior, ha ocasionado que múltiples industrias traten de emplear otra clase de alternativas, diferentes al acero inoxidable austenítico, sin reducir significativamente las características del producto final.

Uno de los sectores que se han visto obligados a buscar alternativas más económicas que el acero inoxidable austenítico, han sido las empresas fabricantes de implementos de cocina. Por tal motivo, dichas empresas han optado por la utilización de otros materiales, con una resistencia a la corrosión similar a la del acero inoxidable austenítico; manteniendo una buena conformabilidad y resistencia mecánica; entre los cuales se encuentra el aluminio y sus aleaciones, u otros aceros inoxidable como los martensíticos o los ferríticos. Estos últimos, caracterizados por una excelente ductilidad y conformabilidad, ideal en la fabricación por conformado de los utensilios; adicional a ello, los elevados contenidos de cromo, le brindan a estos aceros, una buena resistencia a la corrosión, similar a la observada en los aceros inoxidable austeníticos.

Debido a que una de las principales propiedades que se requiere para la fabricación de implementos de cocina es su elevada resistencia a la corrosión

frente a los alimentos y los agentes de limpieza comerciales, la presente investigación busca evaluar el efecto que tiene el uso de tres diferentes agentes de limpieza simulados, compuestos por hidróxido de sodio, ácido acético y una mezcla de ácido acético y peróxido de hidrogeno, en el comportamiento frente a la corrosión de un acero inoxidable ferrítico comercial AISI 430 mediante pruebas electroquímicas y caracterización morfológica por microscopia electrónica de barrido (*SEM*).

## **1. OBJETIVOS**

### **2.**

#### **1.1 OBJETIVO GENERAL.**

Evaluar el efecto del agente de limpieza en el comportamiento a la corrosión del acero inoxidable AISI 430 mediante pruebas electroquímicas.

#### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Determinar la velocidad de corrosión que sufre el acero inoxidable AISI 430 en soluciones de limpieza simuladas al 7% (w/v) NaOH, 5% (v/v) de ácido acético y una solución acuosa con 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) peróxido de hidrógeno y 1% de ácido sulfúrico, mediante técnicas electroquímicas.
- Identificar el daño superficial que experimenta el acero AISI 430 durante los diferentes tiempos de inmersión, en los distintos agentes de limpieza.
- Simular los fenómenos interfaciales que se generan entre el material y los diferentes electrolitos, empleando circuitos eléctricos análogos.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 ACERO INOXIDABLE.

Los aceros inoxidable hacen parte de la familia de las aleaciones hierro-carbono las cuales contienen un mínimo de 10,5% de cromo, los cuales a su vez pueden contener diferentes elementos aleantes diferentes al cromo, como lo son el níquel y el molibdeno. La principal característica de los aceros inoxidable es su elevada resistencia a la corrosión, debido a la gran afinidad química entre el cromo y el oxígeno que permite la formación de una capa de óxido pasivante que impide la corrosión del hierro.

De acuerdo con su microestructura, los aceros inoxidable pueden clasificarse en:

- Ferríticos: caracterizados por una estructura compuesta por ferrita, que le confiere a esta clase de aceros una capacidad magnética.
- Martensíticos: son aceros inoxidable que poseen altos contenidos de carbono, lo cual permite su endurecimiento por tratamiento térmico, confiriéndole una estructura martensítica al acero.
- Austeníticos: compuestos con contenidos de níquel superiores al 7% permiten en su estructura metalográfica la fase austenita, no magnetizable y no endurecidos por tratamiento térmico [51].

#### 2.1.1 Aceros inoxidable ferríticos.

Los aceros inoxidable ferríticos presentan una capacidad magnética, con elevadas cantidades de cromo como principal elemento aleante, alrededor del 16-20%; sin embargo los contenidos de carbono son inferiores a los Martensíticos

(0.25%), permitiendo obtener una estructura completamente ferrítica. Lo anteriormente mencionado, conlleva a que estos aceros no responden a los tratamientos térmicos, aunque sean calentados hasta los 1095°C, donde ocurre un crecimiento del tamaño de grano

En los aceros inoxidable ferríticos, los contenidos típicos de los elementos de aleación son:

- Carbono: 0,01% min
- Cromo: 16% min
- Otros elementos: Mn, Si, P, S, Mo, Ti, Nb, Cu.

La composición química presente en esta clase de aceros le permite mantener la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del hierro, correspondiente a la fase alfa desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión; sin atravesar por el campo de estabilización de la fase austenita durante el calentamiento [16, 46].

### 2.1.2 Acero AISI 430.

El acero inoxidable AISI 430, corresponde al grupo de los aceros inoxidable ferríticos de la serie 400, cuya composición se puede apreciar en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química del acero inoxidable AISI 430.

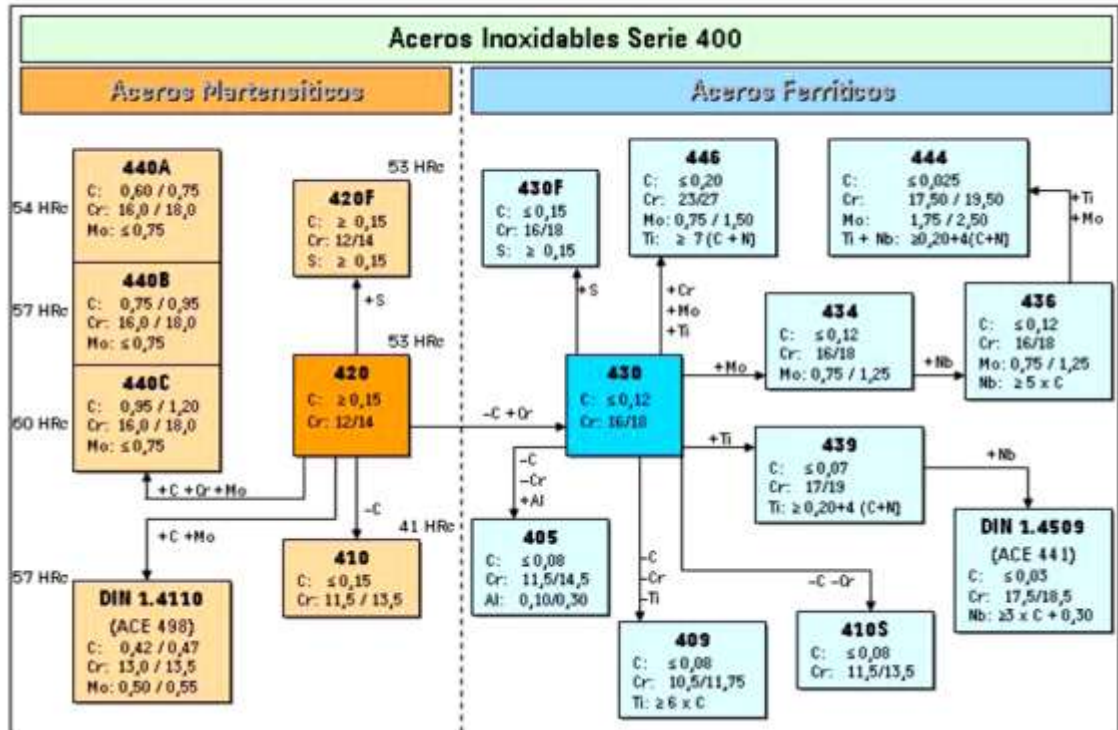
Composición química elemental									
Elemento	Cr	S	P	Si	Mn	C	Ni	Mo	Otros
% Min.	16	---	---	---	---	---	---	---	---
% Max.	18	0.03	0.04	1	1	0.12	---	---	---

**Fuente: Clasificación de los aceros inoxidable según Norma AISI.**

El acero inoxidable AISI 430 presenta elevados contenidos de cromo, en comparación con los aceros inoxidable Martensíticos, lo cual le confiere una elevada resistencia a la corrosión, principalmente la corrosión bajo esfuerzos

(*Stress Corrosion Cracking - SCC*); sin embargo los altos contenidos de cromo causan una disminución en la tenacidad de ésta clase de acero [23].

**Figura 1.** Representación gráfica de los aceros inoxidable ferríticos de la serie 400.



**Fuente:** Clasificación de los aceros inoxidable según Norma AISI.

Esta clase de aceros presentan una buena ductilidad y conformabilidad, permitiendo la obtención de piezas con geometrías complejas y sin necesidad de procesos de soldadura, por lo que es ampliamente empleado en la fabricación de implementos de cocina como cacerolas y cubiertos, refrigeradores, lavavajillas, piezas de automóviles, cámaras de combustión de motores diesel y contenedores de ácido nítrico [14]

## **2.2 MÉTODOS DE LIMPIEZA.**

El proceso de limpieza, principalmente en los aceros inoxidable, permite preservar su estética e integridad física, manteniendo su resistencia a la corrosión. Dado que la elevada resistencia a la corrosión en los aceros inoxidable se debe a una fina capa de óxido de cromo que protege al metal del medio; formada por la interacción entre el oxígeno atmosférico y el cromo en la aleación; la presencia de cualquier contaminante en la superficie del acero inoxidable obstaculiza la interacción entre el oxígeno y el cromo, por lo que el proceso de pasivación del acero se ve perjudicado [1].

De manera similar, la acumulación de contaminantes puede permitir la retención de agentes corrosivos, los cuales pueden reducir la capacidad protectora de la capa de óxido y de la aleación. Por tal motivo, el proceso de limpieza garantiza la remoción de los contaminantes superficiales, permitiendo conservar el aspecto y la integridad de la superficie del acero inoxidable [15].

Sin embargo los aceros inoxidable pueden ser contaminados por diferente clase de sustancias, por lo que pueden generar diferentes efectos en el comportamiento a la corrosión de los aceros inoxidable. Lo anterior implica que dependiendo del tipo de contaminantes, se debe seleccionar el tipo de agente de limpieza necesario para su remoción o un procedimiento [1,15].

### **2.2.1 Métodos físicos**

Los métodos físicos se basan en la aplicación de energía mecánica que induce la remoción de los contaminantes; la cual se realiza empleando una herramienta. Es considerado el método de limpieza más empleado; en especial usando materiales abrasivos duros o suaves; sin embargo este método puede producir rayado de la superficie, así como incrustaciones de material abrasivo. Adicionalmente y de manera complementaria, se emplea un agente limpiador, los cuales generalmente

contienen agentes corrosivos; por lo cual el proceso de limpieza debe estar acompañado de un enjuague con agua limpia y posterior secado, para que no se formen zonas localizadas de corrosión.

### **2.2.2 Métodos químicos**

La limpieza empleando métodos químicos se fundamenta en el uso de una sustancia que interactúe fisicoquímicamente con el material contaminante, promoviendo la remoción del contaminante. Con base en lo anterior se pueden dividir en:

**Limpieza con disolventes:** Es uno de los más empleados para la remoción de grasas y aceites, principalmente con ausencia de cloro como lo son la acetona y los alcoholes. El disolvente presenta las mismas características químicas del contaminante, facilitando el proceso de disolución.

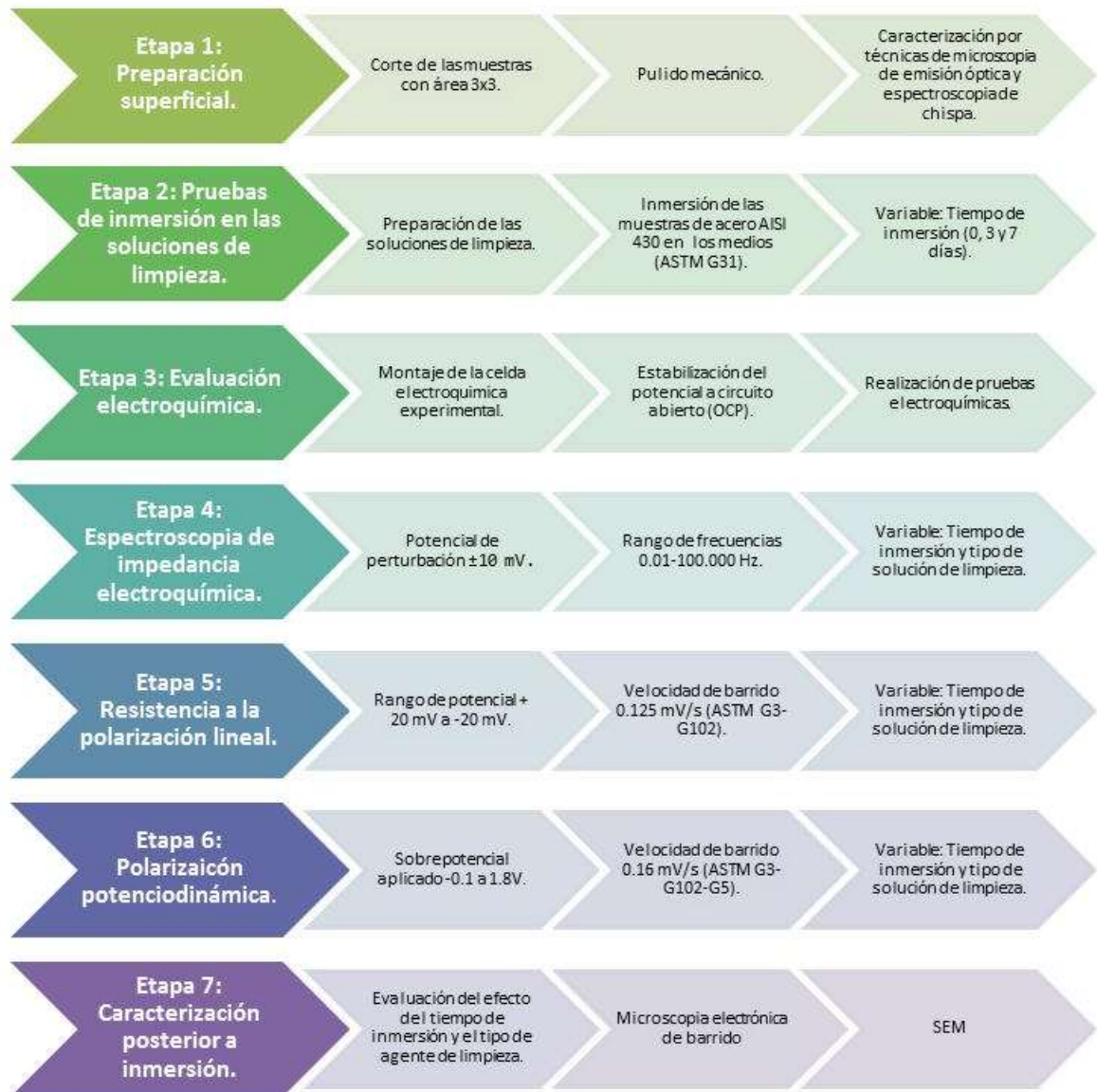
**Limpieza con ácidos y bases:** Los ácidos y bases tienen la capacidad de reaccionar químicamente con las impurezas, disolviendo los contaminantes o generando productos menos insolubles y con mayor facilidad de removerlos. Esta clase de soluciones de limpieza conocidas como decapantes, facilitan el proceso de remoción de heterogeneidades en la superficie, permitiendo la remoción de inclusiones, abrasivos o heterogeneidades químicas [1].

**Limpiadores Domésticos:** Los limpiadores domésticos son categorizados como detergente (no abrasivo) y limpiadores abrasivos, ambos de muy eficaces para suciedad leve, manchas y depósitos de sólidos, así como aceites y grasas ligeras, tales como huellas dactilares. Estos elementos limpiadores tienen un efecto tenso activo que les permite cambiar el comportamiento de las grasas o de las partículas, gracias a su carácter hidrofílico-hidrofóbico [39].

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental realizado en la presente investigación se llevó a cabo en siete etapas, como se puede observar en la figura 2.

**Figura 2** Metodología experimental realizada en la presente investigación



Fuente: Autor

### **3.1 ETAPA 1: PREPARACIÓN SUPERFICIAL.**

Las muestras empleadas para la realización del proyecto fueron muestras cuadradas de acero inoxidable AISI 430 con unas dimensiones de 3 × 3 cm, las cuales fueron pulidas mecánicamente, empleando papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) y suspensiones de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con tamaño de partículas de 0.5 y 0.05 μm, como se especifica en la norma ASTM G1-103, hasta obtener una superficie espejo. Este procedimiento previo a cualquier prueba de caracterización permite eliminar heterogeneidades superficiales en las muestras metálicas [4].

#### **3.1.1 Caracterización del material**

Previo a cualquier tipo de pruebas de caracterización física o electroquímica, se seleccionaron muestras de manera aleatoria para realizar una caracterización física y química del material a emplear corroborando que correspondiera a un acero AISI 430. Inicialmente se realizó una caracterización química empleando la técnica de espectroscopia de arco, mediante un espectrómetro Q4 TASMÁN, con el fin de obtener la composición química elemental del material a emplear. Posteriormente las muestras desbastadas y pulidas fueron inmersas en una solución compuesta por 5 g de FeCl<sub>3</sub>, 16 ml de HCl y Etanol al 95%, por un tiempo de inmersión de 1 minuto; como establece la norma ASTM E-407. La muestra fue subsecuentemente lavada, secada y observada en un microscopio óptico Olympus GX71.

### **3.2 ETAPA 2: PREPARACIÓN DE LOS AGENTES DE LIMPIEZA Y PRUEBAS DE INMERSIÓN.**

#### **3.2.1 Preparación de los agentes de limpieza**

Con base en las revisiones bibliográficas se emplearon soluciones acuosas con diferente composición química, que simulan la composición química de agentes de

limpieza usados comercialmente [10]. Las soluciones empleadas se muestran a continuación:

1. Medio 1: Solución de hidróxido de sodio al 7% (w/v).
2. Medio 2: Solución de ácido acético al 5% (v/v).
3. Medio 3: Solución acuosa con 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) de peróxido de hidrógeno y 1% (v/v) de ácido sulfúrico (Solución peroxiacética).

Las soluciones de limpieza se prepararon de manera individual y simultáneamente antes de la realización de cualquier prueba o procedimiento. Las soluciones simuladas fueron empleadas inmediatamente después de su preparación, dada a la inestabilidad química y termodinámica de algunos de los reactivos (peróxido de hidrógeno), que impedían el almacenamiento de la solución; por tal motivo se decidió preparar la cantidad de solución necesaria.

### **3.2.2 Inmersión de las muestras en las soluciones de limpieza simuladas.**

Las muestras pulidas de acero inoxidable AISI 430 son seleccionadas e inmersas en recipientes, previamente llenados con las soluciones de limpieza simuladas. Con el fin de evitar heterogeneidades en los parámetros de la investigación, las muestras fueron inmersas en 100 ml de las diferentes soluciones de limpieza y tapadas para evitar contaminación. Adicionalmente, se mantuvieron a 25°C y retiradas en los mismos tiempos en inmersión [7].

Con base en lo anterior, se establecieron los parámetros de variables y constantes, los cuales fueron consignados en la tabla 2 para la evaluación de las diferentes variables de esta investigación.

**Tabla 2.** Variables seleccionadas para el comportamiento del acero inoxidable AISI 430 en agentes de limpieza.

VARIABLE	CONDICIÓN
Composición química de la aleación	AISI 430 (Constante)
Agente de limpieza	Solución acuosa 7% NaOH. Solución acuosa 3-5% ácido acético Solución de acuosa con 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) peróxido de hidrógeno y 1% de ácido sulfúrico.
Tiempo de exposición en solución	0, 3 Y 7 días
Temperatura	25°C

**Fuente: Autor**

### 3.3 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN.

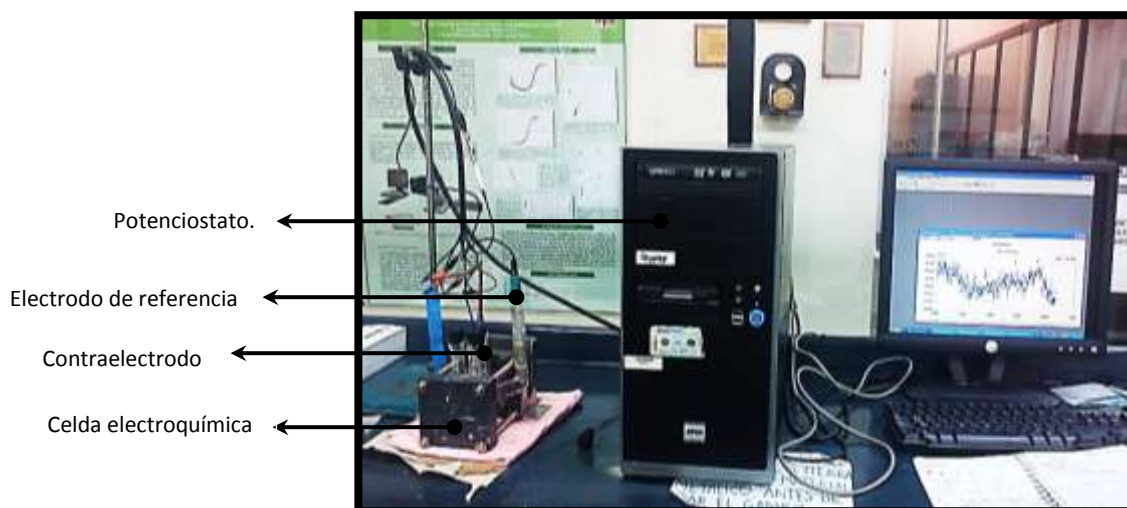
#### 3.3.1 Caracterización electroquímica

La evaluación del efecto de los diferentes agentes de limpieza en las propiedades a la corrosión del acero AISI 430 se realizó mediante el uso de técnicas electroquímicas, determinando la velocidad de corrosión del acero en dichos medios y para los diferentes días en inmersión.

#### 3.3.2 Celda electroquímica

Para la realización de las pruebas electroquímicas se llevaron a cabo empleando una celda con tres electrodos, un electrodo de referencia Ag/AgCl, el electrodo de trabajo (probeta de acero AISI 430) y un contra electrodo de platino, como se observa en la figura 3. La celda respectiva fue conectada al potencióstato GAMRY 750, empleando un volumen de solución constante para las pruebas electroquímicas de 300 ml, manteniendo una temperatura constante de 25°C durante la realización de la prueba.

**Figura 3.** Montaje experimental para la pruebas de caracterización electroquímica de las muestras de acero inoxidable en los agentes de limpieza.



**Fuente:** Autor

En la tabla 3, se presentan las condiciones a las cuales se llevó a cabo las diferentes pruebas electroquímicas, así como el orden en el cual se llevaron a cabo.

**Tabla 3.** Condiciones para la caracterización electroquímica.

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA	
Prueba	Condiciones
Potencial de circuito abierto (OCP)	Seguimiento del potencial por un tiempo de 2 horas y 30 minutos.
Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)	Potencial de perturbación ( $E_{\text{perturbación}}$ ): $\pm 10$ mV. Frecuencia inicial ( $F_0$ ): 0.01 Hz. Frecuencia final ( $F_f$ ): 100.000 Hz.
Resistencia a la polarización lineal (RPL)	Potencial inicial ( $E_0$ ): -20 mV. Potencial final ( $E_f$ ): 20 mV. Velocidad de barrido: 0.125 mV/s.
Polarización potenciodinámica	Sobrepotencial anódico ( $\Delta E$ ): + 1.8 V. Sobrepotencial catódico ( $\Delta E$ ): -0.1V Velocidad de barrido: 0.16 mV/s.
Extrapolación de Tafel	Potencial anódico ( $E_{\text{anódico}}$ ): + 200 mV. Potencial catódico ( $E_{\text{catódico}}$ ): -200 mV. Velocidad de barrido: 0.16 mV/s.

Las pruebas electroquímicas se realizaron de manera secuencial y a partir del potencial de circuito abierto, obtenido después de 30 minutos de interacción entre el electrolito y la superficie de la muestra [5, 6, 9].

### **3.3.3 Caracterización física y química**

De manera complementaria a las pruebas de caracterización electroquímica, se llevaron a cabo pruebas de caracterización morfológica y composicional mediante microscopia electrónica de barrido; analizando los cambios morfológicos y composicionales en la superficie de la aleación, frente a los diferentes agentes de limpieza y durante los días en inmersión.

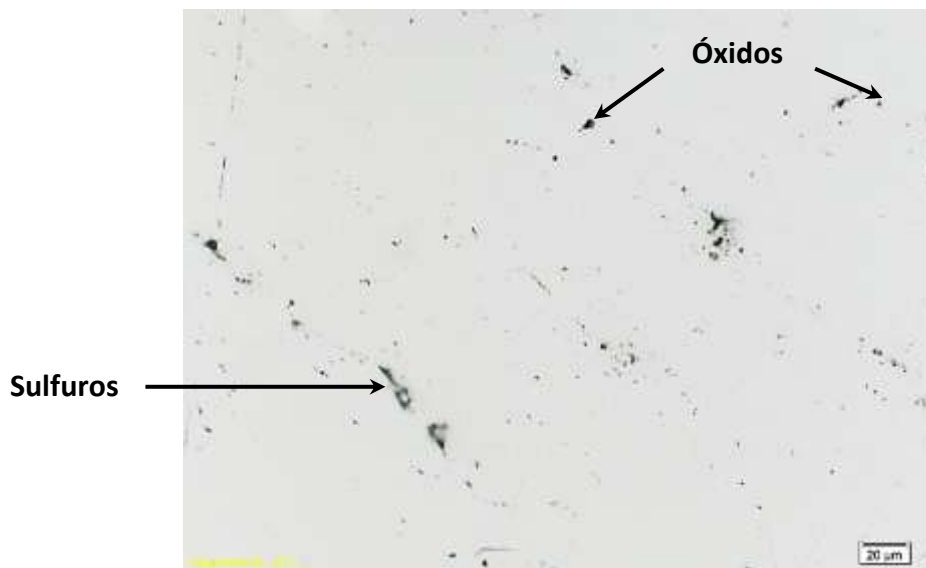
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 430.

Previo a la caracterización y evaluación del acero inoxidable AISI 430 en los diferentes agentes de limpieza se llevó a cabo una caracterización microestructural previa y después de un ataque químico con una solución compuesta por 5 g de  $\text{FeCl}_3$ , 16 ml de HCl y Etanol al 95% por 1 minutos.

En la figura 4 se presenta la micrografía del acero inoxidable previo al ataque con el reactivo químico, donde se observa la presencia de inclusiones no metálicas en la aleación. La morfología de esta clase de inclusiones sugiere que corresponden a óxidos (inclusiones redondas) y sulfuros (inclusiones alargadas) [49].

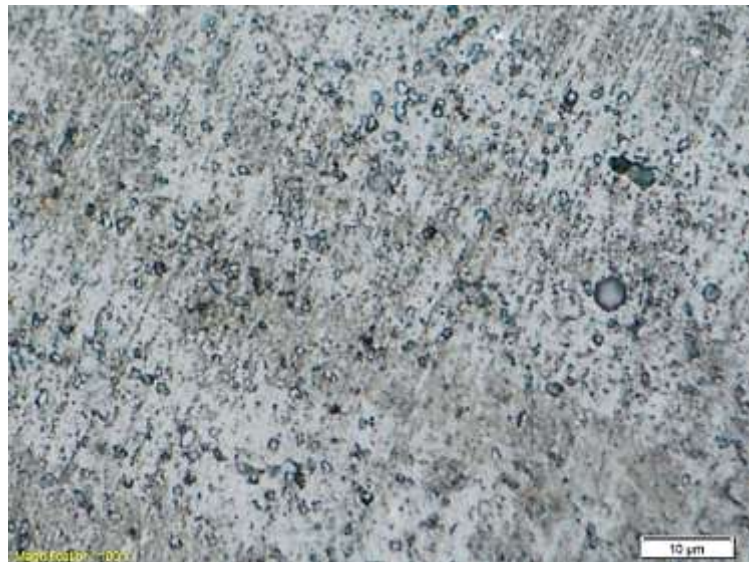
**Figura 4.** Micrografía óptica del acero inoxidable AISI 430 previo al ataque químico.



**Fuente:** Autor

Posterior al ataque químico, se observa un ataque de los componentes del reactivo a la matriz ferrítica en la estructura del acero inoxidable, como se observa en la figura 5. De igual manera se aprecia que los granos ferríticos en la microestructura del acero inoxidable presentan una morfología alargada, producto de un proceso de deformación plástica, durante el proceso de fabricación del material, el cual pudo realizarse por laminación [22].

**Figura 5.** Micrografía óptica del acero inoxidable AISI 430 posterior al ataque químico.



**Fuente:** Autor

#### **4.2 CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL POR ESPECTROSCOPIA DE ARCO O CHISPA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430.**

Con el propósito de garantizar que las muestras empleadas en la presente investigación, presentaran la composición correspondiente al acero inoxidable AISI 430; se llevó a cabo una caracterización mediante la técnica de espectroscopia de chispa o arco de dos muestras aleatorias, donde se obtuvieron los porcentajes promedio de los elementos, como se observa en la tabla 4.

**Tabla 4.** Espectro composicional-elemental del acero inoxidable AISI 430 usado en la investigación.

Elemento	Porcentaje promedio en la aleación
<b>Carbono (C)</b>	0.096%
<b>Hierro (Fe)</b>	81.22%
<b>Cromo (Cr)</b>	16.70%
<b>Silicio (Si)</b>	0.338%
<b>Manganeso (Mn)</b>	0.512%
<b>Fósforo (P)</b>	0.020%
<b>Azufre (S)</b>	<0.150%
<b>Molibdeno (Mo)</b>	0.029%
<b>Níquel (Ni)</b>	0.256%

**Fuente: Autor**

El espectro composicional obtenido sobre las muestras de acero inoxidable presentó un porcentaje promedio de cromo del 16,70%; valor muy cercano al umbral mínimo del 16% sugerido para el acero inoxidable AISI 430. Con respecto a los porcentajes de carbono, hierro, silicio y manganeso; las cantidades observadas en el espectro se encuentran entre los rangos permitidos para esta clase de acero. De igual manera se observaron trazas de otros elementos químicos; los cuales podrían generar inclusiones o heterogeneidades químicas tanto en el material como en la capa de óxido formada en su superficie.

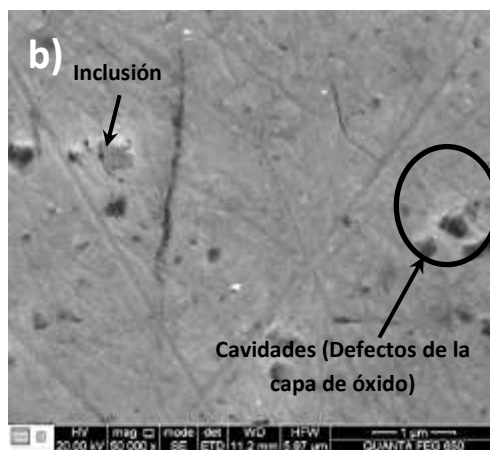
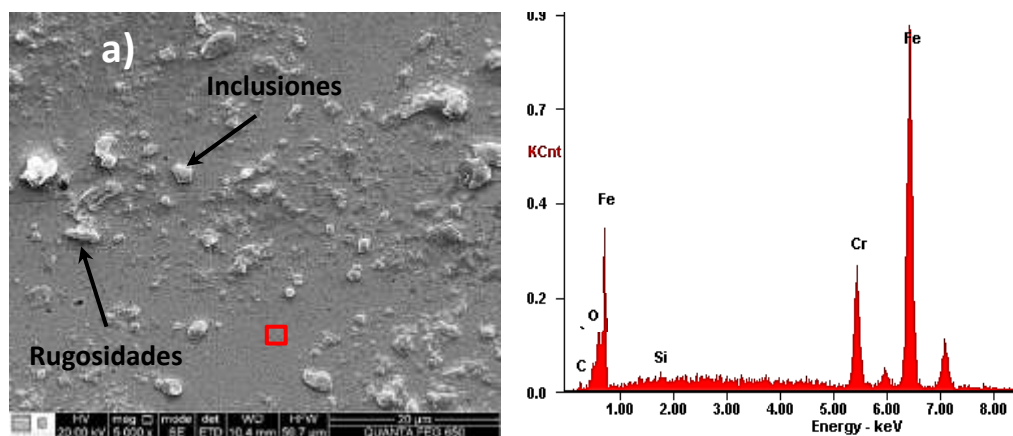
#### **4.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430 EN LOS DIFERENTES AGENTES DE LIMPIEZA.**

Al finalizar los días en inmersión se llevó a cabo la caracterización morfológica de las muestras mediante microscopía electrónica de barrido (*SEM*), por sus siglas en inglés, con el propósito de identificar el daño por corrosión ocasionado en las muestras en los diferentes medios y durante diferentes tiempos de exposición.

En la figura 6-a) se puede apreciar la superficie del acero inoxidable AISI 430 desbastada y pulida, la cual presenta una superficie libre de porosidades o

cavidades; homogénea y compacta sobre el sustrato. Las características morfológicas de dicha superficie, así como los porcentajes de hierro y cromo, del 76% y 16% respectivamente, observados en los espectros composicionales EDS, permiten garantizar que la superficie se encuentra formada por una capa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [18].

**Figura 6.** Micrografías electrónicas de barrido de las muestras de acero inoxidable AISI 430 a) análisis composicional EDS y b) morfológico a 50.000X



**Fuente: Autor**

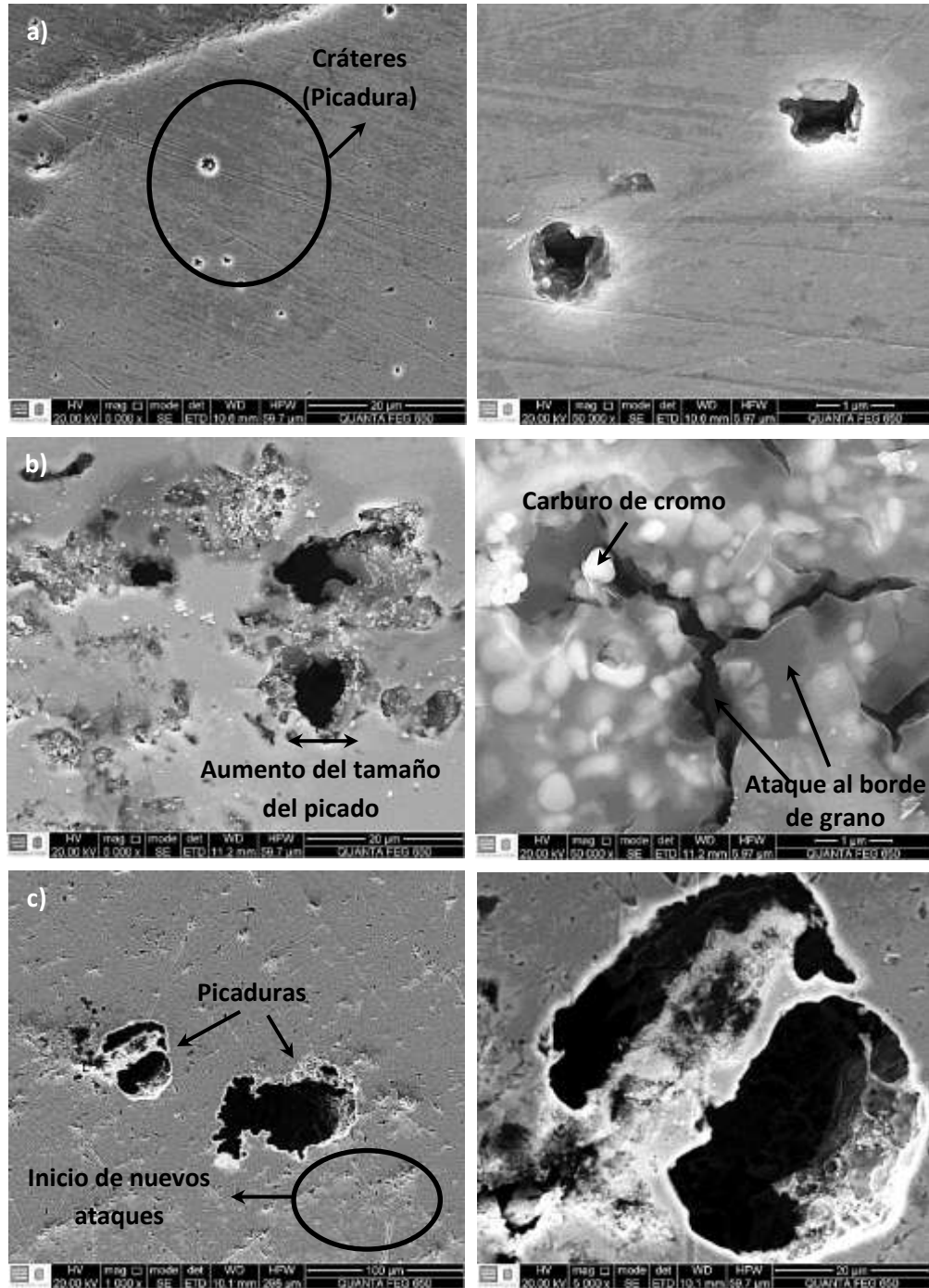
Al analizar a mayores magnificaciones la superficie de la muestra, como se aprecia en la figura 6-b, se observa que la capa de óxido formada de manera

espontánea en la superficie del sustrato, presenta pequeños defectos superficiales como cavidades; los cuales podrían funcionar como zonas activas con los iones del electrolito. Sin embargo la alta homogeneidad y compactación sugieren que esta capa de óxido, puede servir de barrera eléctrica; permeabilizando el sustrato, frente a las especies activas del electrolito.

A continuación se observaran los análisis morfológicos y composicionales entre las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersas en los diferentes agentes de limpieza a diferentes tiempos; en los cuales se aprecian variaciones morfológicas significativas en la superficie del acero inoxidable, debido al daño por corrosión que experimenta el sustrato con respecto al medio empleado y al tiempo en inmersión.

En la figura 7-a), inicialmente se puede observar que con 30 minutos en inmersión en solución de ácido acético, ocurre la formación de cráteres en la superficie del sustrato con un diámetro promedio de  $1.7 \mu\text{m}$ , los cuales, conforme incrementan los tiempos en inmersión se observa un aumento abrupto en el diámetro de los cráteres, como se aprecia en la figura 7-b); debido a la disolución progresiva que experimenta la muestra de acero inoxidable, por la agresividad del medio [22]. Al observar más a fondo el daño en la superficie de la muestra para un tiempo de inmersión de 3 días, el proceso de disolución de la capa pudo haberse generado por un ataque preferencial a los bordes de grano en la microestructura de la aleación, al observarse a mayores magnificaciones, la formación de grietas en una zona limítrofe de la capa; la cual se ve acompañada por la formación de precipitados, lo cual podría deberse a la nucleación de carburos de cromo como lo reportan otros autores [27].

**Figura 7.** Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 5% (v/v) de ácido acético, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión.



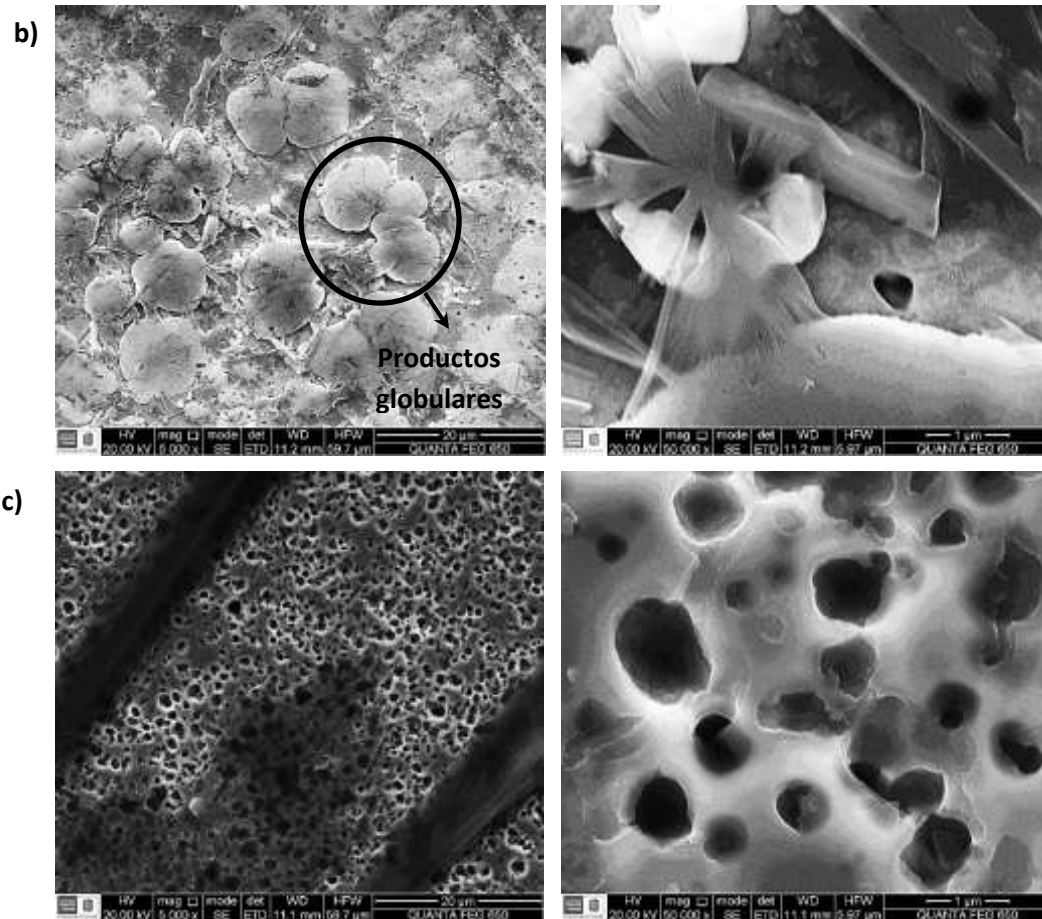
Fuente: Autor.

Al analizar la evolución del ataque a la capa de óxido, se observa en la figura 7-c) que a los 7 días en inmersión, el diámetro de los cráteres se incrementa significativamente, mostrando la aparición de nuevos sitios de ataque, con un menor diámetro; lo cual podría sugerir que el daño causado en el acero inoxidable ocurre por la disolución localizada de la capa de óxido. Lo anterior permite asegurar que el mecanismo de daño observado, ocurre por un proceso de corrosión por picado, lo cual conllevaría a un incremento en la profundidad de la picadura conforme aumentan los tiempos en inmersión [10, 37].

Al estudiar las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio, se pudo apreciar que el daño por corrosión en ésta clase de medio ocurre con menor severidad, con respecto a lo observado en las muestras inmersas en solución de ácido acético. En la superficie de la aleación se observa, en los primeros 30 minutos en inmersión, la formación de pequeños depósitos con morfología irregular en la superficie de la muestra, sugiriendo la formación de productos de corrosión, que podrían actuar como una capa pasiva del material. Así mismo se presentaron indicios de picado en la superficie del óxido, al identificarse cráteres con un tamaño inferior a  $1\ \mu\text{m}$ , como se observa en la figura 8-a).

**Figura 8.** Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 7% (v/v) de NaOH, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión.





**Fuente: Autor.**

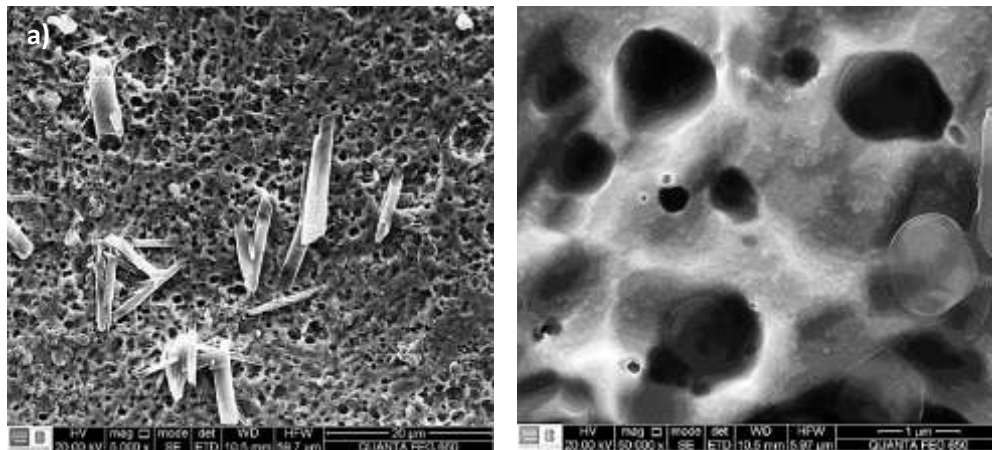
Al incrementarse el tiempo en inmersión en dicho medio, se aprecia el crecimiento de los precipitados vistos previamente a los 30 minutos en inmersión, formando depósitos globulares en la superficie del óxido, enriquecidos en cromo y sodio (Ver anexo E-b), como se observa en la figura 8-b, correspondiente a óxido de cromo e hidróxido de hierro; formado como producto de corrosión entre la muestra y el medio, durante los 3 días en inmersión. Al formarse de dicho producto, éste podría disminuir la permeabilidad de la muestra frente al medio, lo cual disminuiría la interacción química entre el medio y el sustrato, disminuyendo el proceso de corrosión [44], lo cual se podría corroborar con pruebas electroquímicas. Cabe mencionar que en la superficie de dicho sólido, se evidencia la presencia de

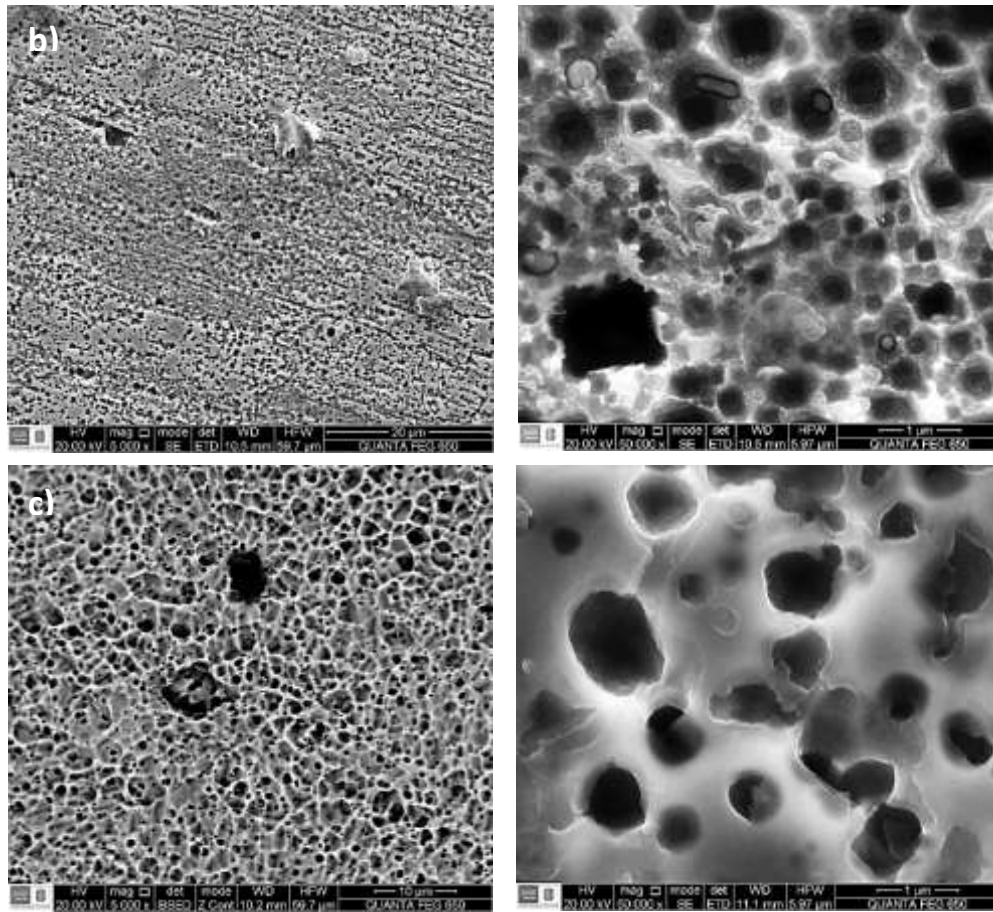
porosidades, por lo que las especies electroactivas del medio pueden difundir a través de ellas y de la capa hasta el sustrato, por lo que su carácter protector se podría ver afectado.

Al transcurrir los 7 días en inmersión se observa un incremento en el diámetro y el número de porosidades en la superficie de la muestra, específicamente sobre la capa de productos, como se observa en la figura 8-c. Lo observado sugiere que al aumentar los tiempos de inmersión ocurre una transpasivación de la capa de cromo, lo cual genera su disolución, que se manifiesta en la aparición de una mayor cantidad de porosidades en la superficie del sólido, aumentando su permeabilidad del sustrato frente al medio, lo que podría aumentar la velocidad de corrosión.

Las muestras inmersas en solución peroxiacética presentan, posterior a 30 minutos de interacción con el medio, la aparición de múltiples cráteres o picaduras sobre la superficie de la capa de óxido; por lo que el medio presenta una elevada agresividad hacia el acero inoxidable, como se observa en la figura 9-a.

**Figura 9.** Micrografías electrónicas de barrido para la muestra de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución acuosa 16% (v/v) de ácido acético, 23% (v/v) peróxido de hidrógeno y 1% de ácido sulfúrico, a) por 30 minutos en inmersión, b) por 3 días en inmersión y c) por 7 días en inmersión.





**Fuente: Autor.**

La elevada formación de picaduras en el óxido y la superficie es consecuencia de la elevada capacidad oxidante que presenta el medio, al estar constituido de peróxido de hidrogeno, el cual causaría un aumento en los potenciales del sistema, como se observarían más adelante, en las curvas potencial vs tiempo, causando un cambio de estabilidad termodinámica, del estado pasivo al estado activo [36]. Conforme incrementan los tiempos en inmersión se ve un aumento en la densidad de picaduras, conllevando a un mayor ataque del medio hacia el sustrato, como se observó en las figuras 9-b y 9-c. El daño visto en las muestras inmersas en solución de ácido acético y en solución peroxiacética, sugieren que el proceso de picado podría ser atribuido a la disolución parcial que sufre la capa de óxido, por acción del ion  $H^+$  provenientes del ácido, atacando preferencialmente

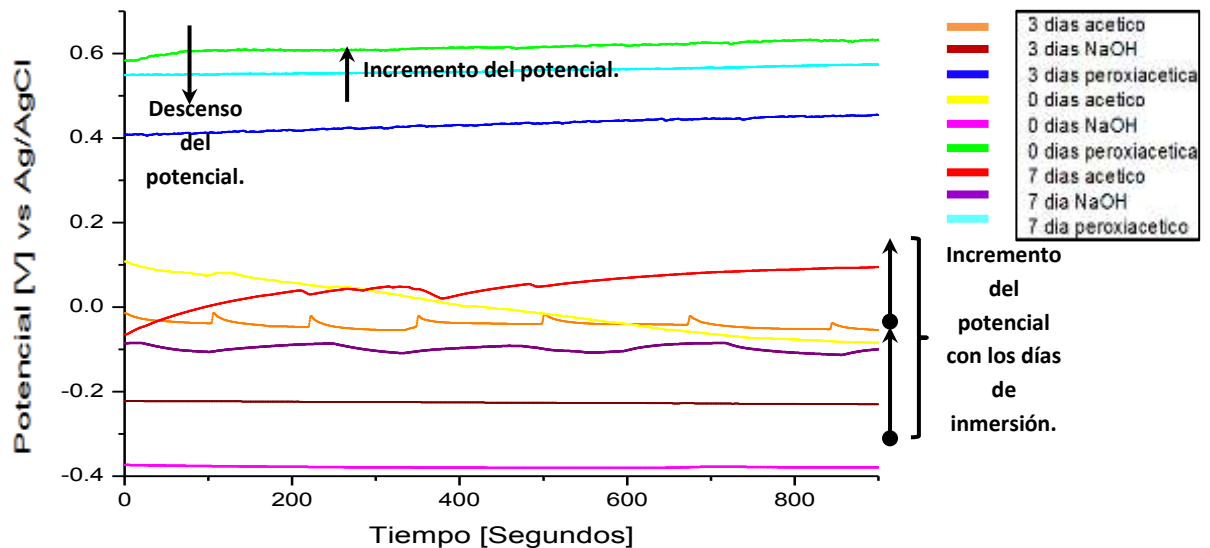
las zonas de heterogeneidades superficiales o químicas, como inclusiones y cavidades, las cuales podrían presentar un potencial menos noble que la zona circundante a ellas, por lo que actúan como sitios activos [26, 28]

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI-SAE 430 EN LOS DIFERENTES AGENTES DE LIMPIEZA.

##### 4.1.1 Evaluación del potencial a circuito abierto

Inicialmente para observar el comportamiento electroquímico del acero inoxidable AISI 430 se realizó el seguimiento del potencial con respecto al tiempo, sin polarizar la muestra, en los diferentes agentes de limpieza e inmersos por a 3 y 7 días, el resultado se puede observar en la figura 10.

**Figura 10.** Diagrama potencial vs. Tiempo para las muestras de acero inoxidable



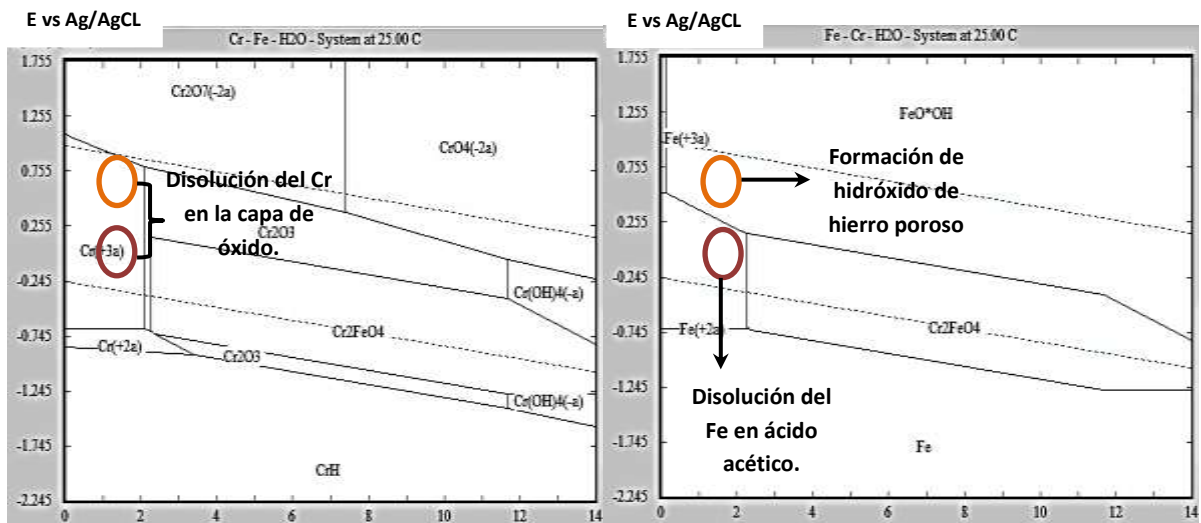
**Fuente: Autor**

Al observar el seguimiento del potencial con respecto al tiempo, las muestras inmersas en solución acuosa 7% (w/v) de NaOH y 5% (v/v) de ácido acético, muestran un incremento en los valores de potencial con respecto al tiempo en inmersión, polarizándose hacia potenciales mucho más activos. Por el contrario

las muestras inmersas en solución peroxiacética; presentaron una disminución del potencial a los 3 días de inmersión; sin embargo éste comportamiento no fue continuo ya que se generó un incremento del potencial en las muestras inmersas por 7 días en este agente de limpieza. La variación de potenciales a rangos de mayor actividad, podría sugerir que con el incremento de los tiempos de inmersión podría haber una mayor tendencia a la disolución del sustrato [23].

En la figura 11 se puede apreciar los diagramas de estabilidad termodinámico, para el sistema Fe-Cr-H<sub>2</sub>O permitiéndonos observar la posible estabilidad de los productos existentes en la muestra.

**Figura 11.** Diagramas de equilibrio termodinámico potencial vs pH del sistema Fe-Cr-H<sub>2</sub>O, usado en las muestras inmersas en solución peroxiacética y de ácido acético.



**Fuente: Autor**

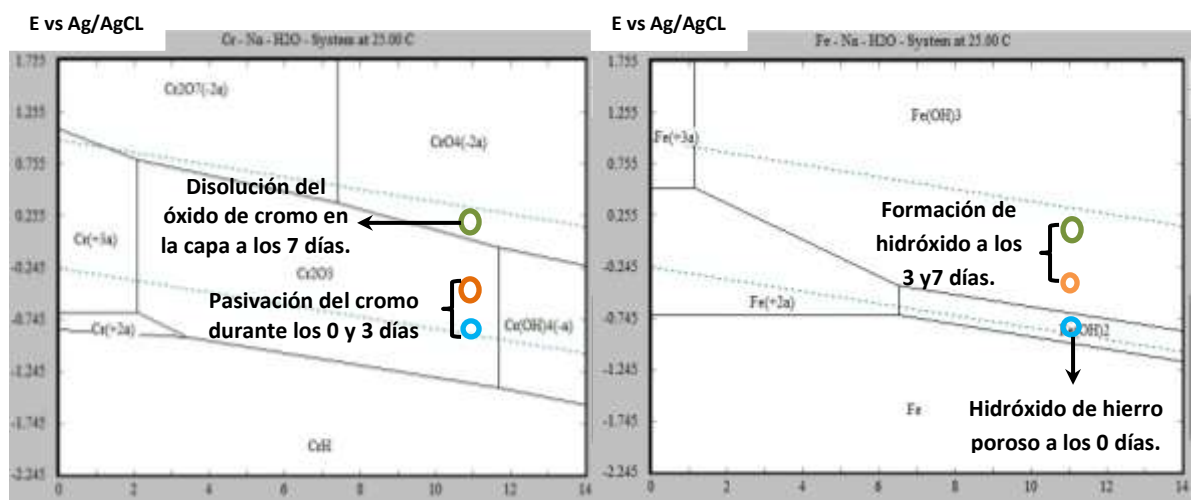
En las muestras inmersas en ácido acético, se observa en el rango de pH ácido [1-4] y potencial [-0.1 a 0.1V] para este medio, que el hierro y cromo, termodinámicamente estarían en un estado iónico de Fe<sup>+2</sup> y Cr<sup>+3</sup>; lo cual sugiere

que la superficie del acero inoxidable pudo experimentar un proceso de disolución en este medio, sin importar el tiempo en inmersión, como lo muestra la figura 11.

De igual manera, se observa que las muestras inmersas en solución peroxiacética, presentan estabilidad de las especies iónicas cromo, pese a elevar los potenciales a rangos más nobles; sin embargo se observa la posible formación de hidróxido de hierro en dichas muestras. Lo anterior conlleva a que la capa de óxido de cromo en la superficie del acero inoxidable sea inestable en estos medios, por lo que el proceso de corrosión no se verá inhibido o retardado.

Por el contrario, las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio en el rango de pH y potencial trabajados, se observa la estabilidad de hidróxidos de hierro  $[\text{Fe}(\text{OH})_2$  y/o  $\text{Fe}(\text{OH})_3]$ , acompañado por la formación de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); sin embargo el tipo de producto en la superficie, depende del tiempo en inmersión que posea la muestra en el agente de limpieza. En el caso de la muestra inmersa por 0 días, la capa de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) puede ser acompañada por la precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ; sin embargo este último sólido es poroso y poco adherente, por lo que no garantiza una adecuada protección frente al medio [2], como se observan en los diagramas de la figura 12.

**Figura 12.** Diagramas de equilibrio termodinámico potencial vs pH para el sistema Fe-Cr-H<sub>2</sub>O-Na, usado en las muestras inmersas en solución de NaOH

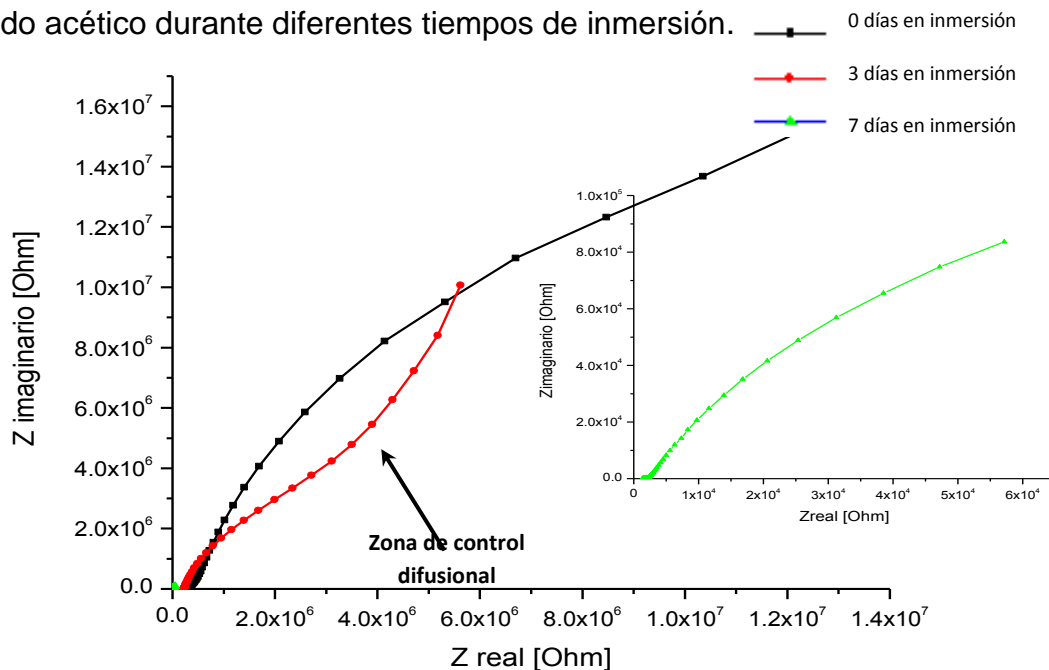


En el caso de la muestra inmersa por 3 días, las condiciones de potencial pueden permitir la formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en la superficie del acero inoxidable; el hidróxido de hierro formado para este tiempo en inmersión, presenta un mayor rango de estabilidad, mayor adherencia y menor porosidad que el  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  [2]. Sin embargo al incrementarse los tiempos en inmersión a 7 días, se observa que pese al aumento en el potencial a rangos más nobles, ocurre un cambio de estabilidad en el óxido de cromo; lo cual se traduce en una transpasivación y disolución de la capa  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , liberando cromatos hacia el electrolito; lo cual disminuiría el carácter protector sobre el sustrato.

#### 4.1.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)-Diagramas de Nyquist.

Los diagramas de Nyquist obtenidos de los espectros de impedancia en la figura 13, muestran una disminución del diámetro de los domos conforme incrementa el tiempo de inmersión, para la muestra inmersa en solución de ácido acético, por lo que la resistencia a la polarización del acero inoxidable disminuye considerablemente conforme incrementa el tiempo en inmersión [32].

**Figura 13.** Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de ácido acético durante diferentes tiempos de inmersión.

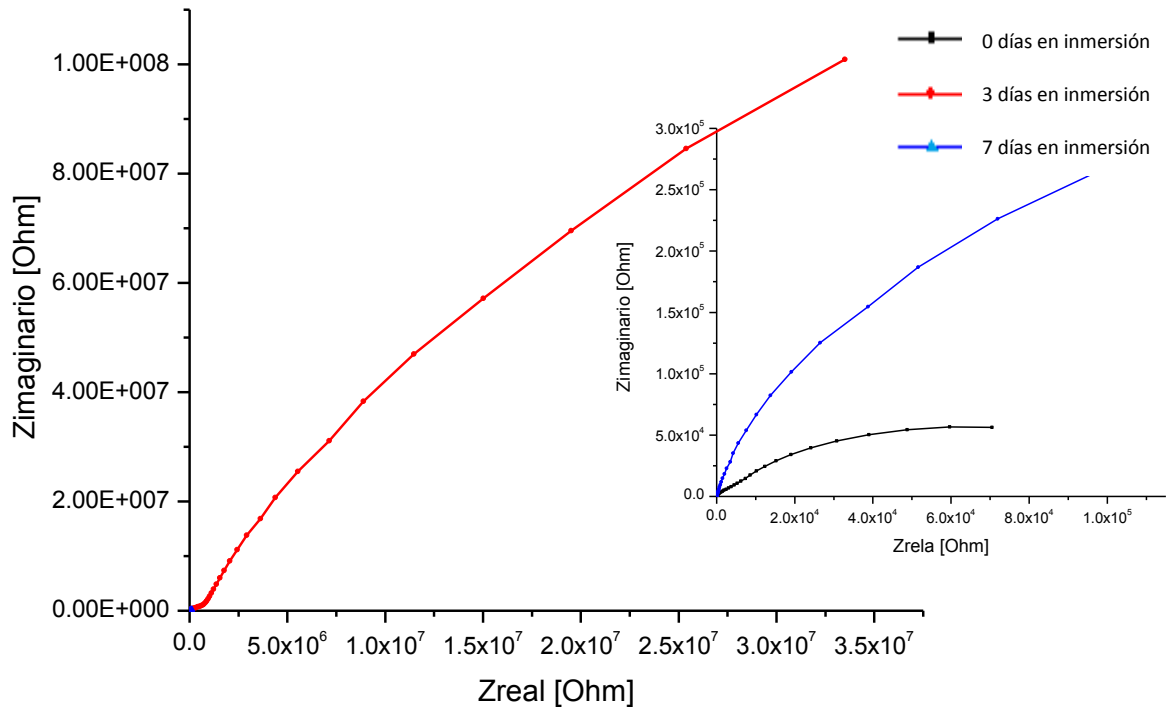


Lo observado sugiere que las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersas por 7 días, presentan una menor resistencia a la transferencia de carga, por lo que el proceso de transferencia de electrones entre el sustrato (Acero inoxidable) y el medio ocurre de manera más fácil, generando el proceso de corrosión del sustrato [50]. Adicionalmente se observa que la muestra inmersa por 3 días en este agente, presenta un cambio en el crecimiento del domo, manifestando una tendencia lineal en la zona de bajas frecuencias, lo cual autores sugieren, es debido a procesos de difusión de especies iónicas del electrolito, a través de la capa de productos o porosidades formadas en la superficie del sustrato [11, 49].

La disminución en los valores de la resistencia a la transferencia de carga es indicativo de que la capa de óxido de cromo formada en la superficie del acero inoxidable, conforme aumentan los tiempos de inmersión, tiene un proceso de disolución parcial, la cual libera iones cromato al electrolito. La disolución de la capa de óxido causa una disminución en la capacidad protectora y pasivante, al formarse picaduras o porosidades; lo cual facilita la movilidad de electrones y de corriente entre la muestra y el agente de limpieza [36].

En la figura 14 se observan los diagramas de Nyquist para las muestras inmersas en solución acuosa de hidróxido de sodio, en los cuales se presenta el mayor valor de resistencia a la polarización para la muestra inmersa por 3 días en este medio; lo cual estaría relacionado a la capa pasiva compuesta por  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , la cual disminuye la interacción entre el sustrato y el electrolito; en comparación con los otros tiempos de inmersión. El incremento de los valores de la resistencia a la transferencia de carga entre los 0 a 3 días de inmersión corresponde al comportamiento típico reportado por autores, de materiales con tendencias a formar capas pasivas en la superficie del sustrato [41, 49].

**Figura 14.** Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de hidróxido de sodio durante diferentes tiempos en inmersión.



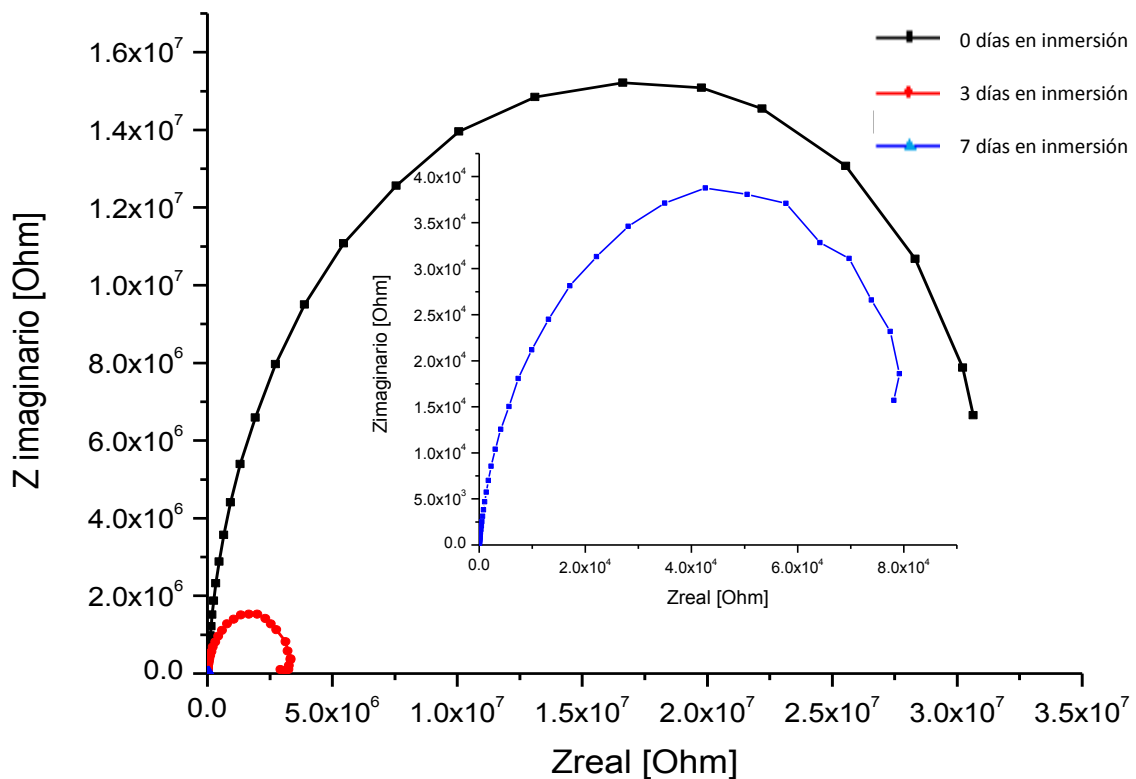
**Fuente:** Autor

A los 7 días en inmersión, se observa una disminución de la resistencia a la transferencia de carga, atribuido a la pérdida del carácter protector e impermeable de la capa pasiva de óxido de cromo, manifestada en los espectros de impedancia para la muestra inmersa por 3 días. La pérdida del carácter protector es consecuencia del proceso transpasivación que pudo experimentar el óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), liberando cromatos al medio, por tal motivo el material vuelve a reaccionar frente a las especies iónicas del electrolito, promoviendo el proceso de corrosión del sustrato.

Los espectros de impedancia para la muestra inmersa en solución de peróxido de hidrógeno y ácido acético en la figura 15, muestra una disminución en los valores de resistencia a la polarización conforme incrementan los tiempos en inmersión de la muestra de acero inoxidable. Este comportamiento, similar a lo observado en

las muestras inmersas en ácido acético, podría sugerir que en este medio ocurre también un proceso de disolución de la capa de óxido de cromo, lo cual generaría sitios activos que incrementan la interacción entre el sustrato y el electrolito, lo cual promovería el proceso de corrosión del sustrato.

**Figura 15.** Diagramas de Nyquist para la muestra inmersa en solución acuosa de peróxido de hidrógeno y ácido acético durante diferentes tiempos en inmersión.



**Fuente: Autor**

Al comparar los espectros de impedancia de los diferentes medios, para iguales tiempos en inmersión; se observa una disminución en los valores de la resistencia a la transferencia de carga en los agentes de limpieza con componentes ácidos; por lo que las soluciones acuosas de ácido acético y peroxiacética inducen en el acero inoxidable la disolución de la capa pasiva de óxido de hierro y cromo, causando la formación de zonas activas [36]. Adicionalmente la capacidad

oxidante que presenta el peróxido de hidrogeno, sugiere que la capa pasiva en la solución peroxiacética, puede experimentar un fenómeno de transpasivación, lo cual explicaría la caída en los valores de la resistencia a la polarización.

De igual manera, las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio experimentan una disminución en los valores de la resistencia a la polarización conforme incrementan los tiempos de inmersión; sin embargo la caída en los valores de este parámetro no son tan abruptos como los observados en los otros dos medios, por lo que el proceso de corrosión del sustrato en éste agente podría ser menor; debido a una menor tendencia a la transpasivación de la capa de óxido de cromo.

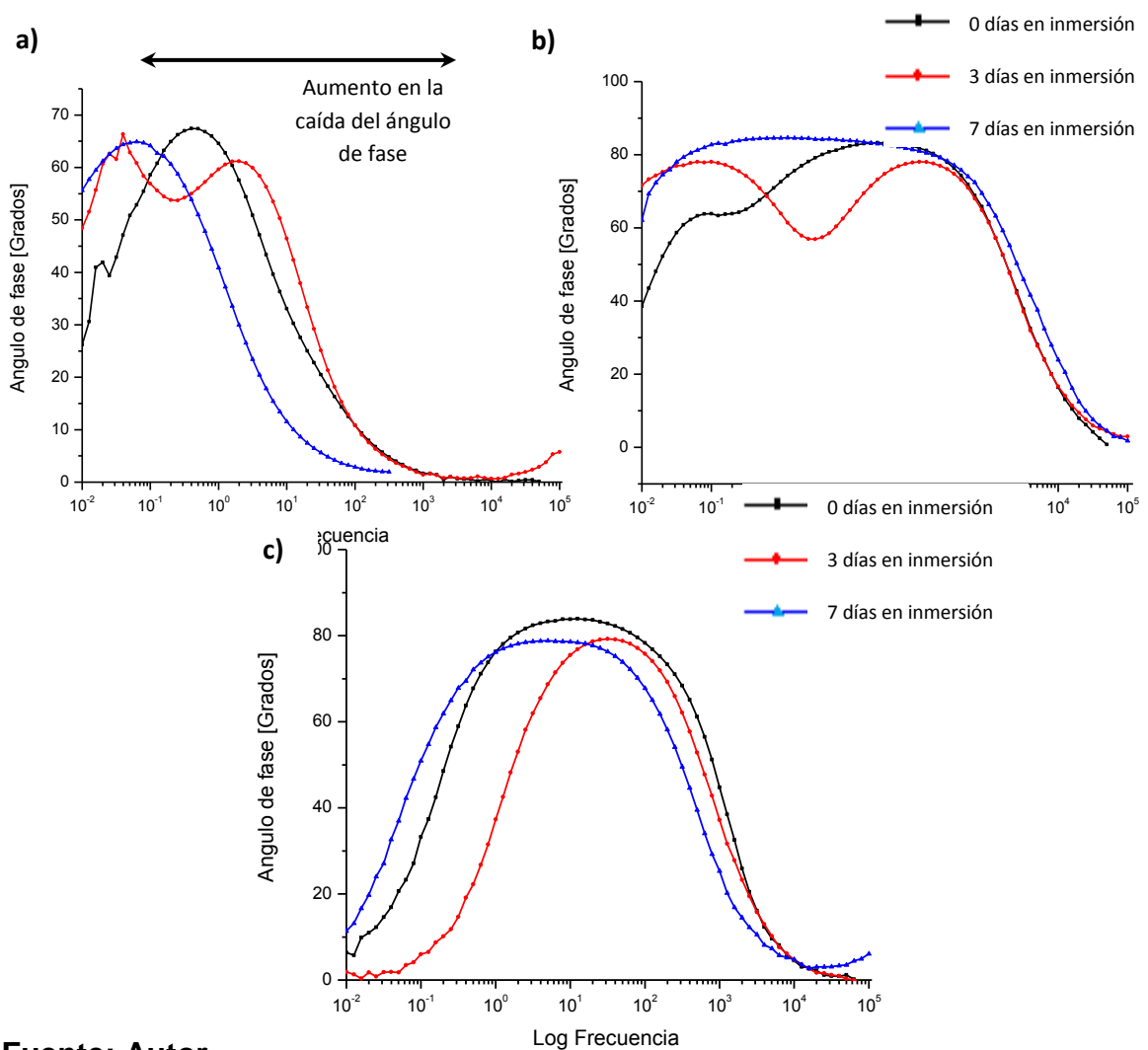
#### **4.1.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica-Diagramas de Bode**

A su vez se pudo apreciar en los diagramas de Bode para el ángulo de fase de las muestras inmersas en los diferentes agentes de limpieza, presentaron un cambio de comportamiento capacitivo a uno resistivo, al presentarse una caída en los valores del ángulo de fase en la zona de medias y altas frecuencias [40], como se observa en la figura 16; lo cual según lo reportado por autores, se puede atribuir a la presencia de porosidades y microporosidades en la interfase electrodo/electrolito y/o la adsorción de iones en la superficie [20, 24, 42].

En los diagramas se puede apreciar que todas presentan una caída en los valores del ángulo de fase, debido a las porosidades y microporosidades existentes en la capa de óxido o productos de corrosión; sin embargo dicha caída incrementa en un mayor rango de frecuencia en las muestras inmersas en solución de ácido acético y peroxiacética. De igual manera, el incremento en la caída de los ángulos de fase se incrementa con el tiempo en inmersión de la muestra, lo cual es concordante con el aumento en la densidad de picaduras en la superficie del sustrato, observadas en las micrografías *SEM*. Cabe mencionar que durante los 3 días en inmersión en solución de ácido acético, se observa una disminución en la

caída del ángulo de fase, el cual se asocia a la adsorción de iones en la superficie; posiblemente por formación de puentes de hidrogeno entre los radicales carboxilo y la capa de óxido, la cual se corrobora con la presencia de átomos de carbono como lo muestran los espectros EDS (Ver Anexo E-a) [3].

**Figura 16.** Diagramas de Bode para la muestra inmersa en diferentes agentes de limpieza y durante diferentes tiempos en inmersión a) solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética.



**Fuente: Autor.**

Debido a que la formación de picaduras y la presencia de porosidades causan una disminución en los valores del ángulo de fase, para las muestras inmersas en soluciones de ácido acético y peroxiacética; este fenómeno es un indicativo de la pérdida del comportamiento capacitivo que experimenta la interfase electrodo-electrolito. Lo anterior sugiere que ocurre una disminución en la capacidad protectora de la capa de óxido en la superficie, lo cual se vio reflejado en el incremento del daño por corrosión al sustrato.

Por el contrario las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio, presentan en los diagramas de bode en la figura 16-b, conforme aumentan los tiempos en inmersión, la desaparición de una de las constantes de tiempo del sistema. Este proceso es debido a que en el tercer día en inmersión, se da precipitación de productos de corrosión, específicamente  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  en la superficie del sustrato. Dicho precipitado en la superficie, generaría una resistencia y capacitancia al sistema, que se resume en la formación de una segunda constante de tiempo; sin embargo como se observó en las micrografías *SEM*, dicho producto se transpasa con el aumento del tiempo en inmersión; por lo que pierde sus características resistivas y capacitivas para el séptimo día, lo cual generó la desaparición de la segunda constante de tiempo.

#### 4.1.4 Simulación por circuitos equivalentes

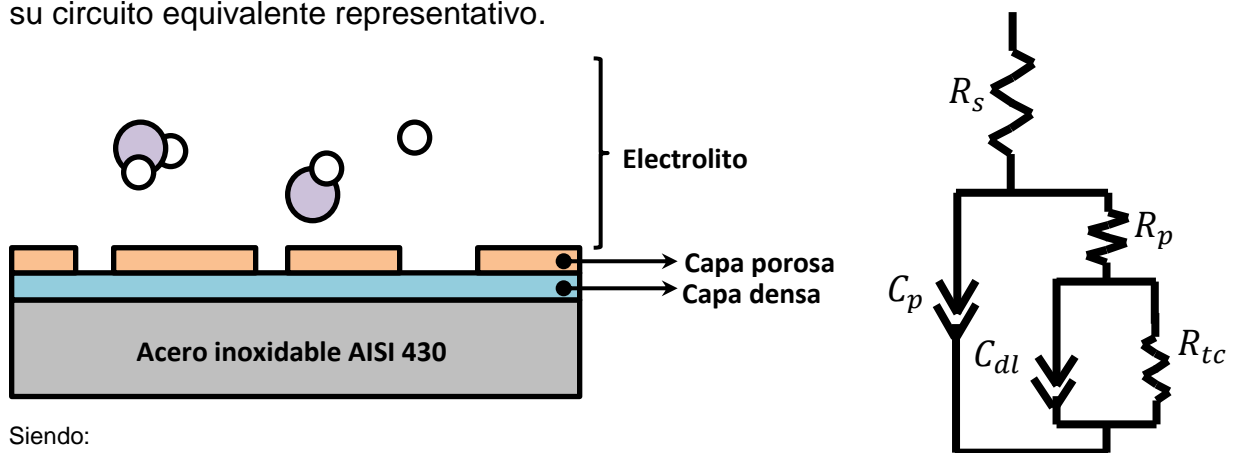
Con base a los espectros de impedancia electroquímica obtenidos del potencióstato/Galvanostato GAMRY G750, se procedió a establecer el comportamiento eléctrico de los sustratos de acero inoxidable frente a los diferentes agentes de limpieza propuestos; con base a un circuito eléctrico análogo, que permite relacionar los diferentes fenómenos en las interfases de las muestras con elementos resistivos y capacitivos.

Para las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio por 0, 3 y 7 días; así como las muestras inmersas en solución de ácido acético por 0 y 3 días, y las

muestras en solución peroxiacética por 3 días; se establece un circuito eléctrico análogo con elementos resistivos y capacitivos en serie-paralelo. En estos sistemas se propone que el electrodo (Muestra de acero inoxidable AISI 430) se encuentra compuesto por una película defectuosa o porosa, en contacto con el electrolito; y una capa interna densa y compacta por debajo de la película porosa (óxido de cromo), como se observa en la figura 17 y en los anexos F [19, 40, 50].

Dado a que las muestras propuestas para este tipo de circuito, presentaron la formación de una capa porosa y protectora de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , sobre la capa densa de óxido de hierro y cromo del acero inoxidable, como lo observado en las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio; o en su defecto la presencia de una capa defectuosa, correspondiente a la capa de óxido de cromo picada en las muestras inmersas en solución de ácido acético; permite establecer el anterior circuito eléctrico como modelo a los procesos electroquímicos en las interfases.

**Figura 17.** Representación de las interfases para un sistema compuesto por una subcapa interna densa y compacta, y una capa externa porosa o defectuosa; con su circuito equivalente representativo.



Siendo:

$R_s$ : Resistencia eléctrica del electrolito.

$R_p$ : Resistencia eléctrica asociado a las porosidades.

$R_{tc}$ : Resistencia a la transferencia de carga.

$C_p$ : Capacitancia eléctrica asociada a las porosidades.

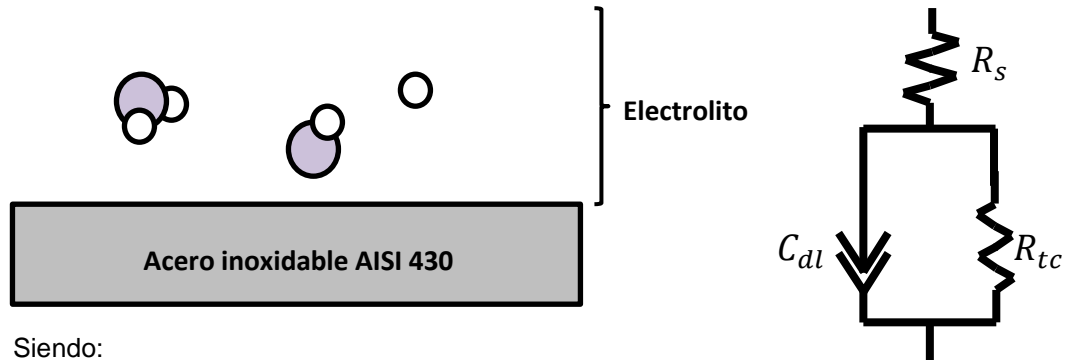
$C_{dl}$ : Capacitancia eléctrica relacionada a la doble capa electrica en la interfase electrodo/electrolito.

**Fuente: Autor**

En estos sistemas la presencia de porosidades en el producto de corrosión y la formación de picados en la superficie del sustrato actúan como barrera física a la movilidad de los iones, por lo que el comportamiento puede ser similar al de una resistencia eléctrica en la interfase electrodo-electrolito ( $R_2$ ); dado a que esta resistencia absorbe en gran medida la corriente de corrosión del sistema, estos sistemas presentaron los menores valores de resistencia a la transferencia de carga; por lo que las reacciones anódicas y catódicas poseen una ocurrencia con menor velocidad y por ende el desgaste corrosivo puede ser menor.

En cuanto a las muestras inmersas en solución de ácido acético por 7 días y en solución peroxiacética por 0 y 7 días; se propone un circuito básico tipo Randles, con elementos resistivos y capacitivos en serie-paralelo, concordante con el modelo de disolución del sustrato, como se observa en la figura 18. En dicho circuito el sustrato metálico se encuentra en contacto con el electrolito, intercambiando electrones y corriente, por lo que el sustrato no se encuentra protegido con una capa lo suficientemente resistiva e impermeable. Al plantearse esta clase de modelo, se sugiere que en estos sistemas hay una mayor interacción electrodo-electrolito, lo cual genera un mayor desgaste corrosivo (Ver Anexos G), dado a que no ocurre la formación o presencia de una capa de productos que genere una resistencia eléctrica o una separación de iones que disminuya el la corriente que circula en el sistema [19, 13, 31]. En estos sistema la menor cantidad de barreras físicas que impidan la movilidad de las especies electroactivas, generan una disminución en los valores de resistencia a la transferencia de carga con respecto a los sistemas anteriores, por lo que ocurre un incremento en la interacción iónica del sustrato frente al electrolito

**Figura 18.** Representación de las interfases para un sistema metal-electrolito; con su circuito equivalente tipo Randles.



Siendo:

$R_s$ : Resistencia eléctrica del electrolito.

$R_{tc}$ : Resistencia a la transferencia de carga.

$C_{dl}$ : Capacitancia eléctrica relacionada a la doble capa eléctrica en la interfase electrodo/electrolito.

**Fuente: Autor.**

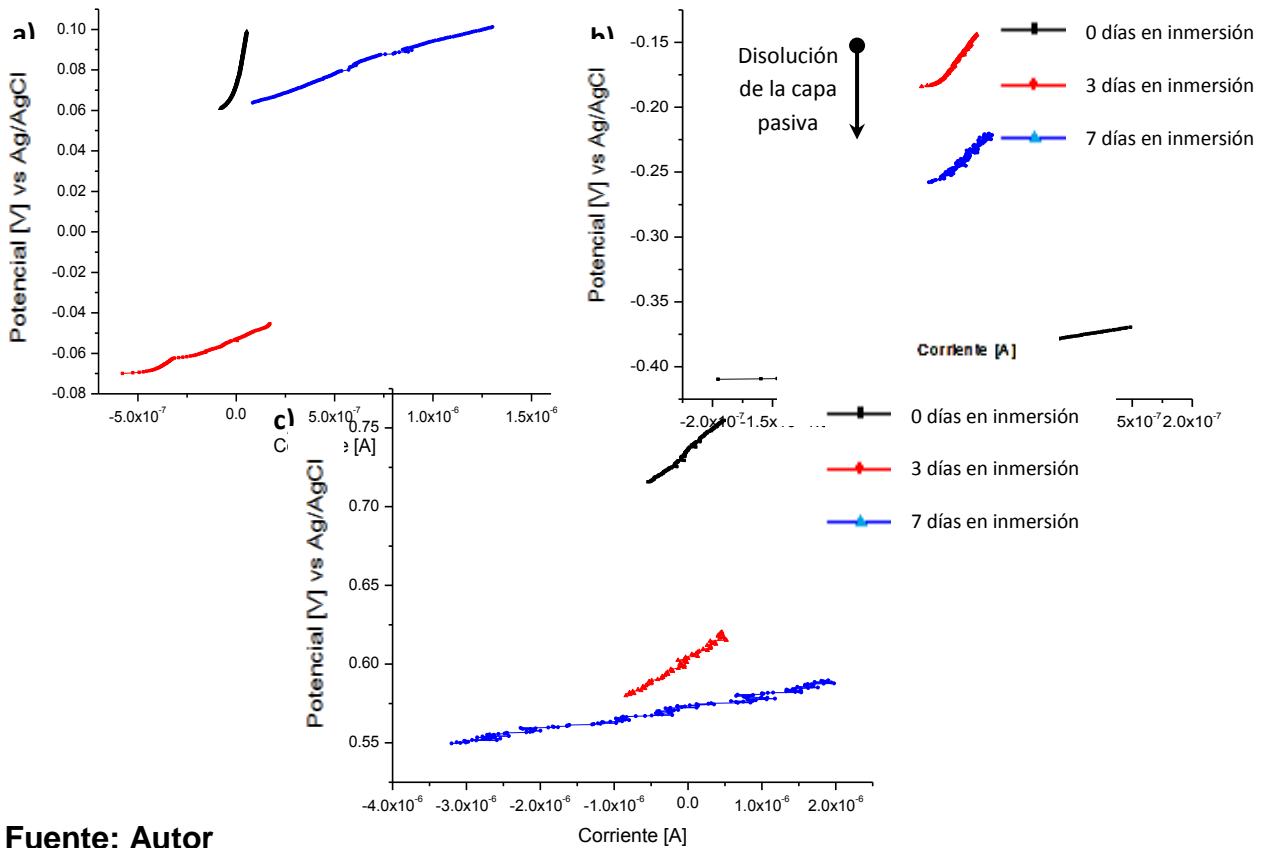
De acuerdo al comportamiento observado en los diagramas de bode del ángulo de fase para los diferentes agentes de limpieza en diferentes tiempos en inmersión, se realiza una sustitución de los elementos capacitivos en los circuitos eléctricos, por elementos de fase constante, debido a que valores máximos del ángulo de fase se encuentran por debajo de los  $-90^\circ$  [40, 43]. Lo anterior es atribuido a las porosidades presentes en las capas de óxido de hierro y cromo; así como las rugosidades y heterogeneidades físicas y químicas en las muestras.

#### 4.1.5. Resistencia a la polarización lineal (RPL)

Los diagramas potencial-corriente en la figura 19, muestra los resultados obtenidos mediante la prueba de resistencia a la polarización lineal, en los cuales se aprecia una disminución de los valores en la resistencia a la polarización para las muestras inmersas en solución de ácido acético y peroxiacética, lo cual concuerda con la caída en los valores de la resistencia a la transferencia de carga

observado en los espectros de impedancia y el ataque corrosivo por picado observado en las micrografías SEM.

**Figura 19.** Curvas de resistencia a la polarización lineal a) Solución ácido acético, b) Solución de hidróxido de sodio y c) Solución peroxiacético.



**Fuente: Autor**

Por el contrario las muestras en solución de hidróxido presentan el menor valor de resistencia a la polarización a los 0 días en inmersión; sin embargo para los 3 días en inmersión se observa el mayor valor de la resistencia a la polarización, causado por la formación de hidróxidos de hierro, lo cual aumenta la capacidad resistiva de las muestras. Al aumentar el tiempo en inmersión, se observa que ocurre una disminución en la pendiente, que se refleja en una caída de la resistencia a la polarización, debido a la disolución parcial que experimentó el óxido de cromo en las condiciones observadas [42], como se corrobora en las micrografías SEM.

A continuación se presentan los valores de resistencia a la polarización, en la tabla 5, obtenida a partir del cálculo de la pendiente de las curvas potencial-corriente de esta técnica electroquímica, como lo recomiendo la norma ASTM G-102 [8].

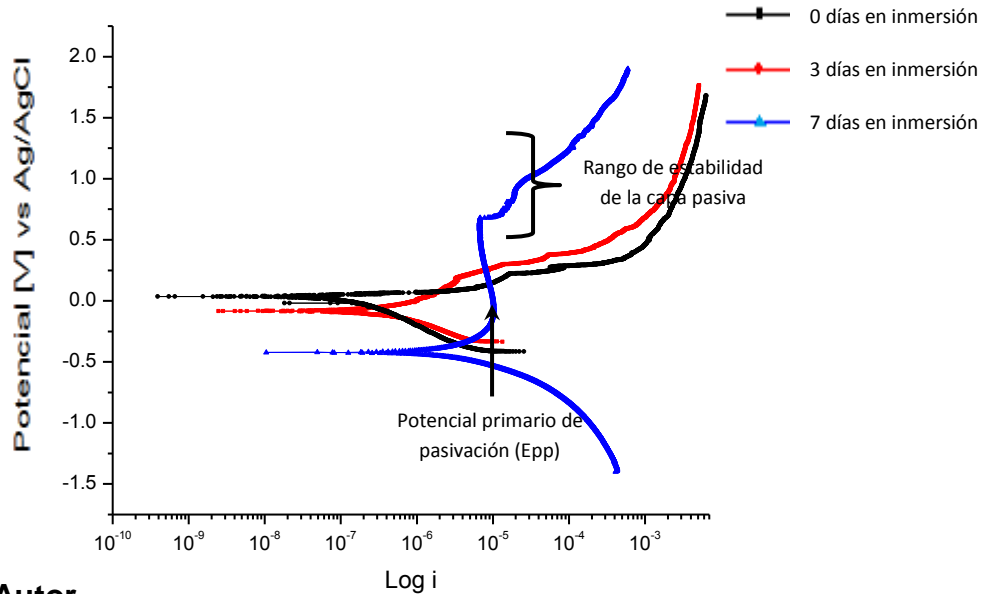
**Tabla 5.** Valores de resistencia a la polarización para las muestras de acero inoxidable AISI 430 en diferentes agentes de limpieza.

Agente de limpieza	Tiempo [días]	Rp [V/ $\mu$ A]
<b>Solución acuosa 3-5% ácido acético</b>	<b>0</b>	2.86E-01
	<b>3</b>	3.49E-02
	<b>7</b>	3.19E-02
<b>Solución acuosa 7% NaOH.</b>	<b>0</b>	1.41E-01
	<b>3</b>	1.72E+00
	<b>7</b>	5.57E-01
<b>Solución peroxiacética</b>	<b>0</b>	4.12E-02
	<b>3</b>	2.96E-02
	<b>7</b>	7.38E-03

**Fuente: Autor.**

**4.1.6 Polarización potenciodinámica.** La figura 20 presenta la curva potenciodinámica para las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersa en solución de ácido acético a diferentes tiempos en inmersión. En la gráfica se observa que la muestra de acero inoxidable que no fue inmersa y la muestra inmersa por 3 días, al ser polarizada anódicamente, presentan un comportamiento activo continuo, conforme incrementa el potencial, sugiriendo que la capa de óxido pasiva en la superficie del sustrato no tiene un efecto protector frente al medio, lo que conlleva a la disolución del sustrato. Conforme aumentan los valores de potencial se observa un cambio de pendiente en el rango de potencial de 0.43-051 V (Ag/AgCl), sugiriendo una segunda zona activación, producto de la transpasivación de la capa de óxido, promoviendo el desgaste corrosivo del material [17, 34].

**Figura 20.** Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución de ácido acético a diferentes tiempos de inmersión.



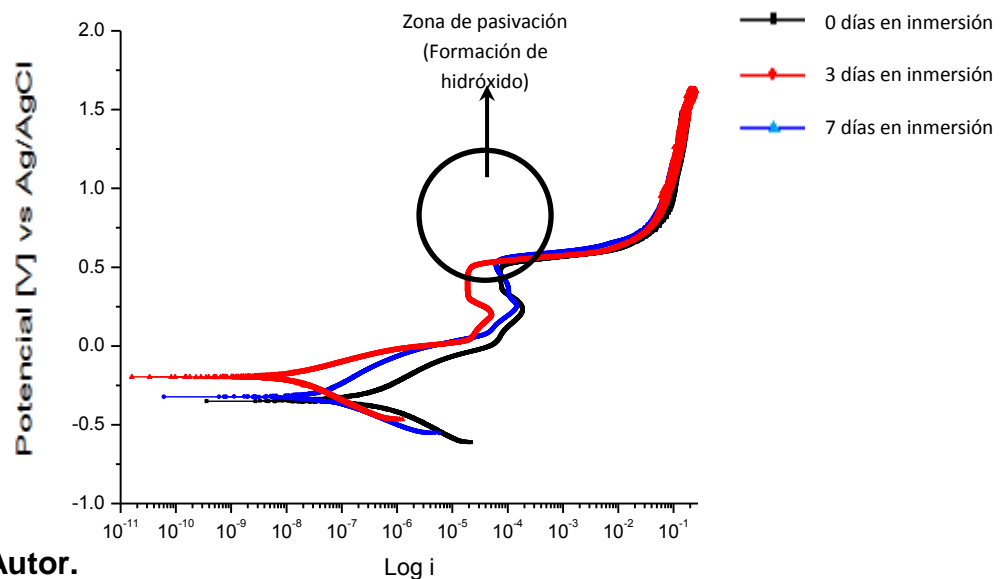
**Fuente: Autor**

Al observar la muestra inmersa por 7 días se aprecia en la curva de polarización una caída en los valores de potencial a zonas más activas sugiriendo una probabilidad de que el sistema se encuentre en corrosión. De igual manera se presenta una zona de activación, producto de la disolución del sustrato; sin embargo el rango de activación alcanza su valor máximo alrededor de los -0.25 V (Ag/AgCl), formando la nariz de pasivación. Este comportamiento activo-pasivo, es indicio de la formación y crecimiento de una capa de productos en la superficie del sustrato, posiblemente una capa de hidróxido poroso, el cual pese a servir de barrera entre el medio y el sustrato; no logra proteger a la muestra del ataque del medio debido a la porosidad que presenta [35]. Al precipitarse esta capa de productos en la superficie de la muestra, se genera una caída desde  $1 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{cm}^2$  hasta los  $6 \times 10^{-6} \mu\text{A}/\text{cm}^2$  aproximadamente, en un rango de potencial desde los -0.25V hasta los 0.0V, correspondientes al potencial de pasivación primario  $E_{pp}$  y potencial de pasivación  $E_p$ , respectivamente. Conforme se incrementa el potencial al sistema, inicia el crecimiento de la capa de productos

hasta los 0.74V; posterior a este último valor de potencial se observa nuevamente un incremento en los valores de la densidad de corriente, por lo que la capa pasiva sufre el fenómeno de transpasivación [29,46].

Las curvas de polarización correspondientes a las muestras inmersas en solución de NaOH para diferentes tiempos en inmersión se muestran en la figura 21, se observa que todos los sistemas presentan una zona de activación, correspondiente a la disolución del sustrato, específicamente el hierro en la aleación.

**Figura 21.** Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio a diferentes tiempos de inmersión.



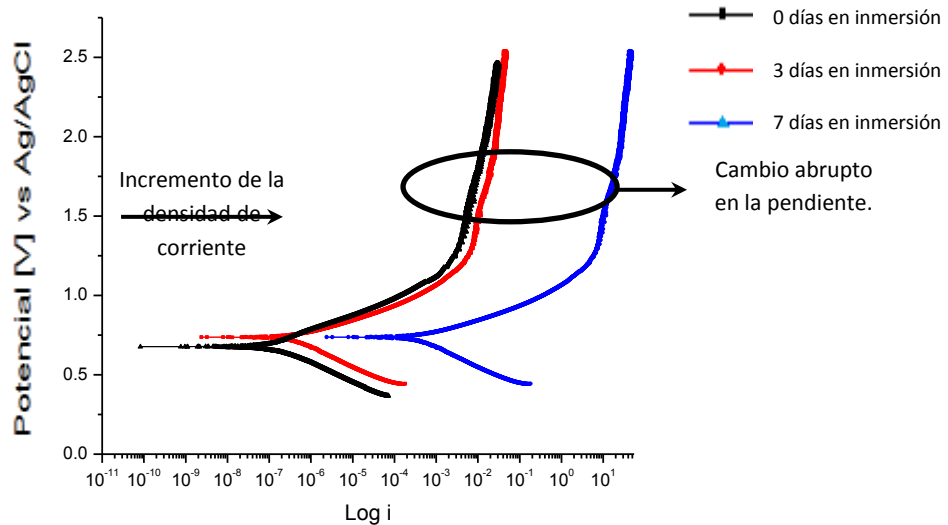
Fuente: Autor.

Conforme se incrementan los valores de potencial se observa que para los diferentes tiempos en inmersión, las muestras de acero inoxidable AISI 430 experimentan un comportamiento activo-pasivo, el cual se manifiesta con la caída en los valores de la densidad de corriente, al alcanzar un potencial de 0.125 V (Ag/AgCl) aproximadamente; debido a la posible formación de un hidróxido en la superficie del sustrato, que de la misma manera que las muestra inmersa por 7

días en ácido acético, reduce el intercambio electrónico entre la muestra y el electrolito. Aunque la caída del valor de la densidad de corriente aumenta con el incremento en los tiempos de inmersión; el potencial de pasivación primario, el potencial de pasivación y el de transpasivación se mantienen constante para los tiempos en inmersión, por lo que el producto en el proceso de pasivación es el mismo para los 3 medios [23]. Al llegar a potenciales cercanos a los 0.55V (Ag/AgCl) se observa que el hidróxido formado en la superficie sufre disolución y por ende se transpasiva, volviendo a activar al sustrato, el cual se observa con un incremento en los valores de la densidad de corriente.

La figura 22 muestra las curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución peroxiacética, las cuales no manifestaron un comportamiento activo-pasivo en el rango de potenciales estudiado. Por el contrario, las muestras inmersas en este agente, experimentan un proceso de disolución continuo, el cual incrementa el valor de la corriente conforme aumenta el potencial de polarización pese a la presencia de la capa de óxido de cromo, fenómeno similar al apreciado en las muestras en solución de ácido acético. Al incrementarse los valores de potencial, se observa una segunda de activación para los 3 días, la cual se manifiesta con un cambio en los valores de la pendiente de la zona de activación, posterior a los 1.256 V (Ag/AgCl); causada por la transpasivación que experimenta la capa de óxido de cromo, disminuyendo el carácter protector e incrementando los valores de densidad de corriente de corrosión.

**Figura 22.** Curvas de polarización potenciodinámica para las muestras inmersas en solución peroxiacética a diferentes tiempos de inmersión



**Fuente: Autor**

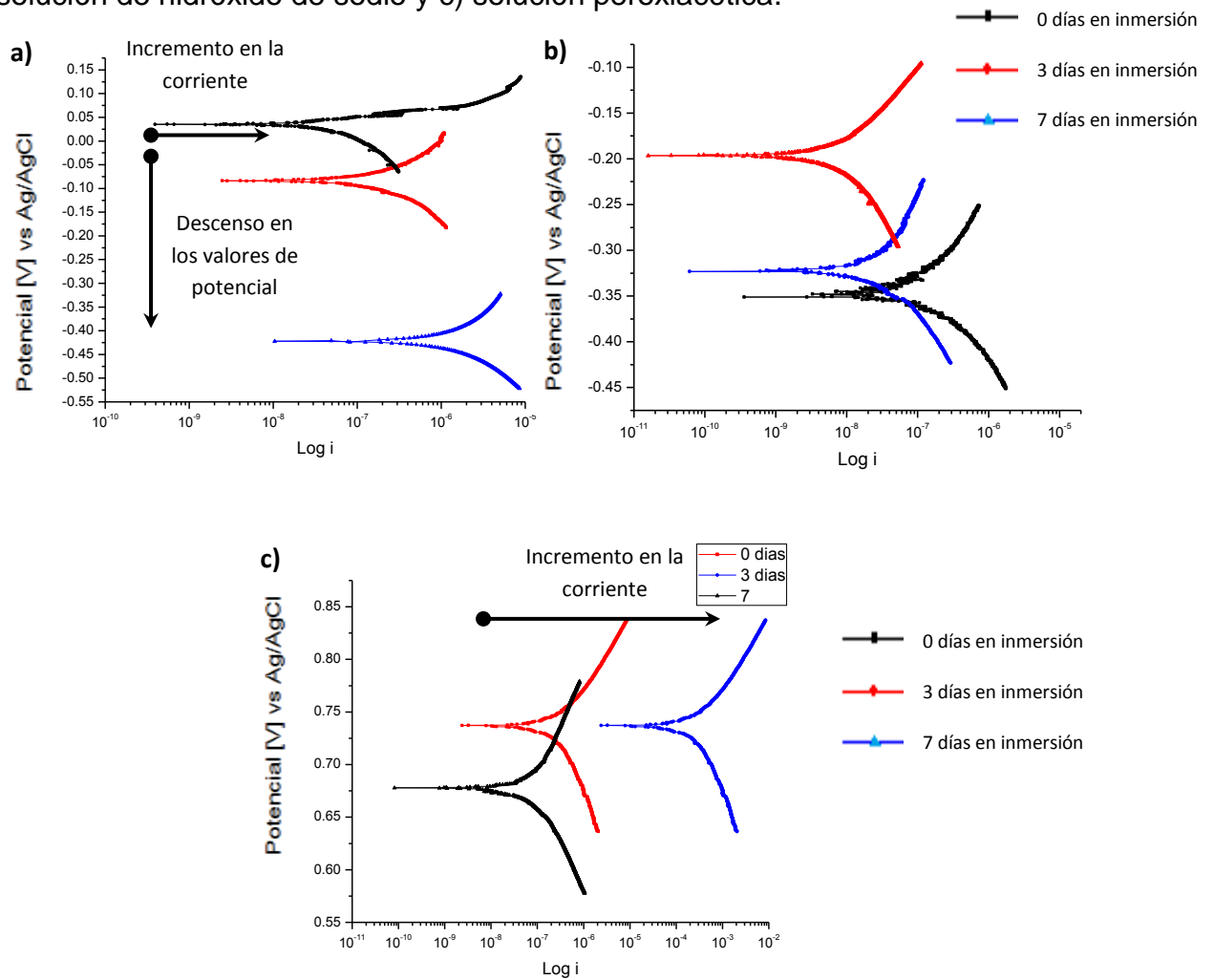
## 4.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

A partir de los datos experimentales obtenidos en las pruebas electroquímicas evaluadas en esta investigación se calculan las velocidades de corrosión empleando los métodos de resistencia a la polarización lineal (RPL) y Extrapolación de Tafel.

### 4.2.1 Extrapolación de Tafel

A partir de las medidas de potencial y densidad de corrientes de la prueba de polarización potenciodinámica, se selecciona un rango de  $\pm 50\text{mV}$  en los sentidos catódicos y anódicos desde el potencial de corrosión en dicha prueba. Con los datos se graficaron y ubicaron las zonas lineales, correspondientes a las pendientes de Tafel, como se observa en la figura 23; mediante las cuales se determinó las ecuaciones de las rectas con sus respectivas pendientes, potencial de corrosión y densidad de corriente de corrosión.

**Figura 23.** Curvas de extrapolación de Tafel a) Solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética.



**Fuente: Autor.**

Al analizar los primeros 50 mV de polarización catódica y anódica, se aprecia que las muestras inmersas en solución de ácido acético experimentan un incremento en la corriente de corrosión y una disminución en los valores del potencial de corrosión a zonas más activas, conforme aumentan los tiempos en inmersión [30].

La disminución en los valores de potencial hacia zonas activas, podría corroborar que la capa de óxido experimenta degradación por el medio, causando un ataque por picado, que generó un incremento en los valores de la densidad de corriente.

Por el contrario las muestras inmersas en solución de hidróxido de sodio, en la figura 23-b, experimentan la mayor respuesta en corriente para la muestra inmersa 0 días; lo cual sugiere que ocurre un ataque a la muestra, promoviendo la disolución de la capa de óxido existente. Al aumentar los días de exposición frente al medio se aprecia una caída significativa en la densidad de corriente para el tercer día en inmersión, debido a la formación de una capa de cromita hidratada ( $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), la cual disminuyó la permeabilidad eléctrica del sustrato frente al medio. La formación de la capa de cromita se corrobora, debido al aumento del potencial hacia valores más nobles, permitiendo la pasivación y protección del sustrato; lo cual se comprobó al observar la capa de productos globulares para este tiempo en las micrografías *SEM*. Sin embargo al incrementar los tiempos, se observa para la muestra en 7 días, un aumento en la corriente de corrosión, debida a la disolución parcial de la capa de productos formada el tercer día. Pese a que la capa sufre un proceso de transpasivación o picado, como se corroboró en las micrografías *SEM*, sigue manifestando una corriente de corrosión menor que las muestras con 0 días. Esto se debe a que estas técnicas no pueden detectar la densidad de corriente por picado en el acero inoxidable.

En cuanto a las muestras en solución peroxiacética experimentan un proceso de corrosión similar al observado en las muestras inmersas en ácido acético. El aumento de la densidad de corriente de corrosión conforme incrementa los tiempos en inmersión, concuerdan con el daño observado en la superficie del sustrato por microscopia electrónica de barrido, el cual fue mayor con respecto a los otros agentes de limpieza.

En la tabla 6 se consignan los valores y parámetros correspondientes a las pendientes de Tafel para cada una de las muestras, las cuales se determinaron como se observan en los anexos C, como lo establece la norma ASTM G102 [8]. En los resultados se puede apreciar que la mayor densidad de corrosión la presenta las muestras inmersa en solución de ácido acético y peroxiacética;

siendo la muestra inmersa por 7 días en solución peroxiacética la que manifiesta el mayor valor, lo cual concuerda con el daño severo en la superficie del material.

**Tabla 6.** Parámetros obtenidos mediante la técnica de extrapolación de Tafel para el acero inoxidable AISI 430.

Agente de limpieza	Tiempo [días]	Ba	Bc	B	icorr [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Ecorr [V]
<b>Solución acuosa 3-5% ácido acético</b>	<b>0</b>	32.809	46.495	8.36327382	3.25E-02	0.03370
	<b>3</b>	19.325	53.74	6.17987855	7.96E-02	-0.07480
	<b>7</b>	107.89	91.111	21.47676730	8.48E-01	-0.41940
<b>Solución acuosa 7% NaOH.</b>	<b>0</b>	31.628	35.17	7.24023734	4.22E-02	-0.33680
	<b>3</b>	28.317	31.368	7.24023734	4.68E-03	-0.21160
	<b>7</b>	40.532	34.811	8.14223792	1.08E-02	-0.32102
<b>Solución peroxiacética</b>	<b>0</b>	27.161	29.622	6.16047165	2.77E-02	0.67700
	<b>3</b>	30.733	29.861	6.58494034	2.93E+00	0.64750
	<b>7</b>	33.94	35.567	7.55096909	2.29E+02	0.90000

**Fuente: Autor.**

#### 4.2.2 Cálculo de la velocidad de corrosión

A partir de los valores de resistencia a la polarización obtenidos en la prueba de resistencia a la polarización lineal y la determinación del parámetro B, determinado usando las pendientes de Tafel, se determinó la densidad de corriente de corrosión con base en los establecido en la norma ASTM G-102 (Ver Anexo D) [8]. Los datos parámetros y datos obtenidos mediante dicha técnica se encuentran consignados en la tabla 7.

**Tabla 7.** Velocidades de corrosión para el acero inoxidable AISI 430 con base en la técnica de resistencia a la polarización lineal y extrapolación de Tafel.

Agente de limpieza	Tiempo [días]	Ba	Bc	B	Rp [V/ $\mu$ A]	icorr [ $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ]	Mpy
<b>Solución acuosa 3-5% ácido acético</b>	<b>0</b>	32.809	46.495	8.36327382	2.86E-01	2.92E+01	0.1335234
	<b>3</b>	19.325	53.74	6.17987855	3.49E-02	1.77E+02	0.8097147
	<b>7</b>	107.89	91.111	21.47676730	3.19E-02	6.74E+02	3.0782404
<b>Solución acuosa 7% NaOH.</b>	<b>0</b>	31.628	35.17	7.24023734	1.41E-01	5.12E+01	0.2340785
	<b>3</b>	28.317	31.368	7.24023734	1.72E+00	1.16E+01	0.0530862
	<b>7</b>	40.532	34.811	8.14223792	5.57E-01	1.46E+01	0.0668012
<b>Solución peroxiacética</b>	<b>0</b>	27.161	29.622	6.16047165	4.12E-02	1.49E+02	0.6826422
	<b>3</b>	30.733	29.861	6.58494034	2.96E-02	2.22E+02	1.0148868
	<b>7</b>	33.94	35.567	7.55096909	7.38E-03	1.02E+03	4.6765208

**Fuente: Autor**

Con base en los resultados se observa que los valores de velocidad de corrosión son mayores en las muestras inmersas en medios ácidos, debido a que presentan una disminución en la resistencia a la polarización, conforme incrementan los tiempos, concordante con lo observado en los diagramas de impedancia.

Los valores de velocidad de corrosión observados en las muestras en hidróxido de sodio, son producto de la disminución de la corriente de corrosión, dada la formación de una capa pasiva, en la superficie del sustrato. Dicho precipitado globular, disminuye la interacción entre el medio y el sustrato lo cual corrobora la disminución en la rata de corrosión, anteriormente mencionada.

## CONCLUSIONES.

La presencia de componentes ácidos en los agentes de limpieza; induce en la capa de óxido de cromo del acero inoxidable AISI 430 un proceso de corrosión por picado, el cual incrementa en densidad y tamaño del picado conforme incrementan los tiempos en inmersión.

Las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersas en solución 7% (w/v) de hidróxido de sodio experimentaron un proceso de pasivación, generando la precipitación de una capa pasiva que incrementó la resistividad eléctrica del sustrato hacia el electrolito, aumentando la resistencia a la polarización y disminuyendo la velocidad de corrosión del sustrato.

La determinación de la velocidad de corrosión empleando técnicas electroquímicas mostraron un mayor desgaste corrosivo en las muestras inmersas en solución peroxiacética, debido al mecanismo de corrosión por picado vistas en ellas, y a la elevada capacidad oxidante del medio, que se evidenció en la transpasivación de la capa de óxido.

Las bajas velocidades de corrosión, el aumento en la resistencia a la polarización, vista en los espectros de impedancia, y el proceso de pasivación presentado en las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersas en solución de hidróxido de sodio, sugiere que esta clase de agente de limpieza podría ser el más adecuado para conservar la integridad física y estética del acero inoxidable AISI 430, usado en la fabricación de utensilios de cocina.

El uso de circuitos análogos, a partir de los espectros de impedancia demuestran que los sistemas que presentaron el mayor daño por corrosión fueron los sistemas con componentes ácidos en su composición, al presentar una sola resistencia

eléctrica al paso de la corriente, correspondiente a la resistencia a la transferencia de carga.

El desgaste corrosivo que experimentaron las muestras de acero inoxidable AISI 430 inmersas en los diferentes agentes de limpieza, conforme incrementan los tiempos en inmersión; sugiere que no es recomendable dejar los utensilios un tiempo prolongado en remojo en esta clase de soluciones.

## **RECOMENDACIONES.**

Se recomienda evaluar el comportamiento del acero inoxidable AISI 430 frente a otros agentes de limpieza como soluciones alcohólicas, y sometidos a ciclos de limpieza y uso, empleando suspensiones alimenticias; con el fin de obtener resultados más reales.

Estudiar el efecto que puede generar la temperatura del agente de limpieza en la velocidad a la corrosión y el comportamiento de las muestras de acero inoxidable AISI 430.

Evaluar el efecto que presenta el grado de trabajado en frío del acero inoxidable AISI 430 empleado en la utilización de utensilios de cocina en el comportamiento a la corrosión frente a estos u otros agentes de limpieza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] AGUIRRE, Sarah. Clean stainless Steel. [Internet] Disponible en: <http://housekeeping.about.com/od/ideasbysurface/qt/steelclean.htm>. Acceso 15 de marzo de 2013.
- [2] AHMAD, Zaki. Principles of corrosion engineering and corrosion control. ISBN: 0750659246. Published by Elsevier Science & Technology Books. 2006.
- [3] ALMAS, Karl. LUND, Daryl, Cleaning and characterization of stainless steel exposed to milk. Department of Food Science. University of Wisconsin. USA. Surface Technology 23 (1984) 29 – 39.
- [4] AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-103.
- [5] AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM G3-89.
- [6] AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM G5-94 (Reapproved 2004).
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. ASTM G31-72 (Reapproved 2004).

**[8]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. G102-89 (Reapproved 2010)

**[9]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM G59-97 (Reapproved 2009).

**[10]** BRUMA, Mihaela. STOICA, Maricica. CARAC, Geta. ALEXE, Petru. AISI 430 stainless Steel behavior at different disinfectants. Biochemistry and Technologies department. Faculty of food science and engineering. University of Galati. Galati. Rumania. November 2010. Romanian Journal of Food Science-Official Journal of the Romanian Association of Food professional.

**[11]** BALLARE, Josefina. LÓPEZ, Damián. ROSERO, Nataly. DURÁN, Alicia. APARICIO, Mario. CERE, Silvia. Electrochemical evaluation of multilayer silica-metacrylate hybrid sol-gel coatings containing bioactive particles on surgical grade stainless steel. Journal Surface & Coatings Technology 203 (2008) 80-86.

**[12]** BALUSAMY, T. SANKARA, A. NARAYANAN, P. RAVICHANDRAN, C. MIN HO LEE. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel. Corrosion Science 74 (2013) 332-344.

**[13]** CARBONERAS IGLESIAS, M. C. PÉREZ-MACEDA, B.T. DEL VALLE, J. T. GARCÍA-ALONSO, M. C. ALOBERA, C. CLEMENTE, J.C. RUBIO, M.L. ESCUDERO, R.M. Comportamiento frente a la corrosión y biocompatibilidad *in vitro/in vivo* de la aleación AZ31 modificada superficialmente(•). Pp. 212-223.

**[14]** Clasificación de los aceros inoxidable según norma AISI. [Internet] Disponible en: [www.multimet.net/pdf/clasificacionaceros.pdf](http://www.multimet.net/pdf/clasificacionaceros.pdf). Acceso 2 de marzo de 2013.

**[15]** DIBBLE, Ken. Chemical cleaning metals. [Internet] Disponible en: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8H.pdf>. Acceso 25 de mayo de 2013.

**[16]** Directrices prácticas para la fabricación de aceros inoxidables Dúplex. Primera edición 2012, Publicado por International Molybdenum association. Londres. Reino Unido. 2012. [Internet] Disponible en: [www.imoa.info/\\_files/stainless\\_steel/Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_Spanish.pdf](http://www.imoa.info/_files/stainless_steel/Duplex_Stainless_Steel_Spanish.pdf) Acceso 3 de marzo de 2013.

**[17]** DONGA, H. QIB, P. LI, X.Y. LLEWELLYN, R. Y. Improving the erosion–corrosion resistance of AISI 316 austenitic stainless steel by low-temperature plasma surface alloying with N and C Materials Science and Engineering A 431 (2006) 137–145.

**[18]** EBRAHIMIFAR, Hadi. ZANDRAHIMI, Morteza. Oxidation and electrical behavior of AISI 430 coated with cobalt spinels for SOFC interconnect applications. Surface & Coatings Technology 206 (2011) 75–81.

**[19]** Electrochemical Impedance Spectroscopy. Byoung-Yong Chang<sup>1</sup> and Su-Moon Park. *Journal Annual Review of Analytical Chemistry. Vol 3*, 2010. Pp. 207-229. [Internet] Disponible en: [anchem.annualreviews.org](http://anchem.annualreviews.org). Revista de metalurgia, 47 (3) MAYO-JUNIO, 212-223, 2011 ISSN: 0034-8570 eISSN: 1988-4222 doi: 10.3989/revmetalm.1065 212

**[20]** ESTUPIÑAN DURÁN, Hugo Armando. Estudio electroquímico de la electroactivación de osteoblastos inmovilizados en compuestos poliméricos

semiconductores de PLA-PLG-Biocerámico. Trabajo de grado para optar al título de doctor en INGENIERÍA QUÍMICA. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Bucaramanga. 2011.

**[21]** F.A. Corpas 1, F.J. Iglesias 2, J.M. Ruiz2, S. Codina1, J.M. Ruiz2, v. García. Comportamiento frente a la corrosión de los aceros inoxidables AISI 430L P/M. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio. Vol. 43 N°2 193-195 (2004)

**[22]** Ferríticos. OBTESOL: Observatorio Tecnológico de la Soldadura. 9 de febrero de 2007. [Internet] Disponible en: [http://www.obtesol.es/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=147](http://www.obtesol.es/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=147). Acceso 4 de marzo de 2013.

**[23]** GARCIA, C. MARTIN, F. BLANCO, Y. APARICIO, M.L. Effect of ageing heat treatments on the microstructure and intergranular corrosion of powder metallurgy duplex stainless steels. Corrosion Science 52 (2010) 3725–3737.

**[24]** GARCÍA, Claudia. CERÉ, Silvia. DURÁN, Alicia. Recubrimientos bioactivos sobre aleaciones de titanio depositados por la técnica sol-gel. Medellín, Colombia. 2005. Revista Scielo, Nro 37, pp 129-140.

**[25]** GEBERT, A. GOSTIN, P. SCHULTZ, L. Effect of surface finishing of a Zr-based bulk metallic glass on its corrosion behavior. Journal Corrosion Science 52, 2010, Pp. 1711-1720.

**[26]** HASTUTY, Sri. NISHIKATA, Atsushi. TSURU, Tooru. Pitting corrosion of Type 430 stainless steel under chloride solution droplet. Corrosion Science 52 (2010) 2035–2043.

- [27]** HERTING, G. LINDSTRÖM, D. ODNEVALL WALLINDER, I. LEYGRAF, C. Multi-analytical investigation of stainless steel grade AISI 420 in simulated food contact. *Journal of Food Engineering* 93 (2009) 23–31.
- [28]** JONES, Denny. Principles and prevention of corrosion. Second edition. Edit, Prentice Hall. USA 1996.
- [29]** KWOKA, CT. LOB, K. H. CHENG, F.T. MANC, H.C. Effect of processing conditions on the corrosion performance of laser surface-melted AISI 440C martensitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology* 166 (2003) 221–230.
- [30]** MARTINEZ ORELLANA, L. PÉREZ, F. J. GÓMEZ, C. The effect of nitrogen ion implantation on the corrosion behaviour of stainless steels in chloride media. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1609 – 1615
- [31]** MENDOZA FLORES, Juan. DURÁN ROMERO, Rubén. GENESCA LLONGUERAS, Joan. Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. Instituto mexicano del petróleo. BUSCAR PAGINA WEB
- [32]** MORENO JAIMES, Ana María. SOTO GAMBOA, Diana Carolina. Evaluación electroquímica de una aleación Pb-Sn-Ca-Pt, inmersa en un electrolito de ácido sulfúrico a una concentración 0.5M. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de INGENIERO METALÚRGICO. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Bucaramanga. 2012.
- [33]** MUÑOZ FERNÁNDEZ, Héctor Luis. GONZÁLEZ MENDOZA, Luis Ángel. PENA BALLESTEROS, Darío Yesid. Evaluación de la velocidad de corrosión-erosión en un acero API 5L grado 65 en un sistema salmuera-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-aceite mineral, por medio de técnicas electroquímicas. *Revista Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá*. 2009. Vol. 13, N°1, Pp 27-44.

- [34] MUTHUKUMARA, V. SELLADURAI, V. NANDHAKUMAR, S. SENTHILKUMAR, M. Experimental investigation on corrosion and hardness of iron implanted AISI 316L stainless Steel. Journal Materials and Design 31, 2010, Pp. 2813-2817.
- [35] PAÉZ DALLOS, Joulyn Milena. RUEDA RODRÍGUEZ, Oscar Mauricio. Evaluación electroquímica de los recubrimientos Ni-Cr y Ni-Cr-WC aplicados por proyección térmica sobre un acero SAE-AISI 1015. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de INGENIERO METALÚRGICO. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Bucaramanga. 2012.
- [36] PARDO, A. MERINO, M.C. COY, A. E. VIEJO, F. ARRABAL, R. MATYKINA, E. Effect of Mo and Mn additions on the corrosion behavior of AISI 304 and 310 stainless steels in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Journal Corrosion Science, 50, 2008, Pp. 780-794.
- [37] PAREDES, Solange. Corrosión en medio ambiente salino de la aleación comercial de aluminio CV6-ALCASA 3003 con temple H14, H16 y H18. Trabajo de grado para optar al título de magíster en ciencia de materiales. Puerto Ordaz, Noviembre de 2005.
- [38] PERALTA FRAIRE, Leticia. Reconocimiento de moléculas orgánicas en los alimentos. Argentina. 2007. [Internet] Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos64/reconocimiento-moleculas-organicas-alimentos/reconocimiento-moleculas-organicas-alimentos2.shtml>. Acceso: 27 de marzo de 2013.

**[39]** PICASSO, A. ROMERO, R. CUNIBERTI, A. Identificación y caracterización de un acero y una fundición utilizados en la construcción de puentes ferroviarios a fines del siglo pasado. IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 893-899. [Internet] Disponible en: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/1103.PDF>. Acceso: 15 de septiembre de 2013.

**[40]** PIRATOBA MORALES, Ulises. MARINO CAMARGO, Álvaro. OLAYA FLÓREZ, John. Impedancia electroquímica interpretación de diagramas típicos con circuitos equivalentes. Medellín, Colombia. 2010. Dyna, Año 77, Nro. 164, pp. 6975.

**[41]** QUIROZ RAMÍREZ, Laura Marcela. Evaluación electroquímica de recubrimientos electroless Níquel/Fósforo sobre magnesio, en soluciones NaCl y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 3.5% p/v. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de MAGISTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Bucaramanga. 2013.

**[42]** RAGHUNANDAN, Ummethala. FLORIAN, Despang. GELINSKY, Michael. BIKRAMJIT, Basua. In vitro corrosión and mineralization of novel Ti-Si-C alloy. Dresden, Alemania. 2011. Electrochimica Acta 56 (2011) 3809–3820.

**[43]** RUIQUIANG, Hang. XIAOBO, Huang. LINHAI, Tian. ZHIYONG, He. BIN, Tang. Preparation, characterization, corrosion behavior and bioactivity of Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped TiO<sub>2</sub> nanotubes on NiTi alloy. Taiyuan, China. 2012. Electrochimica Acta 70 (2012) 382–393.

**[44]** SIERRA FAJARDO, Deisy Carolina. QUINTERO ASCANIO, Leidy Mayerly. Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado, en un

ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de INGENIERO METALÚRGICO. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Bucaramanga. 2013.

**[45]** Stainless Steel Care and Cleaning Instructions. [Internet] Disponible en: <http://www.medallionentry.com/PDF/Stainless%20Steel%20Care.pdf>. Acceso 7 de marzo de 2013.

**[46]** SUNG, Jo. KONG, H. J. YOO, D. ON, H. LEE, D. LEE, W. Phase changes of the AISI 430 ferritic stainless steels after high-temperature gas nitriding and tempering heat treatment. *Materials Science and Engineering A* 489 (2008) 38–43

**[47]** VÁSQUEZ GUTIÉRREZ, José L. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. 2007. [Internet] Disponible en: [riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10000/TesisMaster\\_LuisVazquez.pdf?1](http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10000/TesisMaster_LuisVazquez.pdf?1). Acceso 7 de marzo de 2013.

**[48]** VEGA-BECERRA, O. REYES\*, F. CHÁVEZ-ALCALÁ A. Generación de inclusiones no metálicas y su efecto sobre el bloqueo de boquillas de colada continua en aceros ultra bajo carbono estabilizados con titanio. *Revista de metalurgia*. Madrid. Vol. 3. N°2. Pp 447-451.

**[49]** VESGA PRADA, Yuly Katherine. CÁLCULO DE VARIABLES TERMODINÁMICAS DE LA DIFUSIÓN DE ESPECIES IÓNICAS DENTRO DE LOS POROS DE UN RECUBRIMIENTO BIOACTIVO MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de MAGISTER EN MATERIALES Y

PROCESOS. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Materiales y Procesos. 2010.

**[50]** ZELINKA, Samuel. ORTIZ CANDELARIA, Lorraine. STONE, Donald. RAMMER, Douglas. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a tool for measuring corrosion of polymer-coated fasteners used in treated wood. FOREST PRODUCTS JOURNAL VOL. 59, NO. 1.

**[51]** Propiedades del acero inoxidable. [Internet] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>. Acceso 27 de febrero de 2013.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM G59-97 (Reapproved 2009).

--- Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-103.

--- Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM G3-89.

--- Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM G5-94 (Reapproved 2004).

--- Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. ASTM G31-72 (Reapproved 2004).

--- Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. G102-89 (Reapproved 2010)

ALMAS, Karl. LUND, Daryl, Cleaning and characterization of stainless steel exposed to milk. Department of Food Science. University of Wisconsin. USA. Surface Technology 23 (1984) 29 – 39.

AHMAD, Zaki. Principles of corrosion engineering and corrosion control. ISBN: 0750659246. Published by Elsevier Science & Technology Books. 2006.

BRUMA, Mihaela. STOICA, Maricica. CARAC, Geta. ALEXE, Petru. AISI 430 stainless Steel behavior at different disinfectants. Biochemistry and Technologies department. Faculty of food science and engineering. University of Galati. Galati. Rumania. November 2010. Romanian Journal of Food Science-Official Journal of the Romanian Association of Food professional.

DONGA, H. QIB, P. LI, X.Y. LLEWELLYN, R. Y. Improving the erosion–corrosion resistance of AISI 316 austenitic stainless steel by low-temperature plasma surface alloying with N and C Materials Science and Engineering A 431 (2006) 137–145.

F.A. Corpas 1, F.J. Iglesias 2, J.M. Ruiz2, S. Codina1, J.M. Ruiz2, v. García. Comportamiento frente a la corrosión de los aceros inoxidables AISI 430L P/M. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio. Vol. 43 N°2 193-195 (2004)

HASTUTY, Sri. NISHIKATA, Atsushi. TSURU, Tooru. Pitting corrosion of Type 430 stainless steel under chloride solution droplet. Corrosion Science 52 (2010) 2035–2043.

HERTING, G. LINDSTRÖM, D. ODNEVALL WALLINDER, I. LEYGRAF, C. Multi-analytical investigation of stainless steel grade AISI 420 in simulated food contact. Journal of Food Engineering 93 (2009) 23–31.

MENDOZA FLORES, Juan. DURÁN ROMERO, Rubén. GENESCA LLONGUERAS, Joan. Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. Instituto mexicano del petróleo. BUSCAR PAGINA WEB

MUÑOZ FERNÁNDEZ, Héctor Luis. GONZÁLEZ MENDOZA, Luis Ángel. PENA BALLESTEROS, Darío Yesid. Evaluación de la velocidad de corrosión-erosión en un acero API 5L grado 65 en un sistema salmuera-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-aceite mineral, por

medio de técnicas electroquímicas. Revista Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. 2009. Vol. 13, N°1, Pp 27-44.

PIRATOBA MORALES, Ulises. MARINO CAMARGO, Álvaro. OLAYA FLÓREZ, John. Impedancia electroquímica interpretación de diagramas típicos con circuitos equivalentes. Medellín, Colombia. 2010. Dyna, Año 77, Nro. 164, pp. 6975.

VÁSQUEZ GUTIÉRREZ, José L. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. 2007. [Internet] Disponible en: [riunet.upv.es /bitstream/handle/riunet/10000/1/TesisMaster\\_LuisVazquez.pdf?1](http://riunet.upv.es/bitstream/handle/riunet/10000/1/TesisMaster_LuisVazquez.pdf?1). Acceso 7 de marzo de 2013.

## ANEXOS

### Anexo A. Listado de reactivos empleados en la investigación.

REACTIVO	FÓRMULA QUÍMICA	CARACTERÍSTICAS
Ácido acético glacial	CH <sub>3</sub> COOH	Mallinckrodt, 99.8% Pureza.
Ácido clorhídrico	HCl	Merck, 37% Pureza.
Agua destilada y desionizada	H <sub>2</sub> O	Agua tipo I.
Acero inoxidable AISI 430	AISI 430	Grupo de investigación en corrosión
Cloruro férrico	FeCl <sub>3</sub>	Carlo Erba, 92% Pureza.
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Merck, 99% Pureza.
Hidróxido de sodio	NaOH	Merck, 99% Pureza.
Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Mallinckrodt, 30% Pureza.

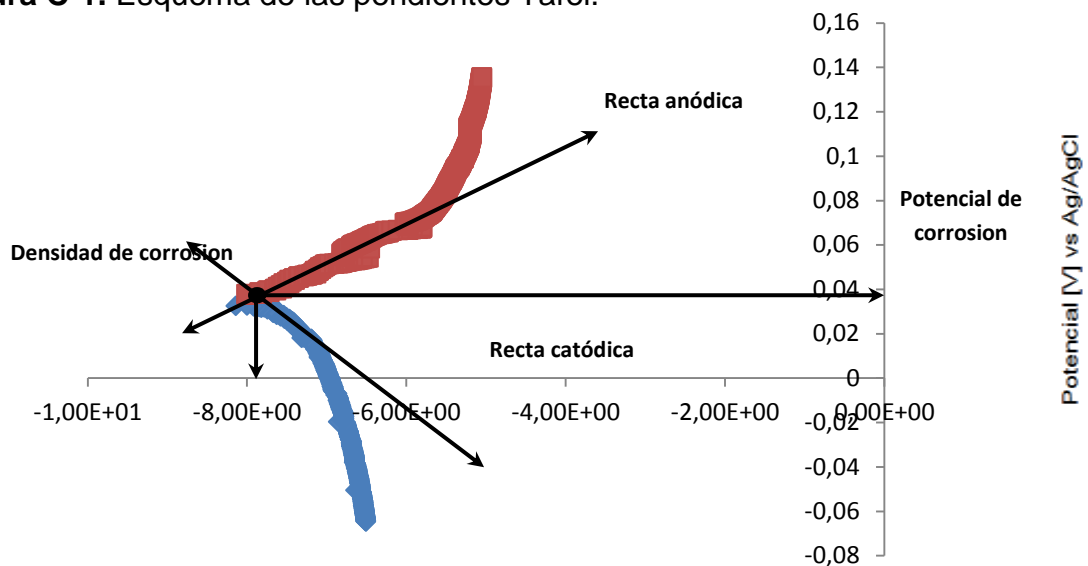
**Anexo B.** Listado de equipos empleados en la investigación.

<b>EQUIPO</b>	<b>APLICACIÓN</b>
Pulidora Metkan-Grinder/Polisher	Preparación superficial del acero inoxidable AISI 430.
Microscopio óptico Olympus GX71	Caracterización microestructural del acero inoxidable AISI 430.
Plancha de agitación -SCHOTT	Preparación de los agentes de limpieza.
Microscopio electrónico de barrido FEI. Quanta FEG 650.	Caracterización morfológica y química de las muestras de acero inoxidable AISI 430 posterior a su inmersión a diferentes tiempos en cada agente de limpieza
Balanza - Santorius TE2145.	Pesado de cantidades de NaOH y FeCl <sub>3</sub> requeridos para la preparación del agente de limpieza y el ataque químico para caracterización microestructural.
Potenciostato/Galvanostato GAMRY INSTRUMENTS Serie G750	Pruebas de caracterización electroquímica de las muestras de acero inoxidable AISI 430 en los diferentes agentes de limpieza.

### Anexo C. Determinación de las pendientes de Tafel.

El análisis se realizó tomando los valores de potencial-corriente de la curva de polarización potenciodinámica en los primeros 50mV de polarización anódica y catódica. A partir de dichos valores se realizaron las curvas potencial-corriente, como se muestra a continuación para la muestra inmersa en solución de ácido acético por 0 días.

**Figura C-1.** Esquema de las pendientes Tafel.



**Fuente: Autor**

Una vez graficados los valores de potencial y densidad de corriente, se procede a determinar mediante la técnica de mínimo cuadrados el valor de la pendiente, el corte y la ecuación de la recta. Este procedimiento se realiza tomando 10 valores en el sentido catódico y 10 en el anódico desde el potencial de corrosión, los cuales se presentan a continuación:

**Tabla C-1.** Datos empleados para la determinación de las pendientes de Tafel.

Catódica			Anódica		
Densidad de corriente [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Log i	Potencial [mV] vs Ag/AgCl	Densidad de corriente [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Log i	Potencial [mV] vs Ag/AgCl
9.25E-08	-6.93E+00	-93.54	8.18E-09	-7.98E+00	-82.99
8.40E-08	-6.97E+00	-93.18	1.03E-08	-7.88E+00	-82.68
7.68E-08	-7.01E+00	-92.9	1.14E-08	-7.83E+00	-82.4
7.39E-08	-7.02E+00	-92.55	1.07E-08	-7.86E+00	-82.04
7.22E-08	-7.03E+00	-92.24	1.29E-08	-7.78E+00	-81.75
7.21E-08	-7.03E+00	-91.94	1.75E-08	-7.65E+00	-81.39
7.36E-08	-7.03E+00	-91.58	2.00E-08	-7.59E+00	-81.12
8.51E-08	-6.96E+00	-91.31	2.31E-08	-7.53E+00	-80.82
8.14E-08	-6.98E+00	-90.94	2.93E-08	-7.43E+00	-80.49
7.95E-08	-6.99E+00	-90.64	3.22E-08	-7.38E+00	-80.19

**Fuente: Autor**

Una vez seleccionados, los valores de corriente y voltaje se determina el Log i y se linealizan por mínimos cuadrados, obteniendo las ecuaciones:

$$E_c = -46.495 \log i - 413.56$$

$$E_a = 32.809 \log i + 159.01$$

Las cuales corresponden a las rectas de polarización en los primeros 100mV, según lo define la ecuación:

$$E_c = \beta_c \log i - \beta_c \log i_{corr}$$

$$E_a = \beta_a \log i - \beta_a \log i_{corr}$$

De esta manera se obtiene que la pendiente anódica y catódica sea 32.809 y -46.495, respectivamente. A partir de las pendientes de Tafel se determinó la constante de proporcionalidad B, empleada para la determinación de la corriente de corrosión para la prueba de resistencia a la polarización lineal, como se muestra a continuación:

$$B = \frac{\beta_c \beta_a}{2.3 (\beta_c + \beta_a)}$$

$$B = \frac{(32.809 \times 46.495)}{2.3 (32.809 + 46.495)} = \frac{1525.4544}{182.3992} = 8.3632$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} = \frac{8.3632}{2.86 \times 10^{-1}} = 2.92 \times 10^1 \mu A/cm^2$$

**Anexo D.** Determinación de la velocidad de corrosión.

La determinación de la velocidad de corrosión se basa en las leyes farádicas, la cual relaciona la corriente de corrosión con el daño al sustrato. Dicha relación se basa en la siguiente ecuación:

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

CR: Velocidad de corrosión en mm/year

K: Constante de proporcionalidad ( $3.27 \times 10^{-3}$  mm·gr/ $\mu$ A·cm·year, 0.1288 para Mpy)

$E_w$ : Peso equivalente

$\rho$ : Densidad del material en gr/cm<sup>3</sup>

$i_{corr}$ : Densidad de corriente de corrosión en  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>

El peso equivalente correspondiente al material estudiado, acero inoxidable AISI 430, se determinó empleando el análisis composicional obtenido por la técnica de espectroscopia de chispa o arco, como según lo establece la norma ASTM G102.

$$E_w = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}}$$

**Tabla D-1.** Datos empleados en la determinación del peso equivalente.

Elemento químico	Fracción	Electrones transferidos	Peso atómico	$\frac{n_i f_i}{W_i}$
Hierro (Fe)	0.8122	2	55.8450	0.02908765
Cromo (Cr)	0.1670	3	51.9961	0.00963534
Silicio (Si)	0.00338	2	28.0855	0.00024069
Manganeso (Mn)	0.00512	2	54.9380	0.00018639
Molibdeno (Mo)	0.00029	2	95.9400	6.0454E-06
Níquel (Ni)	0.00256	2	58.6934	8.7233E-05
Boro (B)	0.00001	3	10.8110	2.7750E-06
Bismuto (Bi)	0.00067	3	208.9803	9.6181E-06
Estaño (Sn)	0.000053	2	118.7010	8.9300E-07
Cobalto (Co)	0.00032	2	58.9332	1.0860E-05
Magnesio (Mg)	0.00018	2	24.3050	1.4812E-05
Niobio (Nb)	0.00013	3	92.9063	4.1978E-06

<b>Plomo (Pb)</b>	0.00012	2	207.200	1.1583E-06
<b>Tantalio (Ta)</b>	0.00335	5	180.9479	9.2568E-05
<b>Titanio (Ti)</b>	0.000023	3	47.867	1.4415E-06
<b>Vanadio (V)</b>	0.00048	2	50.9415	1.8845E-05
<b>Wolframio (W)</b>	0.0001	2	183.84	1.0879E-06
<b>Zinc (Zn)</b>	0.0002	2	65.409	6.1154E-06
<b>Zirconio (Zr)</b>	0.000074	4	91.224	3.2448E-06
<b>Selenio (Se)</b>	0.00025	2	78.96	6.3323E-06
<b>Cobre (Cu)</b>	0.00037	2	63.546	1.1645E-05
<b>Aluminio (Al)</b>	0.00005	3	26.981538	5.5594E-06
$\sum \frac{n_i f_i}{W_i}$				0.03943451

**Fuente: Autor**

De acuerdo a lo establecido por la norma ASTM G-102, se establece el valor del peso equivalente, como se muestra a continuación:

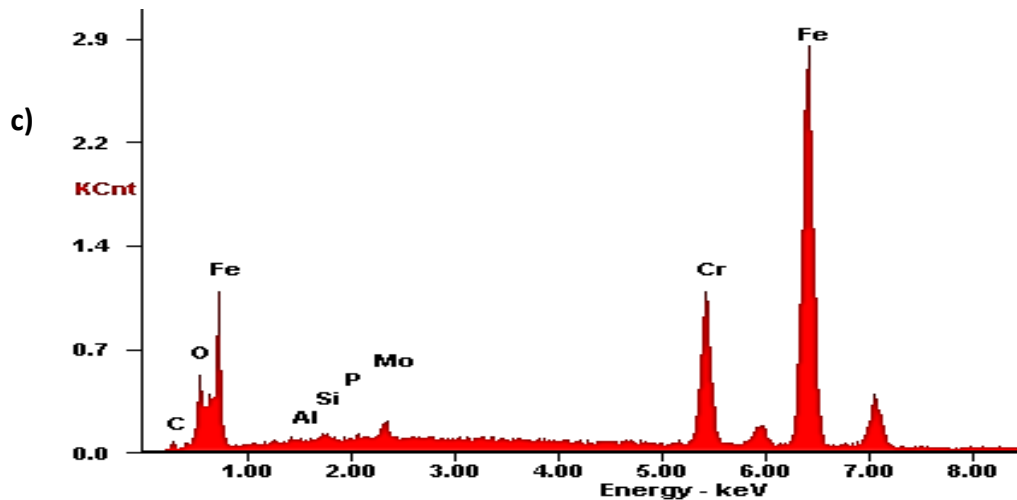
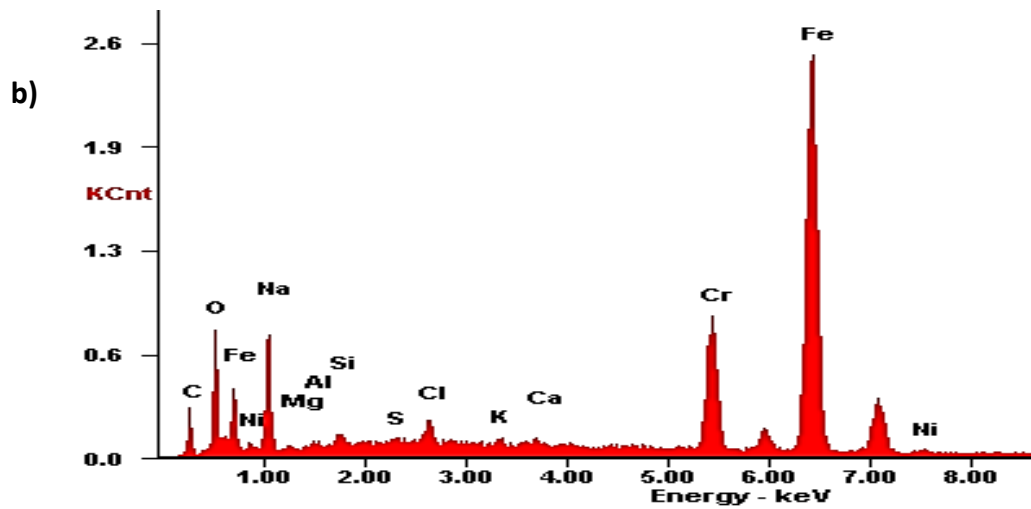
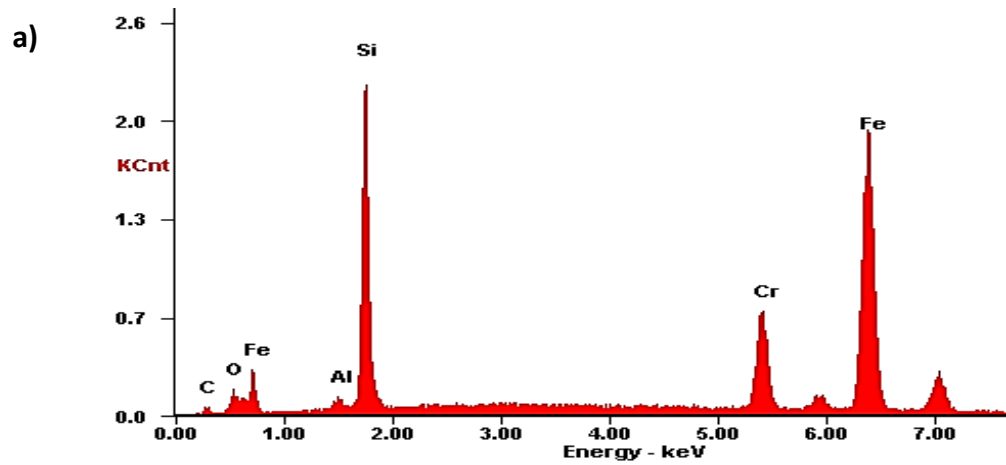
$$E_w = \frac{1}{0.03943451} = 25.3585005$$

A continuación se determina la velocidad de corrosión para la muestra inmersa en solución de ácido acético por 3 días como cálculo tipo:

$$CR = K \times \frac{E_w * i_{corr}}{\rho} = (3.27 \times 10^{-3}) \frac{25.3585005 * 2.92 \times 10^1}{7.7} = 0.3147 \text{ mm/year}$$

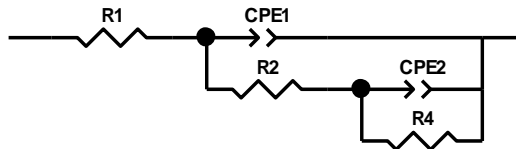
$$CR = K \times \frac{E_w * i_{corr}}{\rho} = (0.1288) \frac{25.3585005 * 1.77 \times 10^2}{7.7} = 0,1335 \text{ mpy}$$

**Anexo E.** Espectros composicionales EDS aplicados a las muestras de acero inoxidable inmersas en a) solución de ácido acético, b) solución de hidróxido de sodio y c) solución peroxiacética.



**Anexo F.** Simulación del circuito equivalente correspondiente al sistema de un sustrato metálico compuesto por una capa densa y una capa porosa en su superficie.

**0 días solución de ácido acético**



<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
R1	Free(+)	3.0678E05	402.97	0.13135
CPE1-T	Free(+)	2.9883E-07	6.1833E-09	2.0692
CPE1-P	Free(+)	0.80236	0.0035354	0.44063
R2	Free(+)	9.3935E05	65843	7.0094
CPE2-T	Free(+)	1.2008E-07	6.6498E-09	5.5378
CPE2-P	Free(+)	0.98575	0.015745	1.5973
R4	Free(+)	4.5098E07	7.658E05	1.6981
Chi-Squared:		0.00064601		
Weighted Sum of Squares:		0.078167		

**3 días solución de ácido acético**

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
R1	Fixed(X)	2.2331E05	N/A	N/A
CPE1-T	Fixed(X)	4.1023E-07	N/A	N/A
CPE1-P	Fixed(X)	0.86699	N/A	N/A
R2	Fixed(X)	8.4411E06	N/A	N/A
CPE2-T	Fixed(X)	6.7964E-07	N/A	N/A
CPE2-P	Fixed(X)	0.84059	N/A	N/A
R3	Free(+)	1.1136E16	8.8563E13	0.79529
Chi-Squared:		0.0038121		
Weighted Sum of Squares:		0.47651		

0 días solución de hidróxido de sodio

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rsol	Free(+)	2.597	0.0097628	0.37593
CPE1-T	Free(+)	4.3369E-05	2.5308E-07	0.58355
CPE1-P	Free(+)	0.93631	0.0009061	0.096774
R1	Free(+)	16013	440.85	2.7531
CPE2-T	Free(+)	5.0922E-05	9.1844E-07	1.8036
CPE2-P	Free(+)	0.85919	0.010168	1.1834
R2	Free(+)	1.2755E05	2768.7	2.1707

Chi-Squared: 0.00066899  
 Weighted Sum of Squares: 0.0863

3 días solución de hidróxido de sodio

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rsol	Free(+)	3467	6.9031	0.19911
CPE1-T	Free(+)	3.6184E-08	2.0809E-10	0.57509
CPE1-P	Free(+)	0.92362	0.0007852	0.085013
R1	Free(+)	1.5395E06	13192	0.8569
CPE2-T	Free(+)	7.4151E-08	2.6445E-10	0.35664
CPE2-P	Free(+)	0.90488	0.0015786	0.17445
R2	Free(+)	5.8341E08	1.6631E07	2.8507

Chi-Squared: 0.00021463  
 Weighted Sum of Squares: 0.028975

7 días solución de hidróxido de sodio

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rsol	Free(+)	2.303	0.010805	0.46917
CPE1-T	Free(+)	3.575E-05	5.555E-06	15.538
CPE1-P	Free(+)	0.94331	0.014101	1.4948
R1	Free(+)	33.88	15.339	45.274
CPE2-T	Free(+)	8.1394E-06	5.5475E-06	68.156
CPE2-P	Free(+)	0.9171	0.048799	5.321
R2	Free(+)	1.138E06	41192	3.6197

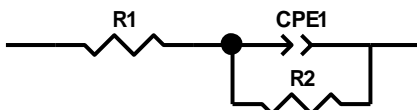
Chi-Squared: 0.00089577  
 Weighted Sum of Squares: 0.11914

### 3 días solución peroxiacética

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
R1	Free(+)	7774	54.994	0.70741
CPE1-T	Free(+)	2.3029E-07	4.5097E-08	19.583
CPE1-P	Free(+)	0.96794	0.024472	2.5283
R2	Free(+)	54597	40812	74.751
CPE2-T	Free(+)	7.043E-08	4.7467E-08	67.396
CPE2-P	Free(+)	0.83457	0.021643	2.5933
R3	Free(+)	3.3365E06	69335	2.0781
Chi-Squared:		0.00089661		
Weighted Sum of Squares:		0.076212		

**Anexo G.** Simulación del circuito equivalente tipo Randles correspondiente al sistema de un sustrato metálico en contacto directo con un electrolito.

7 días solución ácido acético



<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
R1	Free(+)	2187	7.6658	0.35052
CPE1-T	Free(+)	7.7991E-05	2.5391E-07	0.32556
CPE1-P	Free(+)	0.79791	0.0019111	0.23951
R2	Free(+)	3.9216E05	14495	3.6962

Chi-Squared: 0.00078338  
 Weighted Sum of Squares: 0.064237

0 días solución peroxiacética

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
Rsol	Free(+)	7621	54.014	0.70875
CPE1-T	Free(+)	1.1358E-07	4.2112E-10	0.37077
CPE1-P	Free(+)	0.95068	0.0008854	0.093133
R1	Free(+)	3.3188E07	2.1453E05	0.64641

Chi-Squared: 0.00099924  
 Weighted Sum of Squares: 0.095927

7 días solución peroxiacética

<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
R1	Free(+)	28,47	0,10069	0,35367
CPE1-T	Free(+)	2,6371E-05	1,1455E-07	0,43438
CPE1-P	Free(+)	0,89861	0,0009354	0,10409
R2	Free(+)	88414	616,78	0,6976

Chi-Squared: 0,0014662  
 Weighted Sum of Squares: 0,19647