

Universidad de Ingeniería y Tecnología

TESIS DE PREGRADO

Estudio comparativo sobre la resistencia a la corrosión en aceros inoxidable utilizados en intercambiadores de calor

Oliva Conde, Luis Ángel

Award date:
2021

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE LA
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN ACEROS
INOXIDABLES UTILIZADOS EN
INTERCAMBIADORES DE CALOR**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR

Luis Ángel Oliva Conde (ORCID: 0000-0002-4725-0854)

ASESOR

PhD. César Rolando Nunura Nunura (ORCID: 0000-0001-6657-7767)

Lima – Perú

2021

Dedicatoria:

Este presente trabajo está dedicado a mis padres Manuel y Carmen, por su apoyo incondicional y porque fueron mi mayor motivación para lograr mis metas. A mi hermano Frank, por ser un excelente ejemplo a seguir como profesional. A mi enamorada Sheyla, por demostrar su amor y confianza en mí.

Agradecimientos:

Agradezco a mis asesores Cesar Nunura y Wilson Hormaza por apoyarme a realizar este presente trabajo y por ayudarme a formarme como un buen profesional. A todos los profesores de UTEC, que me han brindado sus conocimientos a lo largo de mi carrera universitaria. A mis mejores amigos de la universidad, por acompañarme y regalarme los mejores momentos en mi vida universitaria.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 12 |
| ABSTRACT | 13 |
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO | 24 |
| 1.1 Teoría de la corrosión..... | 24 |
| 1.1.1 Tipos de corrosión..... | 25 |
| 1.1.2 Corrosión por picadura (Pitting) | 27 |
| 1.2 Aceros inoxidables | 30 |
| 1.2.1 Tipos de aceros inoxidables | 33 |
| 1.2.2 Aceros inoxidables austeníticos | 35 |
| 1.2.3 Aceros inoxidables ferríticos | 38 |
| 1.3 Principios electroquímicos | 40 |
| 1.3.1 Proceso electroquímico de la corrosión | 42 |
| 1.3.2 Proceso electroquímico de la corrosión por picadura | 43 |
| 1.4 Pasivación..... | 46 |
| 1.4.1 Diagrama de Pourbaix..... | 47 |
| 1.4.2 Curva de polarización | 48 |
| 1.5 Técnicas electroquímicas | 51 |
| 1.5.1 Teoría del potencial mixto | 51 |
| 1.5.2 Ecuación de Butler - Volmer | 53 |
| 1.5.3 Resistencia a la polarización..... | 54 |
| 1.5.4 Extrapolación de Tafel..... | 55 |

| | | |
|--------------------------------------|--|-----------|
| 1.5.5 | Velocidad de corrosión | 57 |
| 1.5.6 | Polarización cíclica | 58 |
| CAPÍTULO II METODOLOGÍA | | 60 |
| 2.1 | Tipo y Enfoque de la investigación..... | 60 |
| 2.2 | Fuentes y Técnicas de recolección de información..... | 61 |
| 2.3 | Variables de la investigación..... | 61 |
| 2.4 | Diseño experimental..... | 62 |
| 2.5 | Equipos..... | 65 |
| 2.5.1 | Electrodos | 65 |
| 2.5.2 | Potenciostato..... | 66 |
| 2.5.3 | Rugosímetro..... | 67 |
| 2.5.4 | Otros equipos | 68 |
| 2.6 | Fase 1: Caracterización de los materiales | 68 |
| 2.6.1 | Caracterización química..... | 69 |
| 2.6.2 | Caracterización mecánica | 70 |
| 2.6.3 | Medición de la rugosidad..... | 71 |
| 2.7 | Fase 2: Preparación de la celda electroquímica | 71 |
| 2.7.1 | Corte y preparación de los electrodos de trabajo | 72 |
| 2.7.2 | Preparación del electrolito | 73 |
| 2.7.3 | Montaje de la celda de corrosión | 73 |
| 2.8 | Fase 3: Prueba de extrapolación de Tafel..... | 74 |
| 2.8.1 | Medición de potencial en circuito abierto (OCP) | 75 |
| 2.8.2 | Registro de la curva de polarización..... | 75 |
| 2.8.3 | Determinación de la velocidad de corrosión..... | 76 |

| | | |
|---|---|------------|
| 2.9 | Fase 4: Prueba de polarización cíclica | 76 |
| 2.10 | Fase 5: Análisis superficial de la muestra | 77 |
| CAPÍTULO III RESULTADOS | | 79 |
| 3.1 | Caracterización de los materiales | 79 |
| 3.1.1 | Caracterización química..... | 79 |
| 3.1.2 | Caracterización mecánica | 80 |
| 3.1.3 | Medición de la rugosidad..... | 81 |
| 3.2 | Prueba de extrapolación de Tafel..... | 82 |
| 3.2.1 | Medición de potencial en circuito abierto (OCP) | 82 |
| 3.2.2 | Registro de la curva de polarización..... | 84 |
| 3.2.3 | Determinación de la velocidad de corrosión..... | 88 |
| 3.3 | Prueba de polarización cíclica..... | 91 |
| 3.4 | Análisis superficial de las muestras | 96 |
| CONCLUSIONES | | 100 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 102 |
| ANEXOS..... | | 108 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1.1 Clasificación de los aceros inoxidables..... | 33 |
| Tabla 1.2 Propiedades generales de los tipos de aceros inoxidables..... | 35 |
| Tabla 1.3 Composición Química (%) de los aceros AISI 304, 304L, 316 y 316L..... | 37 |
| Tabla 1.4 Composición Química (%) de los aceros AISI 430, 434 y 436..... | 39 |
| Tabla 2.1 Codificación del material y factor A de acuerdo al nivel | 63 |
| Tabla 2.2 Diseño experimental del estudio..... | 64 |
| Tabla 2.3 Cantidad de Cloruro de Sodio (NaCl) requerido para el electrolito | 73 |
| Tabla 3.1 Comparación de la composición química (% en peso) del acero inoxidable AISI 316L..... | 80 |
| Tabla 3.2 Comparación de la composición química (% en peso) del acero inoxidable AISI 430 | 80 |
| Tabla 3.3 Comparación de la dureza escala Rockwell HRB de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430..... | 81 |
| Tabla 3.4 Rugosidad aritmética (R_a) de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 | 81 |
| Tabla 3.5 Densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0% | 88 |
| Tabla 3.6 Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de corrosión del acero inoxidable AISI 316L y AISI 430 | 89 |
| Tabla 3.7 Velocidad de corrosión de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%..... | 90 |
| Tabla 3.8 Potencial de picadura (E_{pic}) de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%..... | 94 |
| Tabla 3.9 Áreas afectadas por la corrosión por picadura de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0% | 98 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1.1 Corrosión en un intercambiador de calor de coraza y tubos | 24 |
| Figura 1.2 Principales formas de ataque de corrosión reagrupado por facilidad de identificación | 27 |
| Figura 1.3 Sección transversal de un tubo dañado por corrosión por picadura..... | 28 |
| Figura 1.4 Esquema del pozo más profundo en relación con la penetración promedio | 29 |
| Figura 1.5 Variación del potencial de picadura crítico según la temperatura de un acero inoxidable 316L en (1) 0.6 M NaCl, (2) 0.6 M NaCl + 0.1 M Na ₂ SO ₄ , y (3) 0.6 M NaCl + 3x10 ⁻³ M Na ₂ S | 30 |
| Figura 1.6 Efecto del cromo en la pasividad de los aceros inoxidables | 31 |
| Figura 1.7 Velocidad de isocorrosión de varios aceros inoxidables en ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)..... | 32 |
| Figura 1.8 Microestructura del acero inoxidable AISI 316L recocido a 954°C | 36 |
| Figura 1.9 Variación de la velocidad de corrosión como una función de los contenidos de Mn y Mo para los aceros inoxidables AISI 304 y AISI 316 | 36 |
| Figura 1.10 Microestructura del acero inoxidable AISI 430 recocido | 38 |
| Figura 1.11 Curva de polarización de AISI 410, AISI 430, AISI 445 y 24CrSS en 0.5 mol dm ⁻³ H ₂ SO ₄ | 40 |
| Figura 1.12 Esquema de celda electroquímica | 41 |
| Figura 1.13 Proceso de corrosión debido a heterogeneidades (α -Ferrita y Perlita) en el material | 43 |
| Figura 1.14 Representación esquemática de la reacción electroquímica de la corrosión por picadura en un medio que contiene NaCl..... | 44 |
| Figura 1.15 Pasivación del acero inoxidable | 47 |
| Figura 1.16 Diagrama de Pourbaix del hierro a 25°C | 48 |
| Figura 1.17 Curva esquemática de polarización anódica de metales pasivables | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 1.18 Efecto de elementos de aleación de aceros inoxidable en el comportamiento corrosivo | 50 |
| Figura 1.19 Diagrama de Evans de un proceso de corrosión de un metal en un medio ácido | 52 |
| Figura 1.20 Representación en ejes lineales de la cinética de corrosión de un metal en medio ácido..... | 53 |
| Figura 1.21 Representación de una curva de polarización con extrapolación de Tafel | 57 |
| Figura 1.22 Gráfica de polarización cíclica..... | 58 |
| Figura 2.1 Diagrama de variable controlable, no controlables, entrada y salida de la prueba de polarización potenciodinámica | 62 |
| Figura 2.2 Proceso general de la investigación | 64 |
| Figura 2.3 Electrodo de referencia (a); electrodo de trabajo (b); electrodo auxiliar (c)..... | 66 |
| Figura 2.4 Potenciostato AUTOLAB Metrohm | 67 |
| Figura 2.5 Rugosímetro Mitutoyo SJ-210..... | 68 |
| Figura 2.6 Proceso de caracterización de los materiales | 69 |
| Figura 2.7 Ensayo de espectrometría por emisión de chispas | 69 |
| Figura 2.8 Ensayo de dureza Rockwell B | 70 |
| Figura 2.9 Montaje de rugosímetro con la muestra de acero inoxidable..... | 71 |
| Figura 2.10 Proceso de preparación de la celda electroquímica | 72 |
| Figura 2.11 Electrodo de trabajo cortado de forma circular (a); electrodo de trabajo montado (b)..... | 72 |
| Figura 2.12 Esquema de celda electroquímica montada | 74 |
| Figura 2.13 Proceso de la prueba de extrapolación de Tafel..... | 74 |
| Figura 2.14 Análisis superficial de la muestra | 78 |
| Figura 3.1 Registro del potencial en circuito abierto (OCP) versus tiempo para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% y 3.0% (ensayo por duplicado) | 83 |
| Figura 3.2 Registro del potencial en circuito abierto (OCP) versus tiempo para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0 % (ensayo por duplicado) . | 83 |
| Figura 3.3 Potenciales de corrosión (E_{corr}) de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0% | 84 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.4 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 1)..... | 85 |
| Figura 3.5 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 1)..... | 86 |
| Figura 3.6 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 2) | 87 |
| Figura 3.7 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 2) | 87 |
| Figura 3.8 Esquema de las velocidades de corrosión de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0% | 90 |
| Figura 3.9 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% (ensayo por duplicado) | 92 |
| Figura 3.10 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.0% (ensayo por duplicado) | 92 |
| Figura 3.11 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% (ensayo por duplicado) | 93 |
| Figura 3.12 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.0% (ensayo por duplicado) | 93 |
| Figura 3.13 Esquema de los potenciales de picadura (E_{pic}) de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0% | 95 |
| Figura 3.14 Superficie de las muestras posterior a los ensayos potenciodinámicos en aumento de 15x. Acero inoxidable AISI 316L en solución de (a) NaCl 3.5% y (b) NaCl 3.0%; Acero inoxidable AISI 430 en solución de (c) NaCl 3.5% y (d) NaCl 3.0%..... | 97 |
| Figura 3.15 Picaduras encontradas en las muestras posterior a los ensayos potenciodinámicos en aumento de 45x. Acero inoxidable AISI 316L en solución de (a) NaCl 3.5% y (b) NaCl 3.0%; Acero inoxidable AISI 430 en solución de (c) NaCl 3.5% y (d) NaCl 3.0%..... | 98 |

INDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| ANEXO 1: Propiedades mecánicas de productos planos de aceros inoxidables | 109 |
| ANEXO 2: Tabla de grados de rugosidad | 113 |
| ANEXO 3: Curvas de polarización potenciodinámicas..... | 114 |
| ANEXO 4: Superficie de las muestras AISI 316L y AISI 430 en un aumento de 15x | 116 |

RESUMEN

El efecto de la corrosión es un fenómeno que causa muchas pérdidas económicas en las industrias a nivel mundial, ya que provoca la destrucción del material de los componentes de diferentes equipos. Los intercambiadores de calor son una muestra de ello, ya que estas máquinas son empleadas en las industrias para distintos procesos de calentamiento o enfriamiento, utilizando fluidos corrosivos. Por esta razón, es que sus componentes como tuberías, carcasas y baffles son fabricados de aceros inoxidable, por sus propiedades de resistencia corrosiva. Entre los aceros inoxidable más usados para la fabricación de estos componentes son: AISI 316L y AISI 304L, puesto que pertenecen a la clasificación de aceros inoxidable austeníticos y poseen una alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, el costo de estos aceros inoxidable es muy elevado, y es por esta razón que en la actualidad la fabricación de los intercambiadores de calor es costoso.

Esto ha llevado a que, en esta presente tesis se pretenda realizar un análisis comparativo de resistencia a la corrosión del acero inoxidable austenítico AISI 316L y ferrítico AISI 430, el cual tiene un menor costo. Todo esto, con el fin de determinar si este acero es capaz de permitir una buena resistencia corrosiva en los intercambiadores de calor de coraza y tubos.

El método por el cual se realizarán las pruebas será mediante la técnica electroquímica de extrapolación de Tafel, el cual nos permitirá conocer la tasa de corrosión general del material. Adicionalmente, se realizará una prueba de polarización cíclica para analizar la corrosión por picadura de los materiales. Todas estas pruebas, serán realizadas en una solución de 3.5% y 3.0% de cloruro de sodio (NaCl), en un medio de temperatura ambiental de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Por último, con los resultados obtenidos, se podrá comparar el rendimiento corrosivo del acero inoxidable ferrítico.

Palabras clave:

Acero inoxidable, Polarización cíclica, Corrosión por picadura, AISI 316L, AISI 430

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY ABOUT CORROSION RESISTANCE IN STAINLESS STEELS USED IN HEAT EXCHANGERS

The effect of corrosion is a phenomenon that causes many economic losses in industries worldwide, since it causes the destruction of the material of the components of different equipment. Heat exchangers are an example of this, since these machines are used in industries for different heating or cooling processes, using corrosive fluids. For this reason, it is that its components such as pipes, shells and baffles are made of stainless steels, due to their corrosive resistance properties. Among the most used stainless steels for the manufacture of these components are: AISI 316L and AISI 304L, since they belong to the classification of austenitic stainless steels and have a high resistance corrosion. However, the cost of these stainless steels is very high, and it is for this reason that the manufacture of heat exchangers is currently expensive.

This has led to the intention in this present thesis to carry out a comparative analysis of corrosion resistance of austenitic stainless steel AISI 316L and ferritic AISI 430, which has a lower cost. All this, in order to determine if this steel is capable of allowing good corrosion resistance in shell and tube heat exchangers.

The method by which the tests will be carried out will be through the Tafel extrapolation electrochemical technique, which will allow us to know the general corrosion rate of the material. In addition, a cyclic polarization test will be performed to analyze the pitting corrosion of the materials. All these tests will be carried out in a solution of 3.5% and 3.0% of sodium chloride (NaCl), in a medium with an ambient temperature of 25 ± 1 ° C. Finally, with the results obtained, the corrosive performance of ferritic stainless steel can be compared.

Keywords:

Stainless steel, Cyclic polarization, Pitting corrosion, AISI 316L, AISI 430

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, los intercambiadores de calor han sido un equipo muy demandado en diferentes industrias de todo el mundo, tales como: alimentaria, farmacéutica, cosmética, química, petroquímica, metalúrgica, entre otras. Logrando alcanzar una demanda a nivel global de US\$ 15.3 billones en el año 2019 y con una proyección de demanda incrementado a los US\$ 20.5 billones para el año 2024, a una tasa compuesta anual de 6.0%. Esta alta demanda es sostenida, ya que existe un crecimiento continuo de estas industrias a nivel mundial [1]; y en la mayoría de los procesos de estas industrias se requiere un equipo como el intercambiador de calor, que permita transferir energía térmica entre dos o más fluidos [2]. Es por eso, que existe una gran variedad de tipos de intercambiadores de calor, pero los más utilizados en la industria según su clasificación por construcción son: los intercambiadores de calor de coraza y tubos e intercambiadores de calor de placas.

El intercambiador de calor de coraza y tubos consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa [3]. Estos tubos contienen en su interior el fluido interno y en su exterior (carcasa) el fluido externo. Ambos fluidos dentro del intercambiador de calor. realizan una transferencia de calor desde el fluido con mayor temperatura, hacia el fluido de menor temperatura. Además, estos intercambiadores de calor, poseen placas de tubos y baffles que ayudan a redireccionar el fluido generando turbulencia, y así mejorando la transferencia de calor. Por otro lado, el proceso de fabricación de estos equipos se basa en el ensamble de los componentes mencionados anteriormente, y esto se realiza mediante soldadura de tipo TIG, sobre todo en la carcasa. Teniendo el intercambiador de calor ensamblado, se realiza una prueba final que consiste en introducir agua a presión para comprobar que no exista alguna fuga.

El intercambiador de calor de placas está conformado de placas delgadas en lugar de tubos, para separar a los dos fluidos caliente y frío [3]. Los fluidos son transportados entre

las placas apiladas, que por lo general son corrugadas, mejorando la transferencia de calor entre estos. Todo el conjunto de placas se encuentra entre dos bastidores con conexiones hidráulicas que conforman las entradas y salidas. A diferencia de los intercambiadores de calor de coraza y tubos, estos equipos son ensamblados sometidos a una determinada compresión en una prensa hidráulica. Posterior a ello, se realiza la prueba de presión, para garantizar que no existan fugas y su correcto funcionamiento.

Estos intercambiadores de calor dependiendo del tipo de aplicación en la industria son sometidos a diferentes medios agresivos, los cuales provocan corrosión en sus componentes. Por ende, muchas de las industrias se ven afectadas por este fenómeno, ya que provocan significativas cantidades de costos: en remplazo de equipos corroídos, mantenimientos preventivos, pérdidas de eficiencia, entre otros. Por ejemplo en el año 2013, se estimó el costo de corrosión global en US\$ 2.5 trillones, que es equivalente al 3.4 % del PBI mundial [4]. En el caso de Perú y países de Latinoamérica, no existen datos concretos de las pérdidas económicas por la corrosión, pero con los estudios realizados hasta el momento se estiman pérdidas en no menos del 8% del PBI, para el caso de Perú [5]. Esto nos da una noción de lo perjudicial que puede ser la corrosión en las industrias y del impacto económico que puede tener este tipo de fenómeno.

Según Mars G. Montana, científico especialista en corrosión, el fenómeno de la corrosión se puede definir como la destrucción o deterioro de un material por reacción con su entorno [6] y existen distintos tipos de corrosión. La más común y visible es la corrosión general, pero también están los de tipo localizado como: la corrosión intergranular, picadura (pitting), galvánica, bajo tensión (SCC), entre otros. En el caso de los intercambiadores de calor, solo una minoría de las fallas son causadas por corrosión uniforme, frecuentemente ocurre de forma localizada, especialmente por picadura y bajo tensión [7]. Cabe mencionar, que a pesar de que los componentes de los intercambiadores de calor son fabricados con aceros inoxidable, estos siguen presentando este tipo de problemas en la actualidad. Los aceros inoxidable más usados para la fabricación de estos

componentes son: AISI 316L y 304L, puesto que pertenecen a la clasificación de aceros inoxidables austeníticos y poseen una alta resistencia a la corrosión.

Sin embargo, el precio de estos aceros inoxidables austeníticos y el costo de la fabricación de geometrías complejas con estos aceros es muy elevado. Por consiguiente, el costo de los intercambiadores de calor lo es también, en especial de los baffles que a menudo constituyen una significativa fracción del costo total del equipo [8]. No obstante, existe otro tipo de acero inoxidable que también posee buena resistencia a la corrosión y su precio no es tan elevado en comparación del acero inoxidable austenítico. Estas características pertenecen al acero inoxidable ferrítico. Por ende, este es un ámbito que necesita ser estudiado y analizado, con el fin de determinar si realmente estos aceros inoxidables ferríticos pueden ser comparables a los aceros inoxidables austeníticos, con respecto a sus capacidades de resistencia a la corrosión.

Alcance

Este trabajo de investigación pretende realizar un análisis experimental de corrosión en un acero inoxidable que puede ser utilizado en un intercambiador de calor. El acero inoxidable considerado para este estudio es del tipo ferrítico AISI 430, el cual será comparado con el acero inoxidable austenítico AISI 316L. Eso quiere decir, que los aceros inoxidables martensíticos, dúplex y endurecidos por precipitación no serán tomados en cuenta para esta investigación.

Existe una gran variedad de medios corrosivos a los que está sometido un intercambiador de calor y este depende de su aplicación. Para ello, el medio corrosivo seleccionado para este trabajo será una solución de cloruro de sodio (NaCl) variando su concentración en 3.5% y 3.0%. Además, se tomará como referencia la temperatura ambiental de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ para todas las pruebas realizadas.

Por otro lado, las pruebas experimentales realizadas serán enfocadas al análisis de corrosión general y por picadura, excluyendo del estudio los otros tipos de corrosión. Por lo tanto, si tenemos en cuenta esto, es necesario mencionar que tan solo se realizarán las pruebas potenciodinámicas de extrapolación de Tafel y polarización cíclica, las cuales nos permitirán realizar el estudio de ambos tipos de corrosión.

Además, para garantizar un correcto estudio de la resistencia a la corrosión mediante las pruebas mencionadas, estas serán realizados bajo la norma ASTM G59-97 y ASTM G61-86. Estas normas describen los procedimientos estándares para realizar mediciones de polarizaciones potenciodinámicas y potencioestáticas, para medidas de corrosión en metales y aleaciones.

Por último, el proceso de selección del acero inoxidable ferrítico para esta investigación, tomó en cuenta la disponibilidad de los aceros en el mercado peruano. Así mismo, los precios de los materiales que serán mencionados en este trabajo, han sido proporcionados por la empresa Polimetales en el año 2020.

Antecedentes

Existen diversas investigaciones que son precedentes a este trabajo, pero con el fin de tener un panorama general de estas, se seleccionó dos estudios relacionados al acero inoxidable austenítico AISI 316L y tres estudios más relevantes sobre los aceros inoxidables ferríticos. Cabe mencionar, que estas investigaciones de análisis comparativos de resistencia a la corrosión, muestran información que se tomará en cuenta como criterios para la realización de este trabajo.

En el año 2014, en el Instituto de Metales y Tecnología de Eslovenia, se desarrolló el estudio de la “Comparación del comportamiento a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos en agua de mar y en una solución de 3.5% NaCl” [9]. Para esta investigación se utilizó el acero austenítico AISI 316L y las dos soluciones empleadas contaban con una

densidad de 1.025 g/cm^3 y un grado de acidez pH de 7.2. Con respecto a la parte experimental, se realizaron distintas pruebas como: mediciones Potenciodinámicas (PD), Espectroscopia de Fotoelectrones de Rayos X (XPS) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Todos los datos de estas pruebas fueron recolectados para un tiempo de inmersión creciente (desde 0 h hasta 100 h) y los resultados se graficaron en curvas de polarización, diagramas de Nyquist y perfiles de profundidad de XPS.

De acuerdo a los resultados, se determinó que la composición de la película pasiva en el acero AISI 316L con agua de mar y la solución de 3.5% NaCl, son semejantes. Sin embargo, se resaltó que con los resultados obtenidos en las pruebas de PD y EIS, muestra que el potencial corrosivo (E_{corr}) y la intensidad de corriente corrosiva (i_{corr}), difieren significativamente en ambas soluciones en periodos de exposición largos. Por lo que se debe tener en consideración, cuando se realicen pruebas de aceros inoxidable en solución de cloruro de sodio como agua marina artificial.

En el año 2016, en el Departamento de Metalurgia y Materiales de la Universidad de Indonesia, se realizó el análisis “Comparación del comportamiento corrosivo de aceros inoxidable austeníticos AISI 304L y 316L en solución de cloruro de sodio acuoso por el uso de espectroscopía de impedancia electroquímica” [10]. Se utilizó distintas soluciones de cloruro de sodio acuoso y las pruebas fueron realizadas a una temperatura de 27°C . Las concentraciones de las soluciones de cloruro de sodio acuoso fueron de 1%, 2%, 3.5%, 4% y 5%. Además, todas las pruebas realizadas fueron mostradas en diagrama de Nyquist y circuitos equivalentes químicos.

Con los resultados obtenidos, se determinó que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable AISI 304L y 316L en una solución de 3.5% de NaCl (la cual es similar a una solución de agua marina), era la más baja en comparación a las otras concentraciones de cloruro de sodio. Adicionalmente, se observó que la resistencia a la corrosión de ambos aceros inoxidable en soluciones de 3.5% y 4% NaCl la diferencia era relativamente pequeña.

En el año 2018, en el Departamento de Ciencias Materiales y Tecnología de la Universidad Técnica de Nagaoka de Japón se estudió el “Efecto del contenido de cromo en la resistencia de corrosión de aceros inoxidable ferríticos en una solución de ácido sulfúrico” [11]. Los aceros inoxidable que se utilizaron para esta investigación fueron: AISI 410, AISI 430, AISI 445 y 24CrSS. Para la caracterización de los materiales se utilizó 3 tipos de pruebas: difracción de X-ray (XRD), espectroscopia de descarga luminosa (GDS) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los resultados del comportamiento de corrosión se analizaron mediante la obtención de las curvas de polarización de cada acero.

Por último, los resultados revelaron que el acero inoxidable ferrítico con mayor cantidad de Cr (24% en masa) mostró la mejor resistencia a la corrosión basada en su capa de pasivación estable. Adicionalmente, mediante las imágenes obtenidas de la prueba de superficie SEM, se determinó que en la superficie del acero inoxidable 24CrSS no se produjo ningún tipo de corrosión.

En el mismo año 2018, un grupo de investigación conformado de la Universidad del Noreste (China), Universidad de Shenyang (China) y Universidad de Texas (USA) realizó un estudio del “Efecto de la adición de W y Ce sobre el comportamiento de corrosión electroquímica de 444 - tipo de acero inoxidable ferrítico” [12]. El estudio fue realizado en una solución de 0.1 M de NaOH y se produjeron 3 tipos de aleaciones con Ce (0.05%) y W (0.5% - 1%) para realizar la comparación con el acero inoxidable ferrítico convencional AISI 444. Se ejecutaron 3 tipos de pruebas: polarización potenciodinámica, espectroscopia de impedancia electroquímica y experimentos de medición de capacitancia.

Una vez obtenido los resultados, se concluyó que la resistencia a la corrosión del acero inoxidable AISI 444 incrementó en adición de los elementos de W y Ce, los cuales disminuyeron la tasa de corrosión y densidad de corriente pasiva, pero no alteraron el potencial de picadura.

En el año 2019, en el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Perugia en Italia, se llevó a cabo una investigación sobre el “Comportamiento corrosivo de la nueva generación de aceros inoxidable super-ferríticos” [13]. Las características de estos aceros es que contienen un rango de cromo desde 21% hasta 24% y una baja cantidad de carbono y nitrógeno ($C + N < 0.015\%$). Además, pequeñas cantidades de níquel y molibdeno son agregadas dependiendo del acero. Para la realización de la comparación, se utilizó los dos siguientes aceros inoxidable super-ferríticos (AISI 460LI y AISI 470LI) y dos aceros inoxidable austeníticos clásicos, AISI 304 y 316L. Estos cuatro aceros fueron sometidos a diferentes pruebas para analizar los diferentes tipos de corrosión: generalizada, por picadura, intergranular y bajo tensión (SCC).

Tras obtener los resultados, se garantizó que los aceros inoxidable super-ferríticos presentan mejor resistencia a la corrosión general y por picadura que los aceros austeníticos. Incluso, estos aceros no fueron afectados por la corrosión intergranular ni por la corrosión bajo tensión.

Justificación y motivación

La tendencia de la investigación en el campo de la corrosión, se ha orientado principalmente en determinar el comportamiento de los aceros inoxidable en los distintos medios corrosivos. Adicional a ello, a lo largo de los años se han ido realizando diversos estudios de elementos adicionales a los aceros inoxidable como níquel, molibdeno, niobio, entre otros y cómo estos pueden aportar a la mejora de las propiedades de resistencia corrosiva del acero [14] [15]. Todas estas mejoras, han sido de mucho beneficio para las distintas aplicaciones de los aceros inoxidable. Sin embargo, esto ha generado que el precio de estos, se eleve considerablemente. De tal modo, que hoy en día se siguen desarrollando diversas investigaciones para mejorar este factor. Como, por ejemplo: implementación de nuevos procesos de manufactura o estudios de otros materiales inoxidable más económicos.

Este estudio comparte dicho objetivo, ya que en la actualidad el precio que tienen los intercambiadores de calor, fabricados con aceros inoxidable AISI 316L es muy elevado. Teniendo en cuenta eso, se propuso realizar una investigación sobre la resistencia corrosiva de un tipo de acero inoxidable diferente. En el caso de este estudio, se optó por analizar el acero inoxidable tipo ferrítico AISI 430, ya que cuenta con las propiedades necesarias para ser candidato.

En primer lugar, los aceros ferríticos se caracterizan por lo general por su resistencia a la corrosión y bajo costo, más que por sus propiedades mecánicas. Además, tienen excelente resistencia a la corrosión por picadura y por rendija inducida por cloruros [16]. En segundo lugar, estudios científicos recientes han demostrado que la presencia de porcentajes altos de cromo en los aceros inoxidables ferríticos incrementa de manera significativa su resistencia a la corrosión [11]. Estas características y su bajo costo económico hacen que el acero inoxidable ferrítico sea perfecto para el estudio y pueda ser comparado con el acero inoxidable austenítico AISI 316L.

Teniendo en cuenta esto, se puede ratificar la importancia que tiene esta investigación. Puesto que, a partir de los resultados obtenidos en este estudio, trae consigo una posibilidad de que en un futuro el material de los intercambiadores de calor pueda ser reemplazado por un material más económico. Así mismo, este estudio proveerá información relevante que servirá de guía para futuras investigaciones y que contribuirán de manera significativa al ámbito de la corrosión. En especial sobre los aceros inoxidables ferríticos en medios de NaCl, ya que no existe demasiada referencia bibliográfica acerca de ello. Eso quiere decir, que este estudio no tan solo servirá para la mejora de los intercambiadores de calor, sino que también para otros equipos que estén sometidos a medios de cloruros de sodio como: bombas, tanques, válvulas, tuberías y piezas expuestas a atmósferas marinas.

Objetivo general

Realizar un estudio comparativo de resistencia a la corrosión en el acero inoxidable ferrítico AISI 430, para que pueda ser utilizado en un intercambiador de calor.

Objetivos específicos

- Realizar una caracterización química y mecánica de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 siguiendo la norma ASTM E415-17y ASTM E18-18a.
- Preparar la celda electroquímica de corrosión bajo la norma ASTM G1-90.
- Realizar la prueba de extrapolación de Tafel en cloruro de sodio (NaCl) y calcular la velocidad de corrosión general según la norma ASTM G59-97 y ASTM G102-89e1.
- Realizar la prueba de polarización cíclica para corrosión localizada por picadura bajo la norma ASTM G61-86.
- Analizar la superficie de las muestras en búsqueda de corrosión general o picadura.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta todo el fundamento teórico en el que está basado los resultados obtenidos de este estudio. En primer lugar, se parte por describir los tipos de corrosión, para luego continuar con los tipos de aceros inoxidable y los principios electroquímicos. Por último, se explicará las técnicas electroquímicas de extrapolación de Tafel, resistencia a la polarización y polarización cíclica.

1.1 Teoría de la corrosión

La corrosión es el ataque destructivo de un material por reacción química o electroquímica con su entorno. Esta definición de corrosión incluye tan solo a los materiales metálicos. Un ejemplo de ello, se puede observar en la Figura 1.1 donde un intercambiador de calor de coraza y tubos ha sido afectado significativamente por el efecto de la corrosión. El deterioro por causas físicas no se considera corrosión, sino que se describe como erosión, irritación o desgaste. En algunos casos, el ataque químico acompaña al deterioro físico, como se describe en los siguientes términos: corrosión-erosión, desgaste corrosivo o corrosión por fricción [17].



Figura 1.1 Corrosión en un intercambiador de calor de coraza y tubos
Fuente: Arveng training & engineering [18]

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en cierta medida. Algunos ejemplos son:

- El aire y la humedad.
- Agua dulce, destilada, salada y de mina.
- Atmosferas rurales, urbanas e industriales.
- Vapores y otros gases como cloro, amoníaco, sulfuro de hidrogeno, dióxido de azufre y gases combustibles.
- Ácidos minerales como clorhídrico (HCl), sulfúrico (H₂SO₄) y nítrico (HNO₃).
- Ácidos orgánicos como náftenico, acético (C₂H₄O₂) y fórmico (CH₂O₂).
- Alcalis y suelos.
- Solventes.
- Aceites vegetales y petroleros.
- Productos alimenticios.

En general los materiales inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos. Por ejemplo, en la industria del petróleo la corrosión se debe más por el cloruro de sodio, azufre, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y agua, que por el aceite, nafta o gasolina [6].

1.1.1 Tipos de corrosión

Una excelente manera de poder clasificar a los tipos de corrosión es por las formas en la que se manifiesta. En otras palabras, por la apariencia del metal corroído. Por lo general, la corrosión se puede visualizar a simple vista, pero en otros casos se necesita de una ampliación para poder determinar el tipo de corrosión [6].

Teniendo en cuenta esto, Paul Dillon agrupó las ocho formas de corrosión en tres categorías como se muestran en la Figura 1.2. Además, también se muestra un noveno tipo, ya que reconoció los efectos microbianos como una nueva forma de corrosión [19]. Es necesario mencionar, que posteriormente la corrosión por picadura será desarrollada con más detalle, ya que forma parte principal de la investigación.

- Grupo I: Problemas de corrosión fácilmente identificables por un examen visual.
 1. Corrosión uniforme: se caracteriza por una pérdida regular y uniforme del metal de la superficie corrosiva.
 2. Corrosión localizada (pitting, crevice): se caracteriza por la formación de agujeros pequeños en áreas discretas del material. Es considerado más dañino que la corrosión uniforme.
 3. Corrosión galvánica: ocasionado por el contacto de metales de distinto potencial de oxidación en un mismo medio corrosivo afectando la superficie del acero inoxidable menos noble.
- Grupo II: Daño por corrosión que puede requerir medios de examen complementarios para su identificación.
 4. Corrosión-erosión: una forma de ataque causado por flujos de alta velocidad que combina el efecto de 2 fenómenos: corrosión y erosión, aumentando sus perjuicios más que por separado.
 5. Corrosión Intergranular, localizada en los límites de grano en la microestructura metálica, provocando una reducción de los valores de las propiedades mecánicas del material.
 6. La lixiviación selectiva (dealloying), se produce en materiales aleados en el cual se provoca una eliminación selectiva de un elemento de la aleación mediante procesos de corrosión.
- Grupo III: Las muestras de corrosión para estos tipos generalmente deben de verificarse mediante algún tipo de microscopia.
 7. Corrosión por agrietamiento bajo tensión o fatiga (stress corrosión cracking, fatigue): corresponde a una falla del material, la cual ha sido originada por la presencia simultanea de un ambiente corrosivo y la presencia de tensiones.

8. Corrosión a altas temperaturas (scaling, internal attack): forma de corrosión que no requiere la presencia de un electrolito líquido. Los metales reaccionan directamente con átomos gaseosos de la atmosfera en lugar de iones de una solución.
9. Corrosión microbiológica, ocasionado por la presencia o actividad de microorganismos en biopelículas sobre la superficie del material.

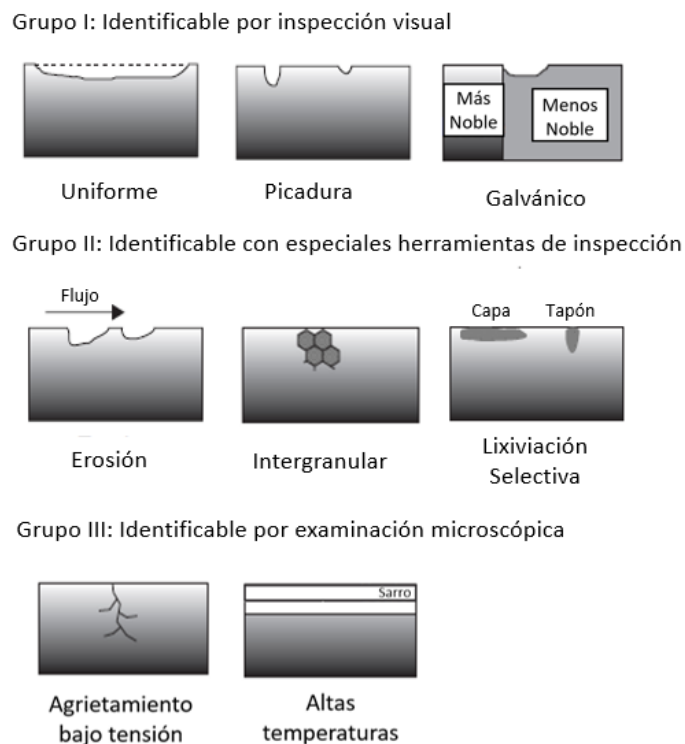


Figura 1.2 Principales formas de ataque de corrosión reagrupado por facilidad de identificación
Fuente: Forms of Corrosion: Recognition and Prevention [19]

1.1.2 Corrosión por picadura (Pitting)

La corrosión por picadura es una forma de ataque extremadamente localizado que ocasiona agujeros en el metal. Estos agujeros en la mayoría de los casos son relativamente pequeños y a veces se pueden encontrar de manera aislada o en otras ocasiones tan juntas que parecen una superficie rugosa [6]. En La Figura 1.3 se puede observar la sección

transversal de un tubo de intercambiador de calor, el cual contiene un agujero por picadura con una profundidad significativa y si este se seguía propagando podría haber ocasionado un accidente.

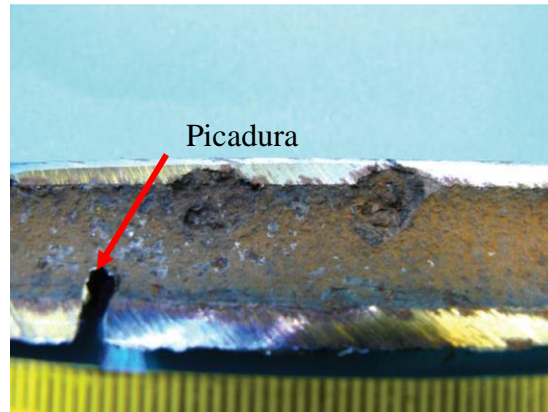


Figura 1.3 Sección transversal de un tubo dañado por corrosión por picadura
Fuente: Heavy metal scaling and corrosion in a geothermal heat exchanger [20]

Este tipo de corrosión se considera una de las formas de corrosión más destructivas y frecuentes en la industria, ya que provoca que el equipo falle. Sus consecuencias pueden ser solo cosméticas, como en la fachada de un edificio, o llegar a ser potencialmente catastróficas, como sucedió en una zona residencial de Guadalajara-México en 1992, en el cual la fuga de una tubería de gasolina provocó una explosión que asesinó a 215 personas. Estos agujeros son muy difíciles de detectar debido a su tamaño y porque generalmente están cubiertos por la corrosión general del metal. Todo esto ha llevado a que la corrosión por picadura sea la forma de corrosión más intensamente estudiada y debatida en los aceros inoxidables [6] [21].

La corrosión por picadura se puede distinguir de acuerdo a la profundidad del pozo. Si el ataque de la corrosión se limita a un área de metal relativamente pequeña, que actúa como ánodo, los pozos resultantes se describen como profundos. Si el área de ataque es relativamente más grande y no tan profunda, los hoyos se describen como poco profundos. La profundidad de picadura puede ser expresado por un factor de picadura (véase Figura 1.4), el cual es la relación entre la penetración más profunda del metal y la penetración

promedio de metal, según lo determinado por la pérdida de peso de la muestra. Un factor de picadura unitario representa un ataque uniforme [17].

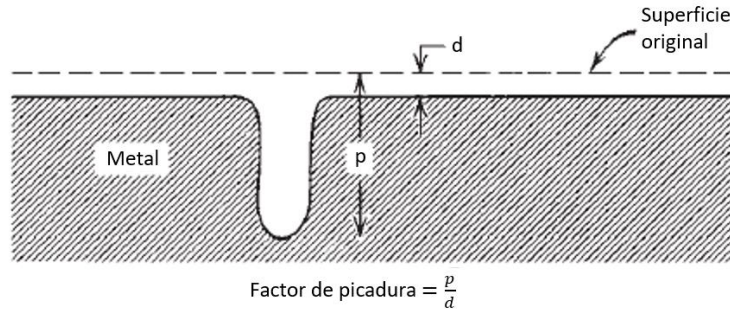


Figura 1.4 Esquema del pozo más profundo en relación con la penetración promedio del metal y el factor de picadura

Fuente: Corrosion and Corrosión control [17]

Además, las picaduras se correlacionan ampliamente con el entorno y las variables de composición. En los aceros inoxidable las correlaciones más conocidas y útiles son: el número equivalente de resistencia a las picaduras (PREN) y la temperatura crítica de picadura (CPT) [21]. Estos valores nos ayudan a clasificar a los aceros inoxidable de acuerdo al nivel de resistencia a la corrosión por picadura. En la Ecuación 1.1 y 1.2 se puede observar el cálculo necesario para hallar PREN, tanto para aceros inoxidable austeníticos y ferríticos.

- Para aleaciones austeníticas:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 30\% \text{N} \quad (1.1)$$

- Para aleaciones ferríticas:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 16\% \text{N} \quad (1.2)$$

Por otro lado, el efecto de la temperatura es un factor que influye en la resistencia a la corrosión por picadura de un acero inoxidable, ya que el incremento de la temperatura apresura las reacciones químicas de acuerdo a las consideraciones termodinámicas que las gobiernan. Por ejemplo, la solubilidad del oxígeno se incrementa con el aumento de la

temperatura, a la vez que el equilibrio químico involucrado en la precipitación de los óxidos e hidróxidos de hierro se altera de tal manera que los productos de corrosión son más susceptibles a depositarse [22]. En la Figura 1.5 se puede observar una demostración de cómo el aumento de la temperatura puede reducir la propiedad de resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable AISI 316L en tres medios con contenido de cloruro.

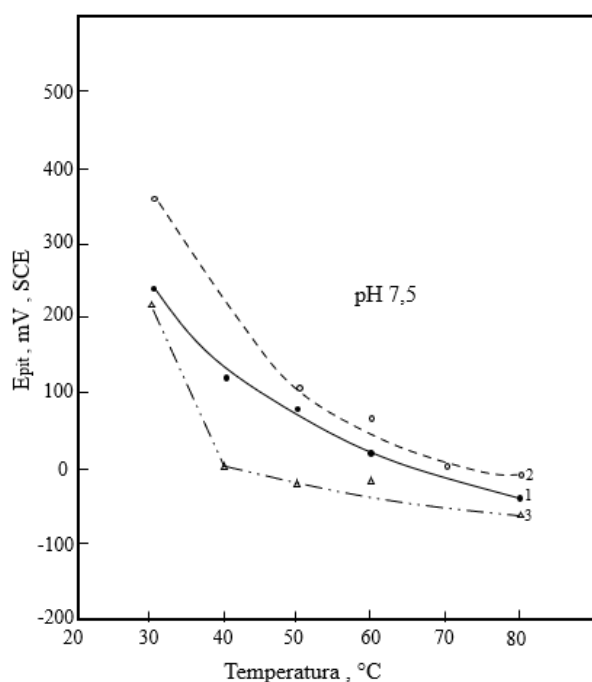


Figura 1.5 Variación del potencial de picadura crítico según la temperatura de un acero inoxidable 316L en (1) 0.6 M NaCl, (2) 0.6 M NaCl + 0.1 M Na₂SO₄, y (3) 0.6 M NaCl + 3x10⁻³ M Na₂S
Fuente: Pitting corrosion behaviour of AISI 316L in chloride containing solutions [23]

1.2 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son un tipo de aleación el cual está constituido a base de hierro, con un contenido bajo de carbono y con porcentaje mínimo del 11% de cromo. Cabe mencionar, que la mayoría de los grados comerciales llega a tan solo el 0.8 % de carbono. Además, algunos grados contienen como segundo elemento de aleación níquel, molibdeno, silicio, entre otros [16]. Los aceros inoxidables son considerados materiales modernos.

Desde que empezaron a estar disponibles para la industria hasta la actualidad, su uso se ha extendido constantemente hacia nuevas aplicaciones [24].

En general, los aceros inoxidable tienen como principal característica la alta resistencia a la corrosión. Esto debido a que forman una capa espontánea de óxido de cromo en su superficie, llamada capa pasiva, y esta resistencia es mayor mientras mayor contenido de cromo tenga en la composición química del acero (véase Figura 1.6). Aunque esta capa pasiva es supremamente fina, está firmemente adherida al metal y es excelentemente protectora en una gran cantidad de medios corrosivos. Además, es necesario mencionar que esta capa se restaura de manera rápida en presencia del oxígeno, y así cualquier tipo de daño por corte, abrasión o mecanizados son reparados velozmente [16].

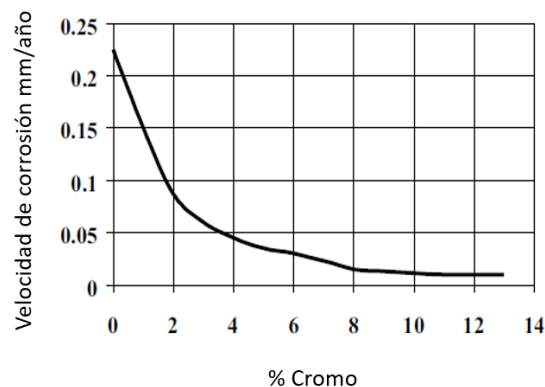


Figura 1.6 Efecto del cromo en la pasividad de los aceros inoxidables
Fuente: Design guidelines for the selection and use of stainless steel [25]

Como se mencionó, al aumentar las cantidades de cromo en el acero inoxidable, se aumenta la resistencia a la corrosión, pero también es necesario tener en cuenta que se pueden añadir otros elementos tales como níquel o molibdeno que mejoran aún más su resistencia a la corrosión [16]. Estos elementos son costosos, y es por esa razón que la mayoría de los aceros inoxidables tienen un precio elevado, aproximadamente cinco veces el de un acero al carbono común. Sin embargo, las buenas propiedades de estos aceros inoxidables justifican su alto costo, y esto se puede demostrar mediante cálculos de costes

de ciclo vital de una estructura o maquinaria [24]. En la Figura 1.7 se puede observar un diagrama de velocidad de isocorrosión de los aceros inoxidable más utilizados, los cuales están compuestos por diferentes elementos de aleación. Esto nos reafirma lo antes mencionado, que la resistencia a la corrosión de cada uno de estos aceros inoxidable esta netamente ligada a su composición química.

Por otro lado, el proceso de fabricación de los aceros inoxidable se puede resumir en cuatro etapas: La primera etapa inicia con la fusión del hierro, chatarra y ferroaleaciones de acuerdo al grado de acero inoxidable a preparar; la segunda etapa, consiste en la refinación del acero para eliminar impurezas y reducir el contenido de carbono; en la tercera etapa el acero líquido es sometido a una colada continua, se corta en planchones y se forman los rollos rolados en caliente. Por último, en la cuarta etapa estos rollos rolados pasan por un proceso de laminación en frío, recocido y limpieza [26].

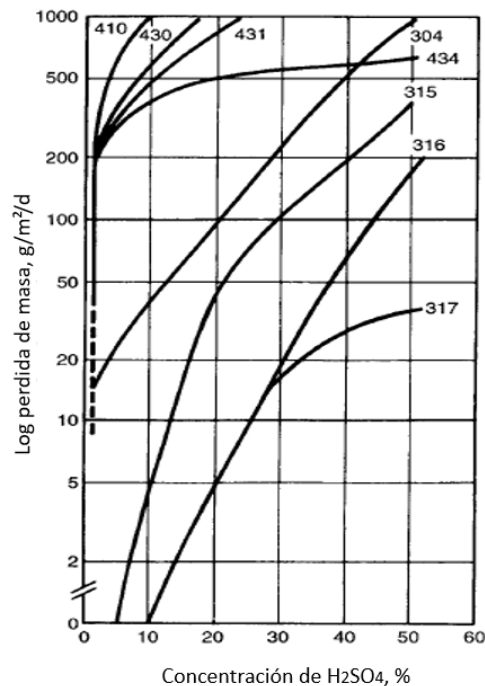


Figura 1.7 Velocidad de isocorrosión de varios aceros inoxidable en ácido sulfúrico (H₂SO₄)
Fuente: Corrosion: Metal/Environment Interaction [27]

1.2.1 Tipos de aceros inoxidables

Los aceros inoxidables pueden ser clasificados de acuerdo a su estructura metalúrgica en cinco tipos: austeníticos, martensíticos, ferríticos, dúplex y endurecidos por precipitación. Cada uno de estos tipos se diferencian por sus propiedades de resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, resistencia a la temperatura, soldabilidad, tenacidad y ductilidad. De acuerdo a ello, las aplicaciones en la industria varía para cada tipo de acero inoxidable. En la Tabla 1.1 se puede observar algunos ejemplos por cada tipo de acero inoxidable.

| Clase | Clasificación AISI | Ejemplos de especificaciones |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| I. Ferríticos | Serie | 409, 430, 434 |
| II. Martensíticos | 400 | 410, 420, 431 |
| III. Austeníticos | Series 200 y 300 | 304, 304L, 321, 316 |
| IV. Dúplex | Se usa | 329, 2205 |
| V. Endurecidos por precipitación | el nombre comercial | 17-4 PH, 15-5 PH 17-7PH, 15-7 MO |

Tabla 1.1 Clasificación de los aceros inoxidables

Fuente: Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable (CENDI) [26]

A continuación, se mostrará una breve descripción de las características más importantes y diferencias de los cinco tipos de aceros inoxidables [28]. Es necesario mencionar que los aceros ferríticos y austeníticos serán desarrollados con mayor detalle posteriormente, ya que forman parte esencial del estudio. Además, en la Tabla 1.2 se muestra un resumen de las propiedades generales más importantes de los diferentes tipos de aceros inoxidables y en el ANEXO 1 se puede encontrar las propiedades mecánicas de cada uno de ellos según el grado de acero.

- I. Ferríticos: Estos aceros tienen una estructura cristalina “cubica centrada en el cuerpo” (BCC) y pertenecen al grupo ferromagnético “suave”. Su contenido de cromo típicamente varía entre 12% y 18%, mientras que el contenido de carbono se mantiene bajo, lo que hace que estos aceros tengan una resistencia limitada. Estos aceros no pueden ser endurecibles por tratamientos térmico. Su selección

es por su bajo costo y su buena resistencia a la corrosión, pero esta es limitada en comparación con los aceros austeníticos.

- II. Martensíticos: Son similares a los aceros de baja aleación o al carbono, tienen una estructura similar a los ferríticos, pero debido a su alto contenido de carbono (0.1-1.2 %), estos pueden endurecerse y fortalecerse mediante tratamientos térmicos, de manera similar a los aceros al carbono. Incrementando el contenido de carbono, aumenta el potencial de resistencia y dureza, pero disminuye la ductilidad y la tenacidad. Su principal elemento de aleación es el cromo en un rango de 12% a 15%. Sus estructuras son “tetragonales centradas en el cuerpo” (BCT), es por eso que son clasificados como un grupo ferromagnético “fuerte”. La selección de este tipo de acero por lo general es por su buena resistencia mecánica y bajo costo.

- III. Austenítico: Este es el grupo más grande, en términos del número de aleaciones y uso. Al igual que los tipos ferríticos, no pueden endurecerse mediante tratamientos térmicos, ya que los niveles de carbono están restringidos, pero las adiciones de níquel cambian la estructura a una disposición atómica “cúbica centrada en la cara” (FCC). El molibdeno se agrega a algunos de los grados austeníticos para mejorar su resistencia a los mecanismos de corrosión “localizados”, como por grietas y picaduras. En general, este acero se selecciona por su propiedad de alta resistencia a la corrosión.

- IV. Dúplex: Estos aceros inoxidable tienen una estructura equilibrada o combinada de austenita y ferrita, y como resultado se obtiene características de estos dos tipos “básicos” de acero. Es necesario mencionar, que no son endurecibles por tratamiento térmico, pero son más resistentes que los tipos ferríticos o austeníticos en la condición de recocido. Estos aceros pueden ser usados en secciones de diseño más delgadas que los austeníticos, pero su principal ventaja es su resistencia mejorada a la corrosión bajo tensión (SCC).

V. Endurecidos por precipitación: Estos aceros inoxidables son endurecibles por “tratamientos de envejecimiento”, y por lo tanto tienen algunas similitudes con los tipos martensíticos, aunque el mecanismo metalúrgico para el endurecimiento es diferente y este es capaz de resistir hasta por encima de los 1700 Mpa. Estos tipos de aceros generalmente tienen una estructura martensítica y es por eso que usualmente son ferromagnéticos. Además, tienen buena ductilidad, tenacidad y su resistencia a la corrosión es similar a la austenítica. Se pueden soldar de manera más fácil que los tipos martensíticos “convencionales”. Este tipo de acero es muy utilizado en servicios de altas temperaturas, e incluso en componentes aeroespaciales.

| Clase | Resistencia a la corrosión | Dureza | Magnéticos | Endurecibles por tratamiento térmico (temple) | Soldabilidad |
|-------------------------------|----------------------------|-----------|------------|---|--------------|
| Martensíticos | Baja | Muy buena | SI | SI | Baja |
| Ferríticos | Buena | Regular | SI | NO | Buena |
| Austeníticos | Excelente | Buena | NO | NO | Excelente |
| Dúplex | Muy buena | Excelente | SI | NO | Buena |
| Endurecidos por precipitación | Regular | Excelente | SI | SI | Buena |

Tabla 1.2 Propiedades generales de los tipos de aceros inoxidables
Fuente: Elaboración propia

1.2.2 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos se caracterizan por tener muy buena resistencia a la corrosión, dureza y soldabilidad. Además, en la industria estos son considerados los aceros inoxidables más comunes, ya que son usados en todo tipo de aplicaciones e industrias. Algunas áreas típicas donde estos aceros son utilizados son: sistemas de tuberías, intercambiadores de calor, tanques y procesos de envasado para comida, química, farmacéutica y otros procesos industriales [29].

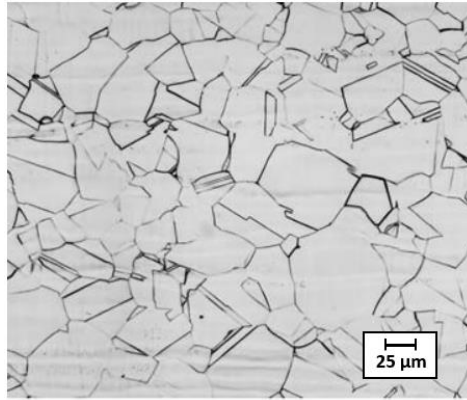


Figura 1.8 Microestructura del acero inoxidable AISI 316L recocido a 954°C
Fuente: Metallography and microstructures of stainless steels and maraging steels [30]

Los aceros inoxidables austeníticos contienen entre 16% y 25% de cromo, este elemento contribuye en su mayoría a su propiedad principal: la alta resistencia a la corrosión [21]. Su segundo elemento principal de aleación es el níquel el cual varía entre 8 a 37%. Este elemento se utiliza para suprimir la transformación de la su microestructura austenita y hacerla estable incluso a temperatura ambiente y más baja [16]. En la Figura 1.8 se puede observar la microestructura de los aceros inoxidables austeníticos. Está formada por cristales cúbicos centrados en las caras (FCC) y dándole un contorno rectilíneo a los granos.

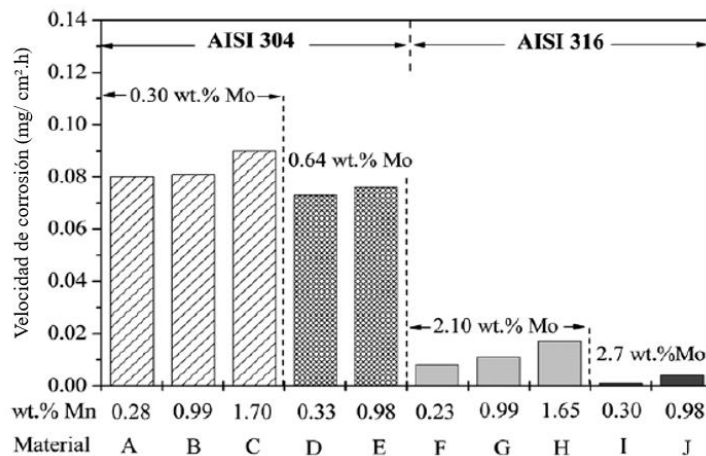


Figura 1.9 Variación de la velocidad de corrosión como una función de los contenidos de Mn y Mo para los aceros inoxidables AISI 304 y AISI 316

Fuente: Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions [31]

Incluso algunos de estos aceros pueden contener otros elementos como molibdeno (2-6%) y manganeso, para aumentar más su resistencia a la corrosión, en especial para picadura y por grietas (véase ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). titanio o niobio, a fin de estabilizar la estructura; azufre, para mejorar la maquinabilidad [24] [29]. En la Tabla 1.3, se puede observar la composición química de los aceros inoxidable austeníticos más utilizados en intercambiadores de calor AISI 304, 304L, 316 y 316L.

| Grado | C máx. | Si máx. | Mn máx. | P máx. | S máx. | N máx. | Cr | Ni | Mo |
|-------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| 304 | 0.07 | 1.00 | 2.00 | 0.045 | 0.015 | 0.11 | 17.5 - 19.5 | 8.0 - 10.5 | - |
| 304L | 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.045 | 0.015 | 0.11 | 17.5 - 19.5 | 8.0 - 10.5 | - |
| 316 | 0.07 | 1.00 | 2.00 | 0.045 | 0.015 | 0.11 | 16.5 - 18.5 | 10.0 - 13.0 | 2 - 2.5 |
| 316L | 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.045 | 0.015 | 0.11 | 16.5 - 18.5 | 10.5 - 13.0 | 2.5 - 3.0 |

Tabla 1.3 Composición Química (%) de los aceros AISI 304, 304L, 316 y 316L
Fuente: Catálogo de productos en Aceros Inoxidables FLINSA [32]

Si bien los aceros inoxidable austeníticos están conformados por una gran cantidad de grados de acero, estos pueden ser clasificados en 3 grupos diferentes [21]:

- Grupo I (Aleaciones magras): como AISI 201 y 301, estos generalmente utilizados cuando el objetivo principal es una alta resistencia o alta formabilidad. La estabilidad de estas aleaciones da un gran rango de trabajo por su gran tasa de endurecimiento y gran ductilidad.
- Grupo II (Aleaciones de cromo y níquel): cuando el objetivo es resistencia a la oxidación. Elementos como carbono, nitrógeno, niobio y molibdeno pueden ser agregados, si la aplicación requiere resistencia a altas temperaturas. Aceros AISI 302B, 309, 310, 347 y varias aleaciones más, pueden ser encontrados en este grupo.
- Grupo III (Aleaciones de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno): cuando el objetivo principal es la resistencia a la corrosión. Además, elementos como el silicio y cobre son añadidos para mejorar su resistencia en ciertos ambientes

específicos. Este grupo incluye aceros AISI 316L, 317L, 904L y muchos otros más.

1.2.3 Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos son las aleaciones con mejor resistencia a la corrosión y oxidación a bajo costo existentes hoy en día. Son útiles principalmente como láminas de calibre ligero ya que su tenacidad disminuye rápidamente para secciones más pesadas. Estos aceros han crecido en uso más que cualquier otro tipo de acero inoxidable, y actualmente se considera que podría desplazar económicamente al popular pero costoso AISI 304 para muchas aplicaciones de rutina [21].

Estos aceros ferríticos se caracterizan por tener una estructura ferrítica a cualquier temperatura, ya que no presentan transformación de ferrita a austenita durante el calentamiento, ni transformación martensítica en el enfriamiento. En la Figura 1.10 se puede observar la microestructura del acero inoxidable ferrítico, la cual es una red cubica centrada en el cuerpo (BCC), con los contornos de los granos ligeramente curvilíneos.

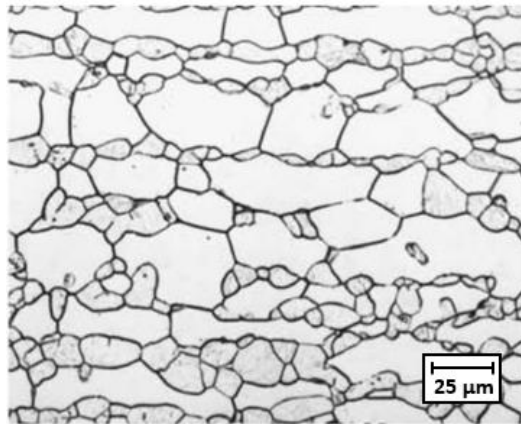


Figura 1.10 Microestructura del acero inoxidable AISI 430 recocido
Fuente: Metallography and microstructures of stainless steels and maraging steels [30]

Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre un 12% y un 18% de cromo, al igual que los aceros inoxidables martensíticos, pero por lo general su contenido de carbono es inferior al 0.08%, aunque en ocasiones puede ser de hasta 0.15%. Cabe mencionar que,

existen aceros ferríticos especiales con un contenido de cromo de hasta un 29%. Estos aceros pueden contener otros elementos tales como molibdeno (hasta 1,2%), titanio o niobio (para estabilizar su estructura) y azufre, (para mejorar la maquinabilidad). Además, para obtener una mayor resistencia se añade pequeñas cantidades de nitrógeno, entre un 0,10% y un 0,30% [24]. En la Tabla 1.4 se puede observar algunos ejemplos de los aceros inoxidables ferríticos y su composición química que tienen estos metales.

| Grado | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Nb + Ti | Mo |
|-------|------|------|------|------|------|-------------|------|----------|-------------|
| 430 | 0.12 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 0.3 | 16.0 - 18.0 | 0.75 | - | - |
| 434 | 0.12 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 0.03 | 16.0 - 18.0 | - | - | 0.75 - 1.25 |
| 436 | 0.12 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 0.03 | 16.0 - 18.8 | - | 5 x C0.7 | 0.75 - 1.25 |

Tabla 1.4 Composición Química (%) de los aceros AISI 430, 434 y 436
Fuente: Stainless Steel for Design Engineers [21]

Como se mencionó, los aceros inoxidables ferríticos presentan buena resistencia a la corrosión, en especial resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC). Por ejemplo, el acero AISI 444 tiene una buena resistencia a la corrosión, incluso llega a ser semejante al acero inoxidable austenítico AISI 316. Además, los aceros inoxidables ferrítico como el AISI 446 contiene niveles altos de cromo lo que producen que tenga una mejor resistencia a la oxidación y la ausencia de níquel le da como resultado buenas propiedades en ambientes que contienen azufre a altas temperaturas [29]. En general, los aceros inoxidables ferríticos con mayores cantidades de cromo en su composición química son los que cuentan con mayor resistencia a la corrosión y eso se puede observar en la Figura 1.11. Donde el acero inoxidable ferrítico 24CrSS con 24% de contenido de cromo presentó una menor densidad de corriente en la prueba de polarización, por ende la velocidad de corrosión que se hallará en el metal será menor.

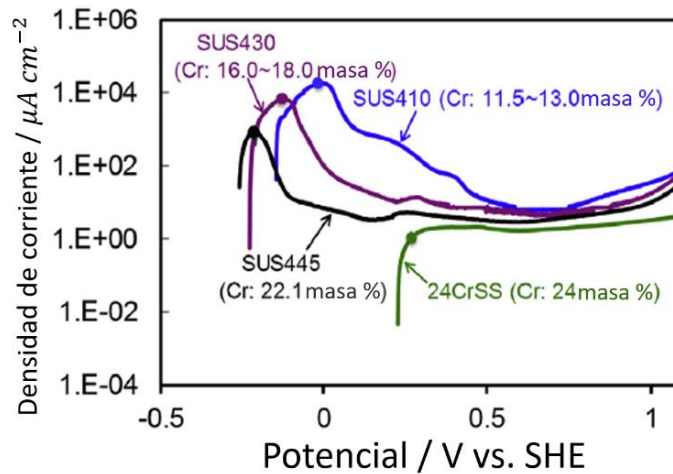


Figura 1.11 Curva de polarización de AISI 410, AISI 430, AISI 445 y 24CrSS en $0.5 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$
Fuente: Effect of chromium content on the corrosion resistance of ferritic stainless steels in sulfuric acid solution [11]

Las aplicaciones que tienen los aceros inoxidable ferríticos son muy variadas, pero generalmente estos son muy utilizados en las industrias para la fabricación de equipos. Aceros como AISI 430 y 444 están presentes en tuberías (intercambiadores de calor), recipientes y tanques de comida, industrias químicas y de papel, entre otros más. El acero AISI 444 también puede ser utilizado en aplicaciones de agua con niveles altos de cloruros, donde existe un peligro de agrietamiento por corrosión bajo tensión. Incluso, los aceros inoxidable ferríticos de baja aleación también se usan en entornos donde se busca liberarse del mantenimiento o donde se requiere un material “no oxidable” [29]

1.3 Principios electroquímicos

La electroquímica es la rama de la química, la cual estudia el uso de las reacciones químicas para producir electricidad y viceversa. Es decir, estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química [33], por ende a esta conversión se le conoce como proceso electroquímico. Por ejemplo, la fabricación de las baterías, la electrodeposición y la corrosión de metales, son procesos electroquímicos, que a la vez son considerados un conjunto de reacciones redox.

Estas reacciones electroquímicas o redox, son reacciones de oxidación-reducción, eso quiere decir que existe una transferencia de electrones entre dos zonas. Estas dos zonas están separadas físicamente, por lo que la oxidación ocurre en una parte, y la reducción, en otra. En muchas de las aplicaciones, el sistema reaccionante de oxidación-reducción está dentro de una celda electroquímica y un flujo de electrones entra o sale por los electrodos como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [33].

Este esquema muestra algunos de los términos más importantes a definir para comprender la electroquímica [34].

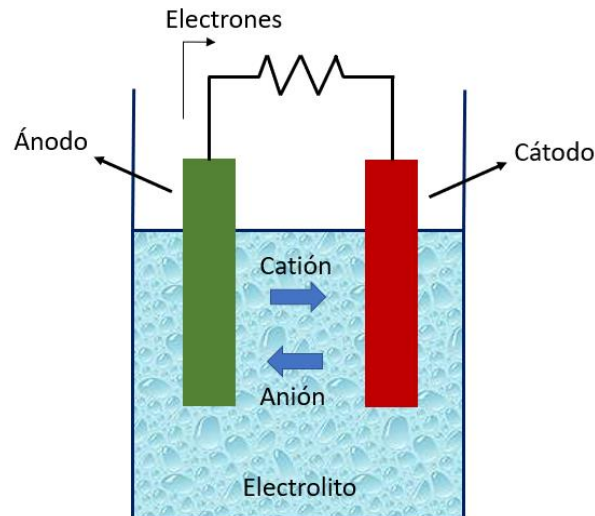


Figura 1.12 Esquema de celda electroquímica
Fuente: Elaboración propia

- Cation: especie iónica positiva que migra hacia el cátodo.
- Anión: especie iónica negativa que migra hacia el ánodo.
- Electrodo: elemento conductor de electricidad que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otro(s) electrodo(s) y una solución electrolítica.
- Ánodo: electrodo hacia donde migran los aniones y en donde ocurre el proceso de oxidación.

- Cátodo: electrodo hacia donde migran los cationes y en donde ocurre el proceso de reducción.
- Electrolito: Sustancia que contiene en su composición iones libre, que permiten la conducción de electricidad.

1.3.1 Proceso electroquímico de la corrosión

Los procesos electroquímicos de la corrosión se pueden llevar a cabo siempre cuando un metal este en contacto con un medio electrolítico, y en este metal existan dos zonas distintas bien diferenciadas: una zona que se comporte como ánodo (oxidación) y otra zona como cátodo (reducción), teniendo en consideración que entre ambas regiones es pertinente que exista alguna vía de conexión para el flujo de los electrones. A esta agrupación se le conoce como celda electroquímica o pila electroquímica.

En la zona anódica en el cual se realiza la reacción de oxidación, puede ser representada por la Ecuación 1.3, en el caso de que el metal sea acero al carbono.



Como se ve en la Ecuación 1.3, este metal libera electrones, y estos provocan la reducción de elementos iónicos disueltos en el medio. Esto quiere decir que el proceso de reducción es dependiente del medio electrolítico en el que el metal se encuentre. En el caso que el medio sea ácido, los protones de H^{+} que están en el medio captarán los electrones libres en el ánodo, produciendo una reacción de reducción, como se muestra en la Ecuación 1.4.



Aunque está reacción es la que sucede en un medio ácido, existen otros medios que no contienen protones y de igual manera promueven la oxidación del metal. Como es el

caso del agua aireada, donde ocurre la reducción del oxígeno. Dicha reacción se muestra en la Ecuación 1.5 [35].



Suponiendo un ejemplo, en el que en un medio electrolítico se sumerja un pedazo de metal, siendo una aleación, que no se compone de igual composición química y posee heterogeneidades.

Un área del material se comportará como ánodo y otra área del material como cátodo, por lo tanto, la diferencia de potencial de las diferentes fases del material provocará los procesos de reducción y oxidación. En la Figura 1.13 se detalla el proceso mencionado, ya que la composición del metal es diferente por zonas, existe una zona mayoritaria con contenido en ferrita y otra zona minoritaria con perlita. Por lo tanto, las zonas de ferrita se comportarán específicamente como ánodos en estado de oxidación, y las zonas de perlita se comportarán específicamente como cátodos en estado de reducción [35].

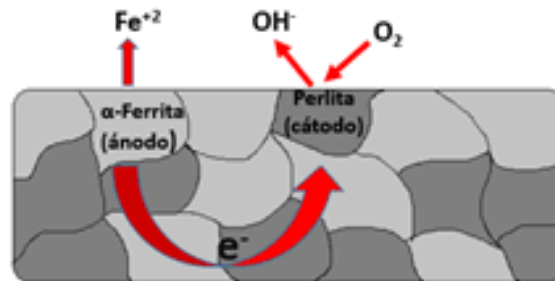


Figura 1.13 Proceso de corrosión debido a heterogeneidades (α-Ferrita y Perlita) en el material
Fuente: Estudio electroquímico de la corrosión de acero estructural [36]

1.3.2 Proceso electroquímico de la corrosión por picadura

El principal motivo por el que ocurre el proceso de corrosión por picadura en aceros inoxidables es debido al medio electrolítico, ya que algunos de estos medios (NaCl) contienen ánodos agresivos, como por ejemplo iones de cloruro. Estos ánodos agresivos tienen la propiedad de penetrar con mucha facilidad las capas de óxido del acero, formando

pequeñas celdas galvánicas con zonas catódicas y anódicas. Incluso, estos ánodos agresivos, en el proceso de propagación de la picadura interfieren con la repasivación de la capa protectora del acero [37].

El proceso de corrosión por picaduras inicia mediante la rotura de la capa pasivadora, provocando la aparición de zonas catódicas en la superficie del metal, y seguido la formación de una pila electroquímica. La zona anódica de esta pila es un área pequeña del metal y se encuentra en el interior del agujero, mientras que la zona catódica es un área considerable del metal y está cercana a la superficie. La alta diferencia de potencial de esta pila motiva a que exista un flujo considerable de corriente, y por ende una disolución rápida del ánodo. Por otra parte, la resistencia a la corrosión del metal pasivo alrededor del ánodo y el efecto de los productos de corrosión dentro de la picadura, promueven la tendencia de la corrosión a penetrar en el metal, más que a dispersarse a lo largo de la superficie [38]. En la Figura 1.14 se puede observar el proceso electroquímico de la corrosión por picaduras de un metal en una disolución salina tal como el agua de mar (NaCl).

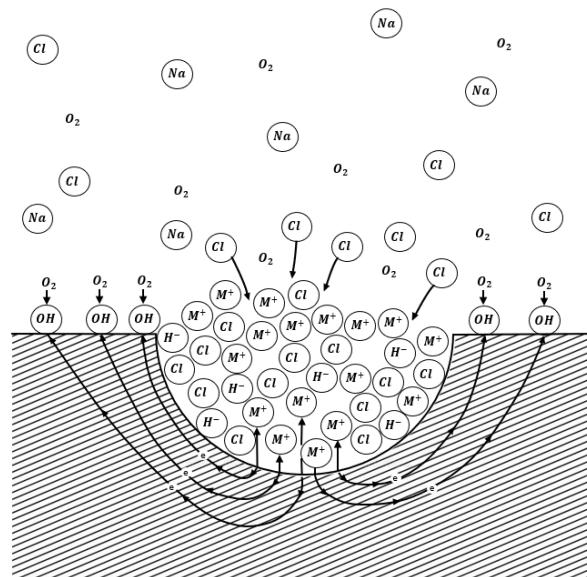
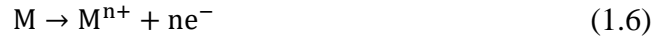


Figura 1.14 Representación esquemática de la reacción electroquímica de la corrosión por picadura en un medio que contiene NaCl

Fuente: Corrosión por picadura en una tubería de acero al carbono [38]

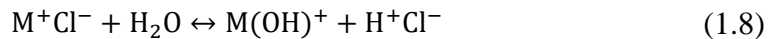
Este proceso, continua con la propagación de las picaduras mediante la disolución del metal, y el mantenimiento de un elevado grado de acidez en el fondo de la picadura, producto de la hidrólisis de los iones metálicos disueltos [38]. En la Ecuación 1.6 se muestra la reacción de la disolución anódica del metal en el fondo de la picadura.



Además, esta reacción anódica del metal se encuentra equilibrada por la reacción catódica en la superficie adyacente (véase en la Ecuación 1.7).



Por otro lado, el aumento de la concentración de iones M^{n+} en el interior de la picadura determina la migración de iones cloruro (Cl^{-}) hacia dicha zona. con el fin de mantener la neutralidad electroquímica. Una vez formado el cloruro metálico ($M^{+}Cl^{-}$), este pasa por un proceso de hidrolizado por el agua, y forma dos compuestos: hidróxido y ácido libre como se observa en la reacción de la Ecuación 1.8 [38].



Este acido formado provoca una disminución del pH (aproximadamente 1.0 a 1.5) en el interior de la picadura, mientras que el resto de la solución permanece con un pH neutral, provocando que en el fondo de la picadura se pierda la pasivación y que el proceso de picado continúe [38].

Si se tiene en cuenta la duración de la picadura, esta puede ser dividida en tres etapas: iniciación, propagación y repasivación [39].

En la etapa 1, la picadura se nuclea y forma una película de sal no protectora compuesta de cationes de un metal disuelto y aniones agresivos concentrados con una gran conductividad iónica en el interior de la superficie de picado. Esta película de sal no

protectora, proporciona una alta capacidad para la disolución del metal, principalmente en la etapa 2.

En la etapa 2, ocurre el proceso de propagación o crecimiento de la picadura. En esta etapa suceden dos tipos de procesos: difusión y electromigración, ambos procesos dan como resultado una migración de los iones (cationes y aniones) en el medio electrolítico. Cabe mencionar que, la reacción del crecimiento de la picadura, que incluye ambos procesos mencionados, se debe a la diferencia de potencial de dos zonas de la picadura.

En la etapa 3, la velocidad de repasivación en la superficie de picado aumenta considerablemente, por ende, la capacidad de disolución en la superficie del metal decrece. Este aumento de la repasivación mencionado, se relaciona generalmente al incremento de la velocidad de formación de la película de óxido, la cual sustituirá a la capa no protectora formada en la etapa 1.

1.4 Pasivación

Se dice que un metal es pasivo, si este es sustancialmente resistente a la corrosión, por largos periodos de tiempo, en un medio donde existen condiciones para que reaccione [40]. Por ejemplo, los aceros inoxidable pasan por un proceso de pasivación, ya que forman una película superficial muy delgada e invisible en entornos oxidantes, lo que les permite tener una buena resistencia a la corrosión. Esta película es un óxido que protege al acero del ataque en un entorno agresivo y que puede pasar por un proceso de repasivación autónoma en caso de que esta capa sea dañada [29]. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar como la capa de óxido de cromo de un acero inoxidable ha sido dañado por un mecanizado y este automáticamente vuelve reformarse.

En general, a los aceros a medida que se agrega cromo, se observa una reducción rápida en la tasa de corrosión de alrededor del 10%, debido a la formación de esta capa protectora o película pasiva. Para obtener una película pasiva compacta y continua, se

requiere un contenido de cromo de al menos 11%. La pasivación aumenta con bastante rapidez al aumentar el contenido de cromo hasta aproximadamente un 17% de cromo. Esta es la razón por la cual muchos aceros inoxidable contienen 17-18% de cromo [29].

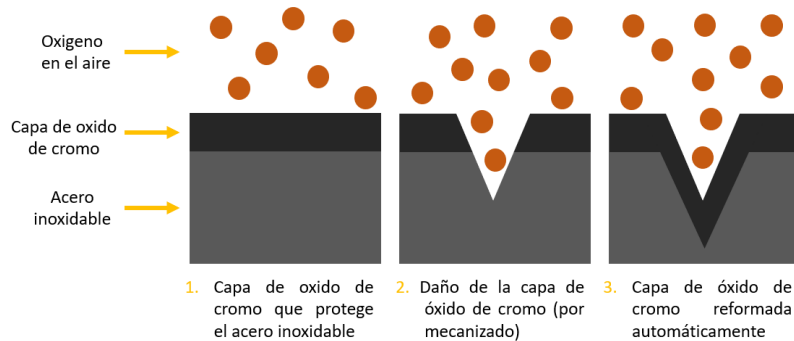


Figura 1.15 Pasivación del acero inoxidable

Fuente: Elaboración propia

1.4.1 Diagrama de Pourbaix

Los diagramas de Pourbaix son gráficos que relacionan el potencial y el pH para un metal determinado en condiciones generales termodinámicas (25°C) [41]. Estas representaciones gráficas declaran para que condiciones de Potencial y pH el metal presenta inmunidad, corrosión o pasividad [32]. Además, es necesario tener en cuenta que los diagramas de Pourbaix son generados a partir de ciertos cálculos realizados con la ecuación de Nernst [42].

El diagrama de Pourbaix se puede dividir en tres regiones de condición en base al medio (pH) en el que las reacciones ocurren y en función del potencial (ver Figura 1.16) [43]. Estas regiones se detallan a continuación:

- Región de estabilidad o inmunidad del metal, es la zona en la cual el metal no reacciona y se mantiene invariable a potenciales bajos y en todos los rangos de pH. (zona azul),
- Región de corrosión, es la zona en la que se encuentran los iones del Fe, lo cual explica que el Fe ha experimentado oxidación. (zona verde),

- Región de pasivación, es la zona en la que se han formado óxidos, consecuentes de la corrosión y que recubren al metal. (zona naranja),

Cabe resaltar, que si bien, estos diagramas de Pourbaix suministran la interpretación de los estados de condición basados en fundamentos termodinámicos, no se recomienda su uso para la elaboración de predicciones, ya que, al basarse en fundamentos termodinámicos, no considera la cinética de los fenómenos [44].

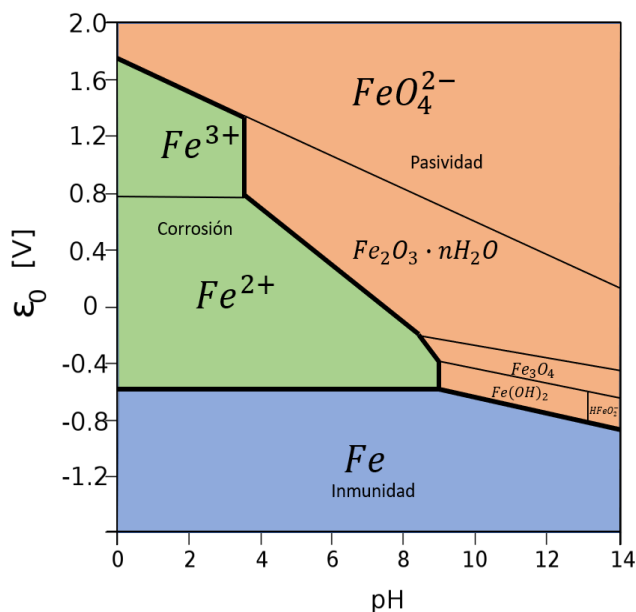


Figura 1.16 Diagrama de Pourbaix del hierro a 25°C
Fuente: Elaboración Propia

1.4.2 Curva de polarización

La curva de polarización representa la cinética básica para cualquier tipo de reacción electroquímica. Estas curvas se realizan para una combinación específica de electrodo-electrolito, y se representan en un gráfico de densidad de corriente (i) vs potencial de electrodo (E). Por lo general, para una mejor interpretación de esta gráfica, estas muestran la densidad de corriente en una escala logarítmica ($\log |i|$ vs E) [45].

Las curvas de polarización son valiosas para cuantificar los comportamientos de los metales en diversas condiciones. Además, para sistemas donde ocurran procesos de pasivación se pueden mostrar las transiciones activas/pasivas y/o pasivas/transpasivas. En la siguiente Figura 1.17 se puede observar el trazo típico y los parámetros característicos de la curva de polarización.

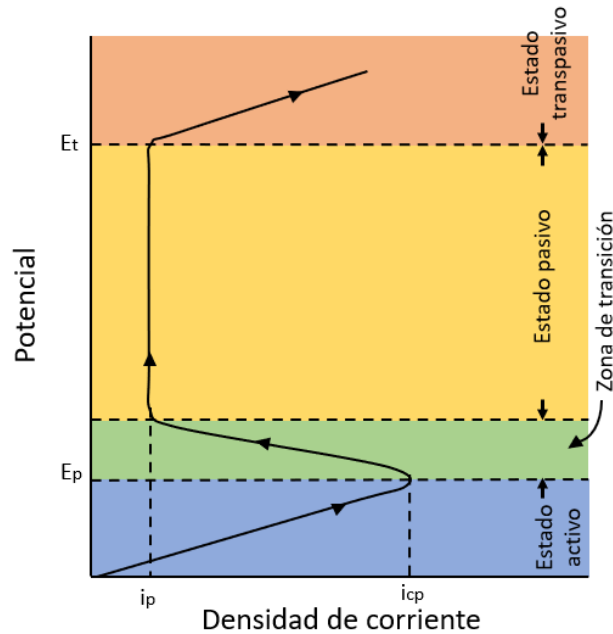


Figura 1.17 Curva esquemática de polarización anódica de metales pasivables
Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la región activa se encuentra a potenciales por encima del potencial de corrosión (E_{corr}), donde el metal se disuelve en forma anódica, presentando un aumento en la densidad de corriente. (zona azul)

Al seguir aumentando el potencial y se alcanzó el valor de potencial de pasivación E_p , la densidad de corriente cae rápidamente a un valor muy pequeño. Esta pequeña región se le conoce como la zona de transición (zona verde). Cabe mencionar, que potencial de pasivación E_p y la densidad de corriente crítica de pasivación i_{cp} , varía para cada sistema metal/medio. Cuando la curva anódica llega al valor de densidad de corriente i_p , comienza la zona o región pasiva, la cual es de una magnitud muy inferior a i_{cp} . Este valor de

densidad de corriente i_p en todo este amplio rango de potenciales, permanece casi constante y tan solo presentando pequeñas variaciones. (zona amarilla)

Por último, a potenciales muy positivos, específicamente a partir del valor E_t , la densidad de corriente crece a medida que se eleva el potencial. Ese es el momento en el que comienza la región transpasiva. (zona naranja)

Por otro lado, existen parámetros que pueden influir en los valores críticos de la transición de los estados: activo, pasivo y transpasivo, como: las condiciones del medio ambiente, características intrínsecas del material, aumento de acidez y temperatura [46]. Un ejemplo de ello, se puede observar en la Figura 1.18, el cual muestra un esquema del efecto de los elementos de aleación (Cr, Mo, Ni, entre otros) usados en aceros inoxidable, en los valores críticos de la curva de polarización.

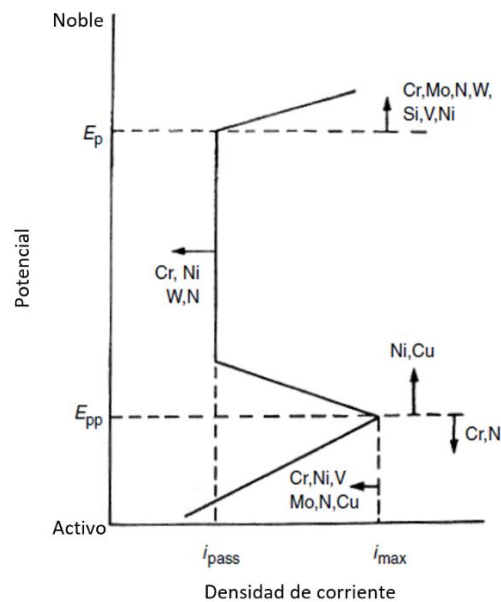


Figura 1.18 Efecto de elementos de aleación de aceros inoxidables en el comportamiento corrosivo
Fuente: NACE [47]

1.5 Técnicas electroquímicas

Usualmente una gran cantidad de procesos de corrosión son de condición electroquímica, en el cual sucede una formación y un traslado de flujo de electrones. Este proceso de flujo de electrones nos permite evaluar la condición y la velocidad de corrosión de la especie, realizando una medición su densidad corriente de corrosión (i_{corr}), ya que estos son parámetros son proporcionales. En general, este es el principio que se utiliza en los procesos electroquímicos cuantitativos y cualitativos para el control y estudio de la corrosión en los metales [48].

Por lo tanto, teniendo en cuenta que para el análisis de la corrosión se precisan de estas técnicas electroquímicas. Los dos parámetros que se requiere para caracterizar una reacción electroquímica son: el potencial y la corriente [48].

Además, es necesario conocer que para realizar el proceso experimental que siguen las técnicas electroquímicas, es importante contar con un potencióstato o galvanostato, que permitan realizar variaciones del potencial y así poder llevar a cabo la medición de la corriente. Este potencióstato va conectado a una celda electroquímica que contiene tres tipos de electrodos: el electrodo de trabajo (ET), el electrodo de referencia (ER) y el electrodo auxiliar o contraelectrodo (EA) [48].

1.5.1 Teoría del potencial mixto

La teoría del potencial mixto fue postulada en 1938 por Wagner y Traud, con la finalidad de poder predecir la velocidad de corrosión que presentaban los metales y aleaciones. Esta teoría se basa en dos supuestos [49]:

- Toda reacción electroquímica siempre está compuesta de dos o más reacciones anódicas y catódicas parciales.
- En una reacción electroquímica no puede existir ninguna acumulación de cargas.

El principio de conservación de la carga indica que, para evitar la acumulación de carga en un electrodo sumergido libremente, la suma de todas las corrientes de oxidación (i_a) debe ser igual a la suma de todas las corrientes de reducción (i_c). Por ejemplo, cualquier electrodo sumergido en un ambiente corrosivo, tiene un potencial llamado potencial de corrosión, en cual se cumple la Ecuación 1.9.

$$\sum i_a + \sum i_c = 0 \quad (1.9)$$

El potencial de corrosión también se llama potencial de circuito abierto, potencial libre o potencial de reposo. El potencial de corrosión es un potencial mixto, esto quiere decir que su valor depende tanto de la velocidad de las reacciones anódica como catódica. Esto se puede visualizar en el diagrama de Evans de la Figura 1.19. En este diagrama se presentan las ramas anódicas y catódicas para la reacción del hidrógeno y para un metal con un potencial reversible inferior a la de la reacción de hidrógeno [49].

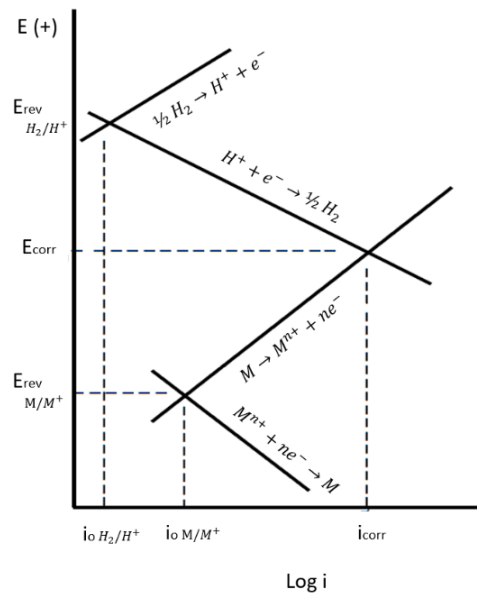


Figura 1.19 Diagrama de Evans de un proceso de corrosión de un metal en un medio ácido
Fuente: Elaboración propia

Las densidades de corriente de oxidación y reducción, serán iguales en el punto en que la línea anódica de la reacción de disolución del metal corta la línea catódica de la evolución de hidrógeno. El potencial en que estas líneas se cruzan es el potencial de

corrosión, el cual toma siempre un valor entre los potenciales reversibles para las dos reacciones parciales. El potencial de corrosión y la densidad de corrosión pueden cambiar con el tiempo si la superficie o solución cambian [49] .

El potencial de corrosión también se puede ilustrar en un gráfico de $i-E$ como se muestra en la Figura 1.20, el cual presenta dos curvas que representan la ecuación de Butler-Volmer para la reacción del metal e hidrógeno. El punto en que la velocidad de disolución del metal es igual a la velocidad de evolución de hidrógeno es el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión corresponde a la distancia en la curva del metal o del hidrógeno a ese potencial [49].

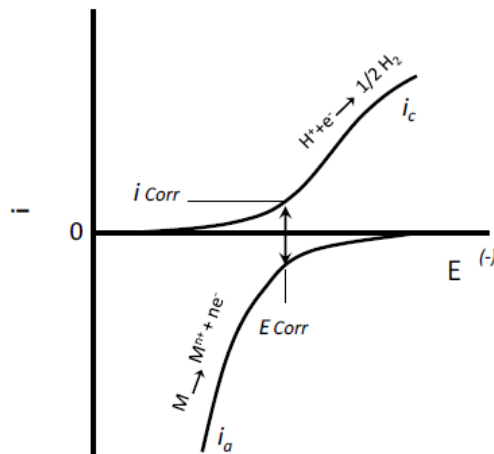


Figura 1.20 Representación en ejes lineales de la cinética de corrosión de un metal en medio ácido
Fuente: Estudio de la corrosión de acero al carbono y su dependencia con la rugosidad del material [49]

1.5.2 Ecuación de Butler - Volmer

Todas las técnicas electroquímicas que nos ayudan a estudiar las reacciones de oxidación-reducción, que se originan en el proceso corrosivo de la superficie de un metal cuando es expuesto a un medio electrolítico, están basados en la ecuación de Butler-Volmer. Esta ecuación nos da un sentido físico de las reacciones de transferencia de carga y una interpretación de los parámetros dependientes del valor de la densidad de corriente, que fluye sobre la superficie del metal. En la Ecuación 1.10 se muestra dicha ecuación [36].

$$i = i_{\text{corr}} \left\{ \exp \left(\frac{\alpha n F \eta}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{\beta n' F \eta}{RT} \right) \right\} \quad (1.10)$$

Dónde:

η = Sobrepotencial de polarización ($E - E_{\text{corr}}$) (V)

i = Densidad de corriente que fluye debido al potencial externo aplicado (Amperios)

i_{corr} = Densidad de corriente de corrosión (Amperios/cm²)

F = Constante de Faraday 96500 (C/mol)

R = Constante universal de los gases ideales (8.31 J/mol-°K)

T = Temperatura (°K)

$n - n'$ = Número de electrones transferidos en la reacción anódica y catódica

α y β = Coeficientes de transferencia que relacionan el potencial a través de la doble capa electroquímica.

Los términos $\exp \left(\frac{\alpha n F \eta}{RT} \right)$ corresponden a la corriente anódica y $-\exp \left(- \frac{\beta n' F \eta}{RT} \right)$ corresponde a la corriente catódica.

El uso de la ecuación de Butler-Volmer en su forma general, es difícil de tratar, es por ello que para el cálculo de la densidad de corriente (i_{corr}) se utilizan dos aproximaciones. La aproximación a campo bajo o también llamada resistencia a la polarización y la aproximación a campo alto conocida también como aproximación de Tafel [36].

1.5.3 Resistencia a la polarización

La técnica de resistencia a la polarización o polarización a bajo campo, es una relación entre voltaje y la corriente que transita en la interfase del metal en rangos de voltaje de -20 mV hasta +20mV con respecto al potencial corrosivo [36].

A partir de la Ecuación 1.10 y suponiendo valores muy bajos de sobrepotencial, es decir muy próximos al equilibrio, dicha expresión toma la forma de la Ecuación 1.11, teniendo en cuenta que si $x \rightarrow 0$, $e^x = 1+x$ y $e^{-x} = 1-x$, la Ecuación 1.10 se reduce a:

$$i = i_{\text{corr}} \left(\frac{\alpha n F}{RT} + \frac{\beta n' F}{RT} \right) \eta \quad (1.11)$$

$$i = i_{\text{corr}} \left(\frac{1}{B_a} + \frac{1}{|B_c|} \right) 2.3 \eta \quad (1.12)$$

$$i = i_{\text{corr}} \left(\frac{1}{B_a} + \frac{1}{|B_c|} \right) 2.3 \eta \quad (1.13)$$

$$i = i_{\text{corr}} \left(\frac{B_a + |B_c|}{B_a \times |B_c|} \right) 2.3 \eta \quad (1.14)$$

Donde: B_a y B_c son las pendientes obtenidas de las rectas de la corriente anódica y catódica respectivamente.

$$B_a = \frac{2.3RT}{\alpha n F} \quad \text{y} \quad |B_c| = \frac{2.3RT}{\beta n' F} \quad (1.15)$$

Del valor de las pendientes de las curvas de polarización anódica y catódica se obtiene la Ecuación 1.16:

$$\text{pendiente} = \frac{\eta = \text{voltios}}{i = A/\text{cm}^2} = R_p = \frac{\Omega}{\text{cm}^2} \text{ (resistencia de polarización)} \quad (1.16)$$

Siendo la densidad de corriente de corrosión igual a la Ecuación 1.17 [50]:

$$i_{\text{corr}} = \left(\frac{1}{2.3 R_p (B_a + |B_c| / B_a \times |B_c|)} \right) \quad (1.17)$$

1.5.4 Extrapolación de Tafel

Julius Tafel utilizó la ecuación de Butler-Volmer en forma semilogarítmica, aplicando polarizaciones con mayor amplitud al electrodo de trabajo (ET). Ha este aumento

de potencial se le llama como (sobrepotencial o polarización a campo alto) que oscila entre los -250 mV a +250 mV con respecto al potencial de equilibrio [51].

Cuando se aplica una polarización anódica de región o dominio Tafeliano, el potencial corresponde a $\eta \gg \frac{\beta n' F \eta}{RT}$, por lo tanto la Ecuación 1.10 de Butler-Volmer se convierte en la Ecuación 1.18, que se puede representar también según la Ecuación 1.19:

$$i_t = i_{\text{corr}} \left[\exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \right] \quad (1.18)$$

$$\eta = \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i_{\text{corr}} + \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i_t \quad (1.19)$$

De igual manera para la polarización catódica $\eta \ll \frac{\beta n' F \eta}{RT}$ se obtienen las Ecuaciones 1.20 y 1.21.

$$i_t = i_{\text{corr}} \left[-\exp\left(\frac{\beta n' F \eta}{RT}\right) \right] \quad (1.20)$$

$$\eta = \frac{2.3RT}{\beta n' F} \log i_{\text{corr}} - \frac{2.3RT}{\beta n' F} \log |i_t| \quad (1.21)$$

Las Ecuaciones 1.19 y 1.21 son las llamadas rectas de Tafel, y estas ecuaciones tienen la forma general de una recta $y = m \cdot x + c$, esto se muestra en la Ecuación 1.22.

$$\eta_a = c + a \cdot \log |i_t| \quad \text{y} \quad \eta_c = c + b \cdot \log |i_t| \quad (1.22)$$

Donde a y b representa el valor de la pendiente anódica y catódica.

$$a = \frac{2.3RT}{\alpha F} \quad \text{y} \quad b = -\frac{2.3RT}{\beta F} \quad (1.23)$$

Estas ecuaciones de las rectas de Tafel son representadas en un diagrama como el mostrado en la Figura 1.21, el cual permite una extrapolación geométrica para obtener la

densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), realizando un trazado de rectas tangentes a cada una de las curvas de polarización.

El punto de intercepción de ambas líneas rectas, nos proporciona el valor de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) o la corriente de intercambio en el equilibrio (i_o) del sistema. Además de estos datos electroquímicos se obtiene el potencial de corrosión (E_{corr}), las pendientes anódicas (a) y catódicas (b), que nos ayudarán a realizar un estudio cuantificable del deterioro del material.

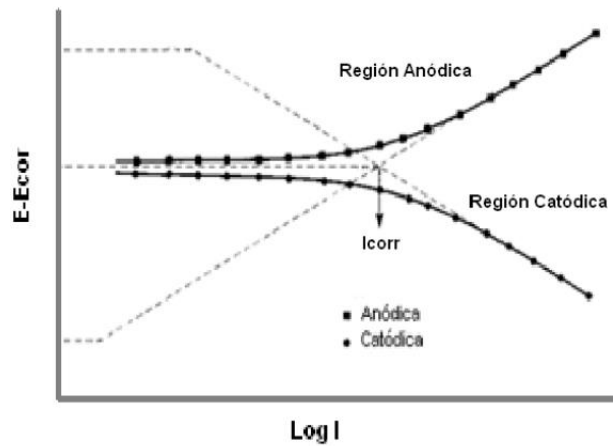


Figura 1.21 Representación de una curva de polarización con extrapolación de Tafel
Fuente: Evaluación de la velocidad de la corrosión mediante técnicas electroquímica [48]

1.5.5 Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión de una prueba de polarización potenciodinámica, se obtiene a partir de la densidad de corriente (i_{corr}), el cual se consigue aplicando cualquiera de las dos técnicas electroquímicas: extrapolación de Tafel o resistencia a la polarización. Con la aplicación de la ley de Faraday, esta densidad de corriente nos permite calcular la velocidad de corrosión uniforme como se muestra en la Ecuación 1.24.

$$CR = K1 \cdot i_{corr} \cdot \frac{EW}{\rho} \quad (1.24)$$

Donde:

CR = Velocidad de corrosión (mm/año)

$K1 = 3.27 \times 10^{-3}$ (mm g/ μ A cm año)

EW = peso equivalente del espécimen

ρ = densidad del material (g/cm³)

i_{corr} = densidad de corriente de corrosión (μ A/cm²)

1.5.6 Polarización cíclica

Uno de los métodos comúnmente usados para determinar la susceptibilidad al picado de aleaciones, es la Polarización Cíclica descrita por la norma ASTM G-61. Este método nos permite determinar el Potencial de Picado (E_{pic}) y el Potencial de Protección (E_{prot}), por medio de un barrido cíclico de un electrodo, mientras se monitorea la variación de densidad de corriente del proceso [39].

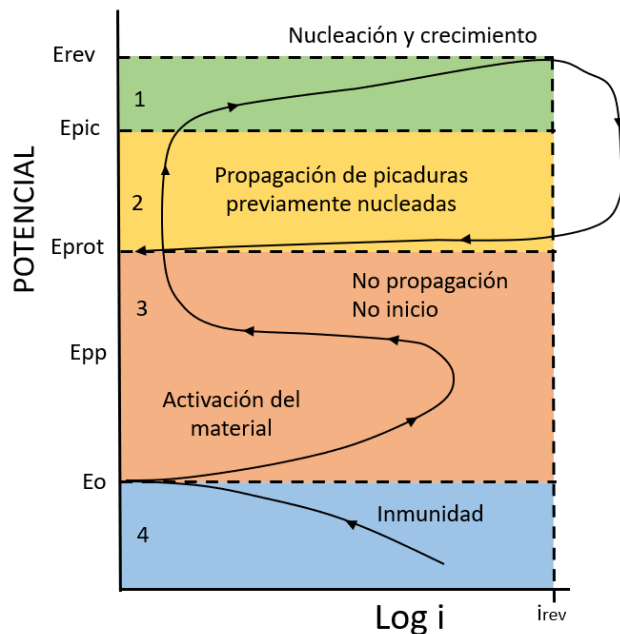


Figura 1.22 Gráfica de polarización cíclica
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1.22 se muestra el diagrama de una polarización cíclica estándar, mostrando algunas de las regiones más importantes de esta curva potenciodinámica, las cuales nos permiten dar las siguientes interpretaciones [39].

- A potenciales más positivos o nobles que el potencial de picadura (E_{pic}), se pueden nuclear y propagar nuevas picaduras. Además, las picaduras existentes pueden continuar propagándose. (zona verde)
- Entre el potencial de picadura (E_{pic}) y el potencial de protección (E_{prot}) existen picaduras que continúan propagándose, pero no se pueden iniciar nuevas picaduras. (zona amarilla)
- A potenciales más negativos o activos que el potencial de protección (E_{prot}), ninguna picadura puede nuclearse o propagarse. (zona naranja)
- A valores más negativos que el potencial de corriente cero (E_o), se encuentra la región de inmunidad. En esta región existe una resistencia a la corrosión o a la disolución anódica debido a la estabilidad termodinámica del metal. (zona azul)

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta información relevante sobre la investigación y el procedimiento experimental que sigue en esta presente tesis. En primer lugar, se explica el tipo y enfoque que tiene la investigación, y se continua con las fuentes y técnicas de recolección de la información. Posteriormente, se plantea las variables y el diseño experimental del estudio. Por último, se menciona los materiales y el procedimiento detallado de cada fase de este estudio.

2.1 Tipo y Enfoque de la investigación

Según Roberto Sampieri [52], la investigación experimental se define como: el estudio el cual se manipula, de manera intencional, una o más variable independientes (causas), para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos). Dado que esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de la resistencia a la corrosión, el cual cuenta con variables independientes (medio y temperatura), las cuales son manipuladas con el fin de determinar las variables dependientes (velocidad de corrosión), se puede concluir que esta investigación es de tipo experimental.

Además, el enfoque de esta investigación es de tipo cuantitativo, ya que este estudio utiliza la recolección de datos, mediante pruebas de polarización potenciodinámicas que proporcionan valores como la velocidad de corrosión y potenciales de corrosión, los cuales son valores medibles. Todas estas mediciones numéricas y análisis de los datos, se realizan con el fin de establecer patrones del comportamiento corrosivo de los aceros en estudio.

2.2 Fuentes y Técnicas de recolección de información

Dentro de esta investigación existen tanto fuentes primarias como secundarias. Las fuentes primarias, son un tipo de fuente que contienen información original, es decir son primera mano, son el resultado de ideas, conceptos, teorías y resultados de investigaciones. En cambio, las fuentes secundarias son las fuentes que ya han procesado información de alguna fuente primaria. El proceso de esta información se pudo dar por una interpretación, un análisis o extracción de información de una fuente primaria [52].

Dado que esta investigación sobre el comportamiento corrosivo, es de tipo experimental, todo el proceso de las pruebas potenciodinámicas realizadas están comprendidas bajo normas ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), consideradas fuentes primarias. En las cuales, se indican los parámetros de consideración para el proceso de realización de pruebas potenciodinámicas, tanto para la caracterización del material, pruebas de resistencia a la polarización, prueba de polarización cíclica y la determinación de la velocidad de corrosión.

Sin embargo, las fuentes utilizadas en el marco teórico en su mayoría han sido de fuentes secundarias, investigaciones publicadas en revistas o tesis de maestría y doctorales, ya que lo que se busca es obtener la información más actual y que pueda explicar de manera concisa los fundamentos teóricos que se requieren para esta investigación.

Cabe mencionar que la técnica de recolección de datos de esta investigación, será mediante una observación experimental, el cual nos permite registrar los datos en la base del software de pruebas electroquímicas y posteriormente, graficar las curvas potenciodinámicas de cada uno de ellas.

2.3 Variables de la investigación

Las variables fundamentales que se tienen que tener en cuenta para realizar una prueba de polarización potenciodinámica, está relacionado con los factores que controlan la

ocurrencia de un proceso de corrosión. Es por eso que estas variables de este estudio fueron recopiladas de diferentes libros y estudios de diferentes autores, pero en especial del libro ASTM: Pruebas de corrosión y estándares [53]. Dentro de ellas se definieron dos tipos de variables: las controlables y no controlables. Con respecto a las variables no controlables tenemos: temperatura, rugosidad de la superficie, agitación y presión. Por otro lado, tenemos la variable controlable: medio ácido. Esta última variable mencionada será alterada en este estudio con el fin de analizar las variables de salida, las cuales definen el comportamiento corrosivo. Todas estas variables pueden ser visualizadas en el diagrama de la Figura 2.1.

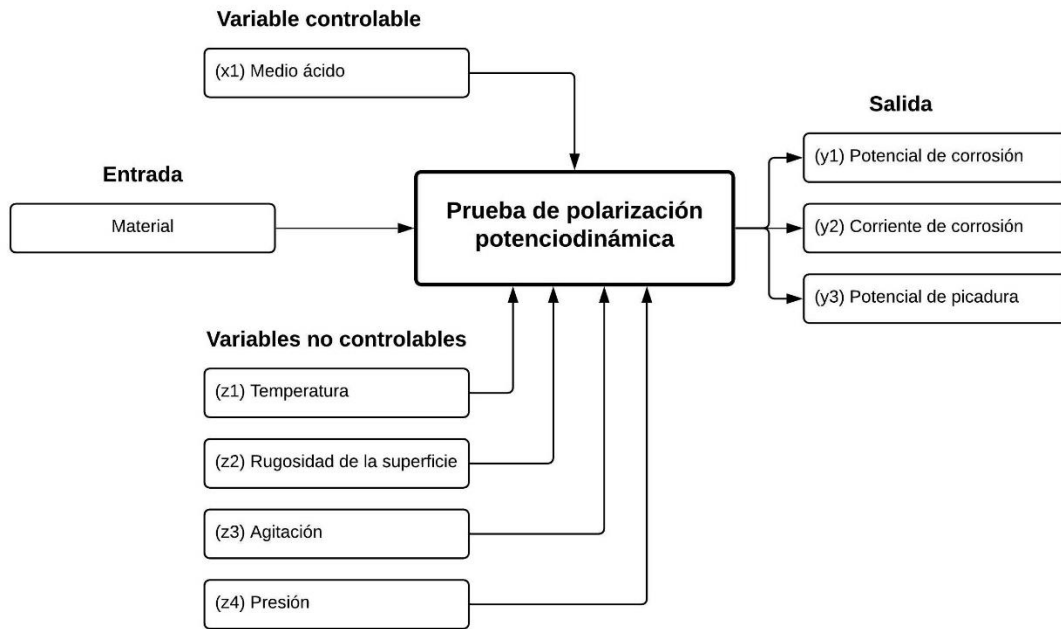


Figura 2.1 Diagrama de variable controlable, no controlables, entrada y salida de la prueba de polarización potenciodinámica
Fuente: Elaboración propia

2.4 Diseño experimental

El diseño experimental de esta investigación, está basado en un diseño factorial, ya que se estudia el efecto de las variables controlables sobre las respuestas de salida. Este diseño factorial nos permite determinar una combinación de niveles de los factores

(variables controlables) en la que el desempeño del proceso sea mejor [54]. El diseño experimental más adecuado para este estudio es el diseño factorial mixto 2 x 2, ya que cuenta con dos factores y cada uno ellos con dos niveles: alto y bajo. El factor material, cuenta con dos niveles que indican los tipos de aceros inoxidable AISI: 316L y 430, así mismo el factor A de concentración de cloruro de sodio (NaCl) cuenta con 2 niveles: 3.5% y 3.0%. A cada uno de estos niveles se les asignó una codificación, como se muestra en la Tabla 2.1.

[45]

| Nivel | Codificación | Material | Factor A |
|-------|--------------|--------------------------|------------------------------|
| | | Acero Inoxidable AISI | Concentración de NaCl (%) |
| Alto | 1 | 316L | 3.5 |
| Bajo | -1 | 430 | 3.0 |

Tabla 2.1 Codificación del material y factor A de acuerdo al nivel
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar, que los valores de concentración de cloruro de sodio (NaCl) tomadas para este estudio fueron basados en diversas literaturas, los cuales sugieren que en la concentración de 3.5 % de NaCl existe mayor indicio de picadura, luego de una inmersión de 6 horas [55]. Por lo tanto, para este estudio se tomó los dos niveles anteriormente mencionados, ya que este rango nos permitirá realizar una correcta evaluación del comportamiento corrosivo de los dos aceros inoxidable. Por otro lado, la temperatura utilizada para las pruebas, está basada en la norma ASTM la cual establece que este tipo de pruebas potenciodinámicas deben de realizarse a una temperatura ambiental. En el caso de este estudio esa temperatura fue de: 25 ± 1 °C.

Con la codificación establecida en la Tabla 2.1, se puede obtener la Tabla 2.2 con las 4 combinaciones totales que se tienen que realizar para obtener los resultados. Además, ya que cada prueba se realizará por duplicado, esto nos daría un total de 8 ensayos.

| N° de Prueba | Material | Factor A |
|--------------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | -1 |
| 3 | -1 | 1 |
| 4 | -1 | -1 |

Tabla 2.2 Diseño experimental del estudio
Fuente: Elaboración propia

Por último, esta investigación se dividió en cinco fases, las cuales están orientadas en los objetivos que se plantearon en un comienzo. Este proceso general se muestra en la Figura 2.2, el cual comienza con la caracterización de los materiales y concluye con el análisis superficial de las muestras.

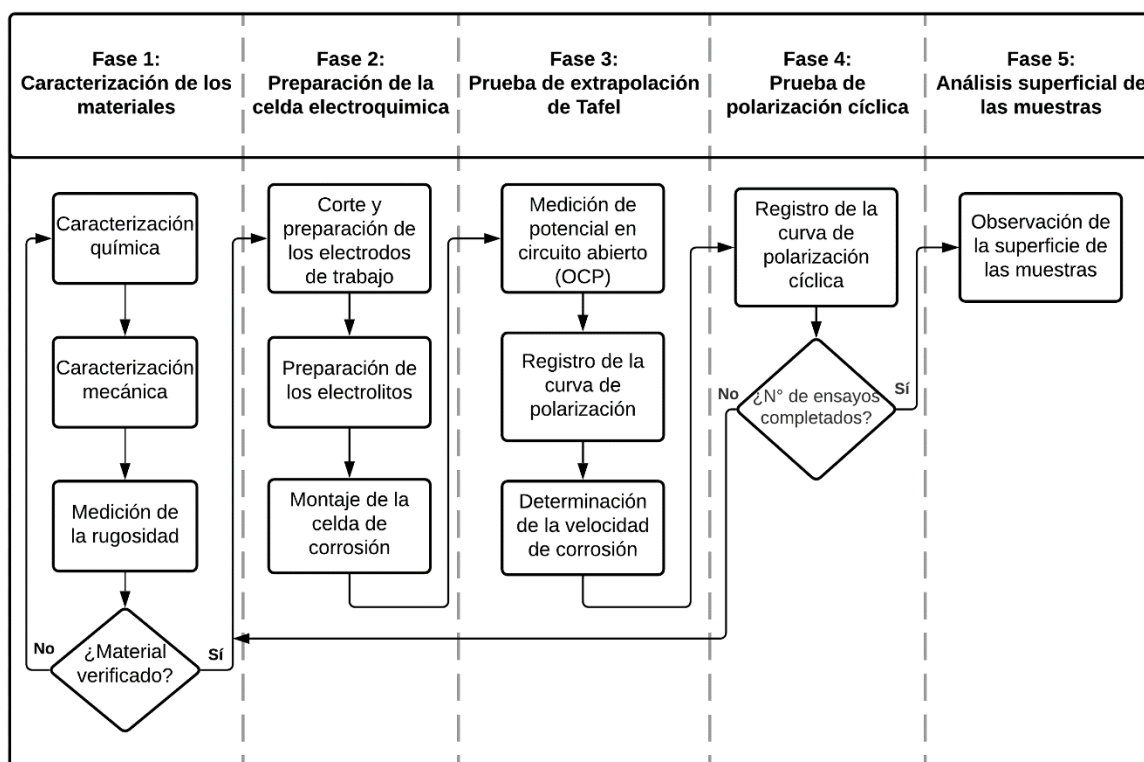


Figura 2.2 Proceso general de la investigación
Fuente: Elaboración propia

2.5 Equipos

A continuación, se muestran los materiales y equipos que han sido considerados para la realización de esta investigación, mencionando sus principales características e información más importantes de estos componentes.

2.5.1 Electrodo

Todas las celdas electroquímicas que son utilizadas para realizar pruebas potenciodinámicas cuentan con tres tipos de electrodos [49]. Los electrodos que se van utilizar en esta investigación se muestran en la Figura 2.3, los cuales están colocados con su portaelectrodo respectivo, son los siguientes:

- Electrodo de trabajo (ET), es el electrodo principal en el cual ocurre la reacción de estudio, ya sea una oxidación o una reducción. En este estudio, estos electrodos de trabajo son los siguientes aceros inoxidable: AISI 316Ly AISI 430.
- Electrodo de referencia (ER), es el electrodo con respecto al cual se mide el potencial aplicado en el sistema. Para este estudio se utilizará un electrodo de referencia del material cloruro de plata ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{(\text{sat})}$), el cual es recomendado y se contaba con disponibilidad de ello.
- Electrodo auxiliar o contraelectrodo (EA), es el electrodo en el cual suceden las reacciones electroquímicas contrarias a aquellas que ocurren en el electrodo de trabajo. Idealmente estos electrodos auxiliares deben de permitir la degradación del electrolito sin la participación del material, por esto estos electrodos debe ser de un material químicamente inerte al medio, por lo general de platino, oro o grafito. En este estudio se optó por el titanio platinizado, ya que es más accesible y tiene un buen rendimiento.

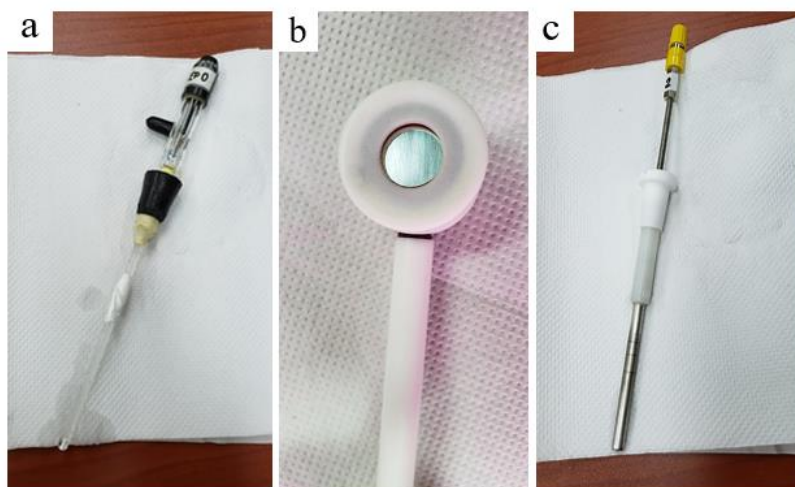


Figura 2.3 Electrodo de referencia (a); electrodo de trabajo (b); electrodo auxiliar (c)
Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Potenciostato

El potenciostato es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica colocada en una solución electrolítica, un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia. El potenciostato implementa este control mediante la inyección de corriente dentro de la celda a través del electrodo auxiliar (EA) [57]. Este equipo es fundamental para el desarrollo de esta investigación, y por ello es que se utilizará un potenciostato AUTOLAB Metrohm (modelo PGSTAT 302N), el cual es de alta gama y se encuentra equipado con el software NOVA version 2.1.4. En la Figura 2.4 se muestra el potenciostato mencionado.

En general, para este estudio el potenciostato tiene como tarea principal medir el flujo de corriente entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar, siendo el potencial de celda la variable controlada en el potenciostato y la corriente de la celda la variable medida [57].

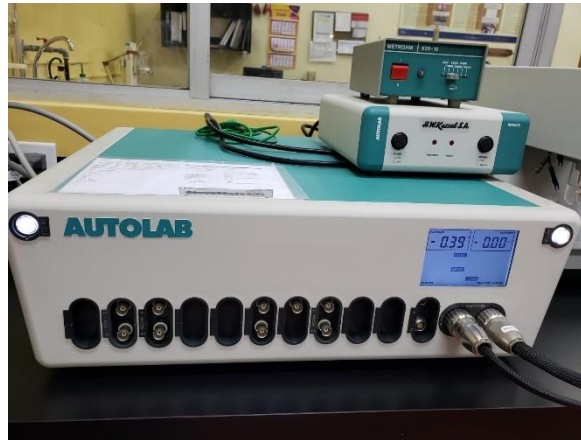


Figura 2.4 Potenciostato AUTOLAB Metrohm
Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Rugosímetro

Los rugosímetros son instrumentos que son utilizados para medir y detectar el grado de aspereza presente en las superficies de un metal, información que es entregada o expresada en micras (μ). La medición de la pieza puede realizarse en tres etapas: antes, durante o después de un proceso. Por ejemplo, para este estudio ya que las planchas de acero inoxidable han pasado por un proceso de laminado se debe de medir la pieza terminada, con el fin de controlar el acabado final [59]. En la Figura 2.5 se muestra el rugosímetro de modelo Mitutoyo SJ-210, el cual se utilizará para esta investigación.

Este instrumento funciona de una manera muy sencilla, el palpador que se encuentra en la punta, que por lo general es de diamante o carburo de tungsteno, realiza un barrido en forma de línea recta sobre la superficie que se quiera analizar, en este caso los aceros inoxidables. Mientras que realiza esta acción, las variaciones que pueda tener el material son transformadas en señales eléctricas siendo registradas o graficadas. Es necesario tener en cuenta, que por lo general el rango en el palpador recoge la muestra es de 0.08 mm a 25.0 mm (0.003 a 1 pulg). [59]

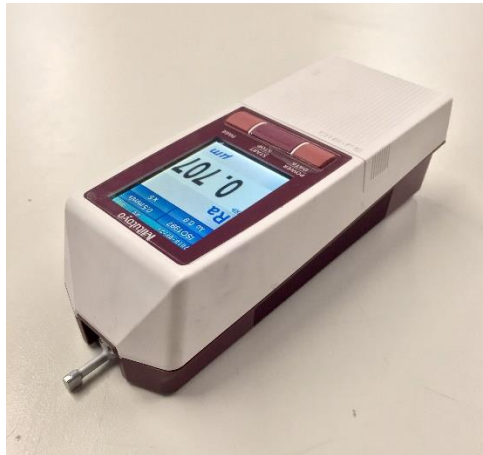


Figura 2.5 Rugosímetro Mitutoyo SJ-210
Fuente: Elaboración propia

2.5.4 Otros equipos

A parte de los materiales mencionados, se utilizarán los siguientes artículos para las pruebas:

- Espectrómetro
- Durómetro
- Estereoscopio
- Lija de carburo de silicio
- Paño de alúmina.

2.6 Fase 1: Caracterización de los materiales

La fase de caracterización de los materiales está compuesta de 3 etapas tal como se muestra en Figura 2.6. Esta fase comienza con la caracterización química y mecánica, mediante un análisis químico por espectrometría y un ensayo de dureza de los materiales de estudio. Estos dos procesos serán realizados bajo la norma ASTM E415-17 y ASTM E18-8a respectivamente. Por último, se realizará una medición de la rugosidad de los aceros inoxidables siguiendo la norma ASTM D7127-17.

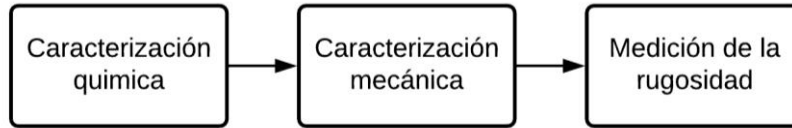


Figura 2.6 Proceso de caracterización de los materiales
Fuente: Elaboración propia

2.6.1 Caracterización química

La composición química de los aceros inoxidable será obtenida mediante un análisis químico de espectrometría por emisión óptica de chispas (OES), siguiendo la norma ASTM E415-17. Para esta prueba se utilizará una plancha de área 50 x 50 mm de los dos aceros inoxidable, esta área es el mínimo aceptable para este ensayo. Además, el equipo con el cual se realizará esta prueba es un espectrómetro de la marca Bruker modelo Magellan Q8, el cual permite determinar hasta 21 elementos de aleación de aceros al carbono, incluyendo de los aceros inoxidable. En la Figura 2.7 se muestra el espectrómetro que se utilizará, el cual se encuentra listo para realizar la prueba en la plancha de acero inoxidable AISI 316L.



Figura 2.7 Ensayo de espectrometría por emisión de chispas
Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Caracterización mecánica

El ensayo de dureza Rockwell estará basado en la norma ASTM E18-18a, la cual especifica el proceso y el testeo previo del equipo que se debe de realizar antes de los ensayos. Para esta prueba se utilizará un durómetro Indectec modelo Zwick Roell, el cual tiene un indentador de bola de carburo de diamante o tungsteno y permite realizar ensayos de dureza en diferentes escalas Rockwell desde A-Y. En este caso la prueba será realizada en una escala de dureza Rockwell B.

Los valores de dureza Rockwell se obtienen mediante una derivación de la diferencia entre las dos mediciones de profundidad de penetración realizadas, que en este caso se obtendrán con la aplicación de una fuerza preliminar de 10 kgf (98N) y una fuerza total de 100 kgf (981N). Es necesario mencionar, que este ensayo se realizará 5 veces en zonas aleatorias de las dos planchas de los aceros inoxidable, respetando una distancia mínima de tres diámetros del agujero de penetración entre cada ensayo. En la Figura 2.8 se observa la realización del ensayo de dureza Rockwell en la plancha P2 de acero inoxidable AISI 430.



Figura 2.8 Ensayo de dureza Rockwell B
Fuente: Elaboración propia

2.6.3 Medición de la rugosidad

La medición de la rugosidad de los aceros inoxidable, se realizará con el fin de que todos los aceros inoxidable de esta prueba cuenten con el mismo rango de rugosidad y no exista una variación significativa. En primer lugar, se debe de asegurar que la muestra de acero inoxidable esté totalmente limpia, para evitar algún error en la medición. Teniendo en cuenta ello, se debe de iniciar con la prueba colocando el rugosímetro cerca de la muestra de acero inoxidable, con el palpador sobre la superficie de la muestra, como se observa en la Figura 2.9. Además, el cálculo de la de rugosidad en este estudio será con el parámetro R_a , el cual es el promedio aritmético de todas las distancias absolutas del perfil de rugosidad de la longitud de medición. Esta prueba será realizada cinco veces por cada material en distintas zonas aleatorias y se verificará que la rugosidad esté dentro de los parámetros comunes medidos.

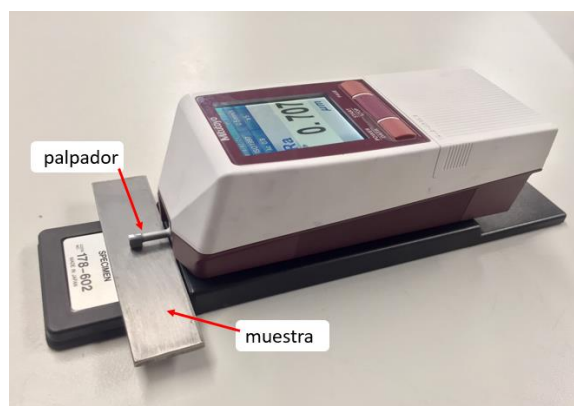


Figura 2.9 Montaje de rugosímetro con la muestra de acero inoxidable
Fuente: Elaboración propia

2.7 Fase 2: Preparación de la celda electroquímica

La fase de preparación de la celda electroquímica, consta de tres partes principales como se muestra en la Figura 2.10. En primer lugar, el proceso a seguir para que los tres tipos de electrodos estén cortados y preparados correctamente para la prueba, esto incluye el proceso de lijado de la superficie, limpieza, entre otros. Posteriormente, la preparación de los electrolitos donde se muestra la concentración del cloruro de sodio (NaCl) y el valor de

masa que se debe de utilizar para las soluciones. Por último, el proceso de montaje de la celda de electroquímica de corrosión final. Todos estos tres procesos mencionados, siguen las recomendaciones y procedimientos establecidos en la norma ASTM G1-90 y ASTM G5-14.

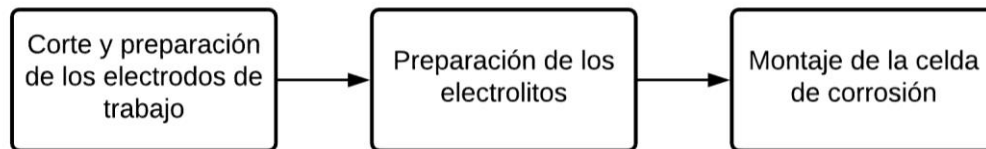


Figura 2.10 Proceso de preparación de la celda electroquímica
Fuente: Elaboración propia

2.7.1 Corte y preparación de los electrodos de trabajo

En esta investigación se preparará 8 electrodos de trabajo (ET), a los cuales se les dará una forma circular de diámetro de 25 mm, con espesor de 3mm. Estas muestras al ser ensambladas tendrán un área expuesta de 1.33 cm^2 como se muestra en la Figura 2.11. La superficie del electrodo será trabajada 1 hora antes de realizar el experimento. Primero, se pulirá los electrodos con lija al agua de SiC del tipo P240 y P600, cada uno consecutivamente. Además, momentos antes de la prueba se realizará un proceso de limpieza con acetona, con el fin de remover cualquier impureza en la muestra. Finalmente, se enjuagarán con agua destilada y se secarán con aire seco para que puedan ser montados en los portaelectrodo de teflón que cuentan con un orificio y un o-ring para delimitar el área expuesta.

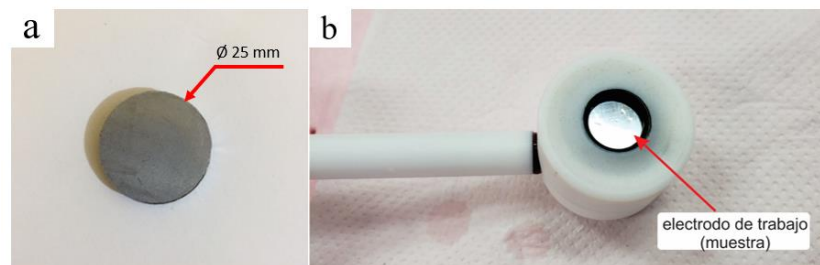


Figura 2.11 Electrodo de trabajo cortado de forma circular (a); electrodo de trabajo montado (b)
Fuente: Elaboración propia

2.7.2 Preparación del electrolito

Para la preparación del electrolito de cloruro de sodio, se calculó la molaridad y la masa del soluto a partir de las concentraciones requeridas en 750 ml de agua destilada como se muestra en la Tabla 2.3. Con las cantidades establecidas, se combinará el cloruro de sodio con el agua destilada en un vaso precipitado, disolviendo el soluto con un agitador. Por último, se verificará que no queden rastros de cloruro de sodio y se traspasará el electrolito a la celda electroquímica.

| Soluciones de cloruro de sodio (NaCl) | | |
|---------------------------------------|-------------------|----------|
| Peso Molecular: 58,44 g/mol | | |
| Molaridad (M) | Concentración (%) | Masa (g) |
| 0.62 | 3.5 | 27.20 |
| 0.53 | 3.0 | 23.19 |

Tabla 2.3 Cantidad de Cloruro de Sodio (NaCl) requerido para el electrolito
Fuente: Elaboración propia

2.7.3 Montaje de la celda de corrosión

La celda electroquímica de corrosión será montada tal y como se muestra en la Figura 2.12. Esta celda permitirá el ingreso de los tres electrodos, un capilar Luggin con conexión de puente salino al electrodo de referencia, entrada y salida para un gas inerte y un termómetro. Además, se reducirá los niveles de oxígeno en la solución antes de la inmersión del electrodo de trabajo para cada ensayo. Esto se puede lograr haciendo burbujear un gas como hidrogeno, argón o nitrógeno a una velocidad de 150 cm³/min durante 60 minutos, que en este caso será nitrógeno.



Figura 2.12 Esquema de celda electroquímica montada
Fuente: Elaboración propia

2.8 Fase 3: Prueba de extrapolación de Tafel

El objetivo de esta prueba es hallar los valores de potencial de corrosión y de densidad de corriente de corrosión, para que posteriormente puedan ser transformados a velocidad de corrosión. Por esa razón, esta prueba se ha dividido en tres partes como se muestra en la Figura 2.13 que serán desarrolladas en las siguientes secciones. Teniendo en cuenta esto, la prueba estará basada en la norma ASTM G59-97 y ASTM G102-89, las cuales indican el procedimiento experimental para las mediciones de curvas de polarización potenciodinámicas y para la determinación correcta de la velocidad de corrosión. Adicional a ello se especifica el procedimiento para la calibración de los equipos y la verificación de las técnicas experimentales empleadas.

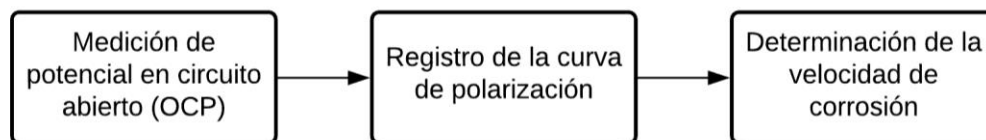


Figura 2.13 Proceso de la prueba de extrapolación de Tafel
Fuente: Elaboración propia

2.8.1 Medición de potencial en circuito abierto (OCP)

Para comenzar esta primera etapa se debe de verificar que la celda electroquímica esté montada correcta como se especificó en la fase 2. Posterior a ello, se configurará el potencióstato a una velocidad de barrido de 0.17mV/s , el cual será aplicado para todas las pruebas de polarización. Teniendo todo esto listo, se dejará que el sistema alcance un estado estable mientras se registra el potencial vs el tiempo. A este proceso se le conoce como medición de potencial en circuito abierto (OCP). Por lo general, este proceso se alcanza después de los 60 minutos de inmersión. Cuando llegue este momento, se detendrá la medición y se tomará nota del ultimo potencial registrado, que viene a ser el potencial de corrosión (E_{corr}). Este valor es fundamental ya que nos servirá para las siguientes etapas.

2.8.2 Registro de la curva de polarización

Teniendo el valor de potencial de corrosión, se puede comenzar con esta etapa. En primer lugar, se aplicará un potencial de 30 mV menor que el potencial de corrosión. Luego de haber pasado 1 minuto de la aplicación del potencial -30 mV , se comenzará el escaneo del potencial anódico a la velocidad de barrido especificada, registrando el potencial y la intensidad de corriente continuamente. El barrido se terminará a un potencial de 30 mV mayor que el potencial de corrosión.

Por último, con los datos obtenidos del barrido se trazará la curva de polarización como un diagrama de potencial lineal vs densidad de corriente. Cabe mencionar, que en la siguiente sección se explicará cómo convertir la intensidad de corriente a densidad de corriente. Con estas curvas de polarización se puede hallar la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), el cual es uno de los objetivos de esta fase. Para ello, se empleará la técnica de extrapolación de Tafel explicada en la sección 0, el cual indica que la intercepción de las tangentes de las curvas de polarización de la zona anódica y catódica, muestran el valor de densidad de corriente de corrosión.

2.8.3 Determinación de la velocidad de corrosión

Este procedimiento está regido según la norma ASTM G102-89, el cual nos da una guía del método a seguir para convertir los resultados de las mediciones electroquímicas a tasas de corrosión uniforme. Esto quiere decir, que muestra los métodos de cálculo para convertir los valores de densidad de corriente de corrosión, en tasas de pérdida de masa o tasas de penetración promedio.

Para ello, primero se debe de convertir los valores de intensidad de corriente que se hallaron en la sección 2.8.2 a densidad de corriente, y para ello se aplicará la Ecuación 2.1 que se muestra.

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

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

I_{corr} = Intensidad de corriente (μA)

A = Área expuesta de la muestra (cm^2)

Con esta i_{corr} calculada, se puede aplicar la Ecuación 1.24 y obtener el valor de velocidad de corrosión uniforme, el cual fue explicado en la sección 1.5.5.

2.9 Fase 4: Prueba de polarización cíclica

Esta fase de prueba está basada en la norma ASTM G61-86, el cual nos indica un procedimiento de medición potenciodinámica cíclica para poder determinar la susceptibilidad relativa a la corrosión localizada por picadura. Este método está dirigido para pruebas de corrosión en aceros inoxidable que estén en un ambiente de cloruro.

De igual manera que en la prueba de extrapolación de Tafel de la fase 3, esta prueba requiere del valor de potencial de corrosión (E_{corr}) obtenido en la sección 2.8.1, ya que a

partir de este valor se comenzará a incrementar el potencial mientras se registra el potencial y la intensidad de corriente. Esto quiere decir, que terminada la prueba de extrapolación de Tafel, se seguirá aumentando el potencial en la dirección más noble, luego de que se llegue a los 30 mV por encima del potencial de corrosión (E_{corr}), utilizando el mismo papel logarítmico.

Debemos de saber que el inicio de la corrosión localizada por picadura suele estar marcado por un rápido aumento de la corriente anódica, es por eso que cuando la corriente alcance los 5 mA, se debe de invertir la dirección de exploración y dirigirla hacia potenciales más activos. Esta exploración inversa debe de continuar hasta que el circuito de histéresis se cierre o hasta que se alcance el potencial de corrosión. Estas gráficas obtenidas nos servirán para hallar los parámetros críticos de la curva y realizar el análisis correspondiente como se explicó en la sección 1.5.6.

2.10 Fase 5: Análisis superficial de la muestra

La última fase del proceso de estudio se realizará con el objetivo de analizar la superficie de las muestras ensayadas en busca de indicios de picadura o corrosión general. Para ello, acabado las pruebas potenciodinámicas las muestras serán enjuagadas con agua destilada y con acetona, para poder ser almacenadas en un desecador. Las muestras seleccionadas para el análisis serán retiradas del desecador y se montarán tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Para este estudio se utilizará un estereoscopio AmScope trinocular con un aumento de 7x - 45x, el cual es idóneo para el análisis de superficie de los aceros inoxidable. Cabe mencionar, que las muestras tan solo serán analizadas en dos tipos de aumentos: 15x y 45x, estas mediciones nos permitirán tener una visualización de toda la zona afectada por corrosión y una observación a mayor detalle de las picaduras encontradas.



Figura 2.14 Análisis superficial de la muestra
Fuente: Elaboración propia

Por último, con todas las capturas obtenidas del estereoscopio se realizará un escalamiento de la imagen a su tamaño real y mediante el software ImageJ se binarizará las imágenes para poder calcular el área afectada por picadura de cada uno de las muestras, con el fin conocer que muestras fueron las más afectadas y el tamaño que presentaron las cavidades de las picaduras.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Este último capítulo abarca la presentación y el análisis de los resultados experimentales obtenidos en las pruebas que se ha seguido de acuerdo a la metodología explicada en el capítulo anterior. Comenzando por la caracterización de los materiales, tanto química como mecánica. Y continuando con la exposición de las curvas obtenidas en las pruebas de resistencia a la polarización y cíclicas. Por último, se presentará las imágenes del análisis superficial de las muestras.

3.1 Caracterización de los materiales

La caracterización química, mecánica y la rugosidad de los aceros inoxidable nos mostrarán que estos aceros utilizados en este estudio cumplen las propiedades mecánicas y composición química estandarizadas. Además, estos valores obtenidos permitirán analizar el comportamiento de los materiales de estudio y generar discusión a partir de ello.

3.1.1 Caracterización química

Los resultados obtenidos mediante la prueba de espectrometría por emisión óptica de chispas (OES), muestran el porcentaje en peso de cada uno de los elementos encontrados en los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430. Estos datos fueron puestos en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2 respectivamente, y han sido comparados con respecto a la literatura ASM International: Stainless Steel for Design Engineers, 2008 [21], la cual muestra la composición química de todos los tipos de aceros inoxidable comerciales, incluyendo los de este estudio.

Como se puede observar en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2, los valores de los elementos de la composición química encontrados en la prueba, son muy cercanos o están dentro del

intervalo establecido por la referencia ASM International. Por lo tanto, se puede afirmar que los aceros inoxidable utilizados en este estudio cumplen la composición química necesaria para poder ser sometidos a las pruebas potenciodinámicas.

| Componente | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | V |
|---------------------------------|------|------|------|-------|-------|-----------|-----------|---------|------|------|
| Acero AISI 316L (ASM) | 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 16.0-18.0 | 10.0-14.0 | 2.0-3.0 | - | - |
| Muestra de plancha AISI 316L | 0.02 | 0.47 | 1.43 | 0.02 | 0.001 | 16.71 | 10.04 | 2.02 | 0.04 | 0.07 |

Tabla 3.1 Comparación de la composición química (% en peso) del acero inoxidable AISI 316L
Fuente: Elaboración propia

| Componente | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | V |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|-----------|------|------|------|------|
| Acero AISI 430 (ASM) | 0.12 | 1.00 | 1.00 | 0.040 | 0.030 | 16.0-18.0 | 0.75 | - | - | - |
| Muestra de plancha AISI 430 | 0.02 | 0.32 | 0.33 | 0.026 | 0.020 | 16.32 | 0.18 | 0.02 | 0.01 | 0.09 |

Tabla 3.2 Comparación de la composición química (% en peso) del acero inoxidable AISI 430
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Caracterización mecánica

En la Tabla 3.3. se muestran los cinco valores obtenidos de la prueba de dureza Rockwell HRB de cada plancha de acero inoxidable AISI 316L y AISI 430. A estas mediciones se les sacó un promedio aritmético y los cuales serán comparados del mismo modo que la prueba anterior, con la literatura ASM International y de sobremanera con la tabla de propiedades mecánicas de Euro Inox que se encuentra en el ANEXO 1.

Como se puede apreciar el valor de dureza Rockwell de la plancha AISI 316L obtenido en el ensayo, tiene una diferencia de 3.2 HRB del valor reportado en la literatura, y en el caso de la plancha AISI 430, presentó una diferencia de 4.6 HRB. Estas diferencias son menores de 5 HRB en ambos casos, por lo que se encuentran dentro de lo admisible y nos indican que ambos aceros inoxidable cuentan con una dureza media y una condición dúctil debido a su microestructura.

| Componente | Medición de dureza escala Rockwell HRB | | | | | Promedio de dureza Rockwell HRB | Desviación Estándar S | Dureza Rockwell HRB (ASM) |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | Muestra de plancha AISI 316L | 82.0 | 82.1 | 82.1 | 82.3 | 82.6 | 82.2 | 0.239 |
| Muestra de plancha AISI 430 | 80.2 | 80.4 | 80.4 | 80.4 | 80.6 | 80.4 | 0.141 | 85 |

Tabla 3.3 Comparación de la dureza escala Rockwell HRB de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430
Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Medición de la rugosidad

Los cinco valores de rugosidad determinados en las mediciones realizadas de forma aleatoria en la superficie de las planchas de acero inoxidable AISI 316L y AISI 430 se presentan en la Tabla 3.4. Así mismo, se realizó un promedio aritmético de los valores al igual que la prueba anterior.

| Componente | Medición de la rugosidad R_a (μm) | | | | | Promedio de rugosidad R_a (μm) | Desviación Estándar (S) |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|---|-------------------------|
| | Muestra de plancha AISI 316L | 0.270 | 0.293 | 0.292 | 0.293 | 0.296 | 0.289 |
| Muestra de plancha AISI 430 | 0.219 | 0.340 | 0.268 | 0.342 | 0.300 | 0.294 | 0.052 |

Tabla 3.4 Rugosidad aritmética (R_a) de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en los resultados, los valores de la rugosidad R_a indican que las planchas de acero tienen un acabado superficial de alta calidad con un número de grado de rugosidad N4, ya que está dentro del rango de 0.2 y 0.4 μm (Véase ANEXO 2). Además, hay que notar que los promedios de rugosidad R_a en ambas muestras de planchas de acero inoxidable son muy similares. Por lo que, al no existir una gran diferencia entre ambos valores, el parámetro de la rugosidad no tendrá un efecto significativo en los resultados obtenidos en las pruebas potenciodinámicas.

3.2 Prueba de extrapolación de Tafel

Como se mencionó en la Fase 3 del capítulo anterior esta prueba tiene tres etapas, por lo tanto, los resultados se distribuirán en la medición de potencial en circuito abierto (OCP), registro de la curva de polarización y determinación de la velocidad de corrosión. Es necesario mencionar, que los valores de potencial medidos en las pruebas potenciodinámicas con el electrodo de referencia de Ag/AgCl, KCl_(sat), fueron transformados a una escala de referencia de Hg/Hg₂Cl₂ o SCE por sus siglas en inglés. Todo esto con el propósito de reportar los valores de potencial de manera similar a la norma ASTM G61-86.

3.2.1 Medición de potencial en circuito abierto (OCP)

Las gráficas obtenidas de la medición del sistema en circuito abierto para cada una de las condiciones especificadas en el diseño experimental del estudio (Véase Tabla 2.2), se muestran en la Figura 3.1 y Figura 3.2. Como se puede observar en cada una de las pruebas que fueron realizadas por duplicado y en un tiempo de 60 minutos, el valor de potencial tiende a incrementar de una manera lenta hasta lograr una estabilidad en algunos casos, lo que significa que se ha llegado hasta el valor de potencial de corrosión (E_{corr}). En cambio, en los ensayos en el que el valor de potencial sigue incrementando, significa que el sistema aún no ha llegado al valor de potencial de corrosión, pero está muy próximo.

Todos los valores de potencial de corrosión registrados se muestran en la gráfica de barras de la Figura 3.3, de tal manera que permita realizar una comparación de los potenciales de corrosión entre los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430 en la solución de NaCl 3.5% y 3.0%. Como se puede observar en los ensayos del acero inoxidable AISI 316L, la prueba realizada en la solución de NaCl 3.0% presentó valores de potencial de corrosión más bajos que en la solución de NaCl 3.5%. Esto nos da a entender que el acero inoxidable AISI 316L tiene mayor tendencia a corroerse en una solución de 3.0%. En cambio, en los ensayos realizados en el acero inoxidable AISI 430, las pruebas realizadas en la solución de NaCl 3.5% y 3.0% presentaron valores de potencial de corrosión muy

similares en ambas pruebas. Lo que significa que en ambas condiciones el acero inoxidable AISI 430 tiene la misma tendencia a corroerse.

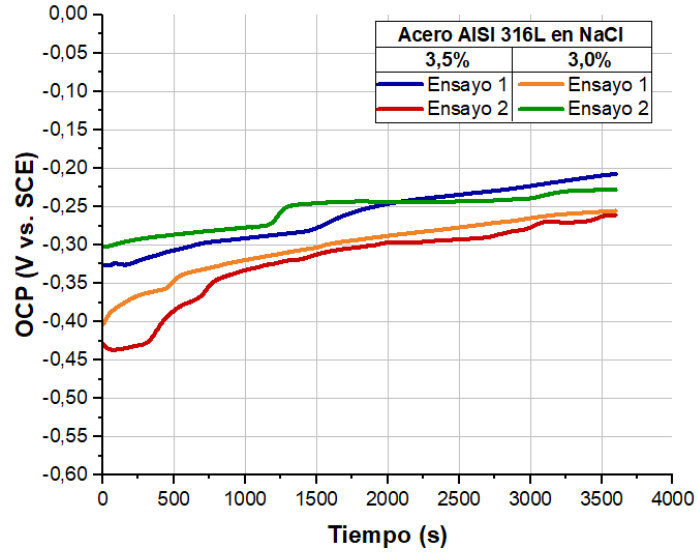


Figura 3.1 Registro del potencial en circuito abierto (OCP) versus tiempo para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% y 3.0% (ensayo por duplicado)

Fuente: Elaboración propia

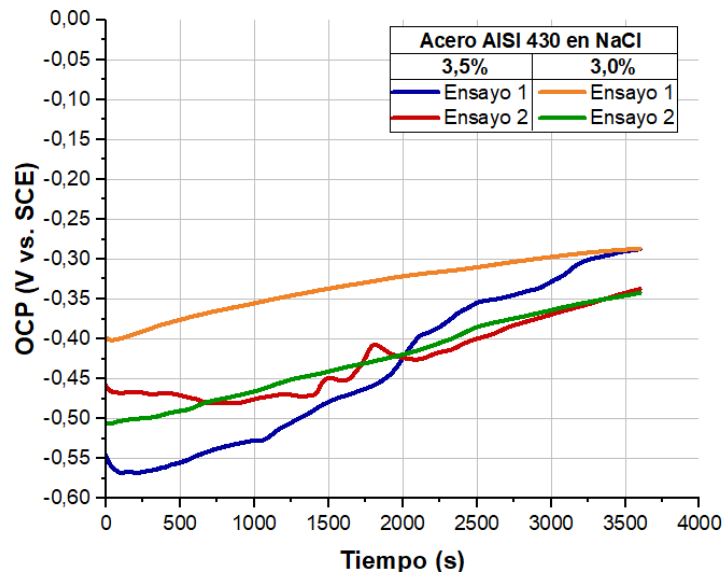


Figura 3.2 Registro del potencial en circuito abierto (OCP) versus tiempo para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0 % (ensayo por duplicado)

Fuente: Elaboración propia

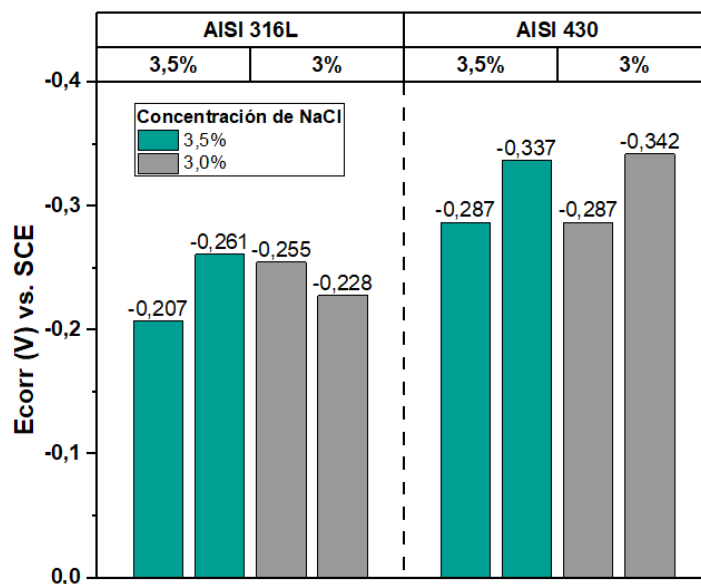


Figura 3.3 Potenciales de corrosión (E_{corr}) de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, si realizamos una comparación entre los valores de potencial de corrosión de los dos aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430. Para las dos condiciones, tanto para la solución de NaCl 3.5% y 3.0%, el acero inoxidable AISI 430 presentó valores de potencial de corrosión menores, llegando hasta los -0.342 V. Con esta información se puede concluir que el acero inoxidable AISI 430 es menos resistente a la corrosión general que el acero inoxidable AISI 316L. Este resultado era esperado, ya que el acero inoxidable AISI 430 es mucho más económico y pertenece a los aceros inoxidable tipo ferrítico, sin embargo con los resultados que se obtendrán en las siguientes secciones se podrá cuantificar de manera más precisa que tan comparable puede llegar a ser el acero inoxidable AISI 430 al AISI 316L en termino de velocidad de corrosión.

3.2.2 Registro de la curva de polarización

La obtención de las curvas de polarización potenciodinámicas se realizaron mediante una gráfica de dispersión, con los datos obtenidos en el registro del potenciostato como se mencionó en la sección 2.8.2. Con ello, se pudieron agregar dos líneas de

tendencia para cada ensayo, procurando que se ajusten de la mejor manera a los datos. En este caso fueron las líneas de tendencia polinomial de 2do y 3er grado. Adicionalmente, como se observará en las gráficas siguientes, se agregaron líneas tangentes que nos permitirán calcular la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), el cual está ubicado en el punto de intercepción.

Es necesario mencionar, que en esta sección tan solo se mostrarán cuatro de las ocho curvas de polarización obtenidas en los ensayos por duplicado y el resto de estas curvas de polarización obtenidas estarán adjuntadas en el ANEXO 3. Sin embargo, el análisis que será realizado toma en cuenta los ocho resultados obtenidos de las curvas de polarización potenciodinámicas.

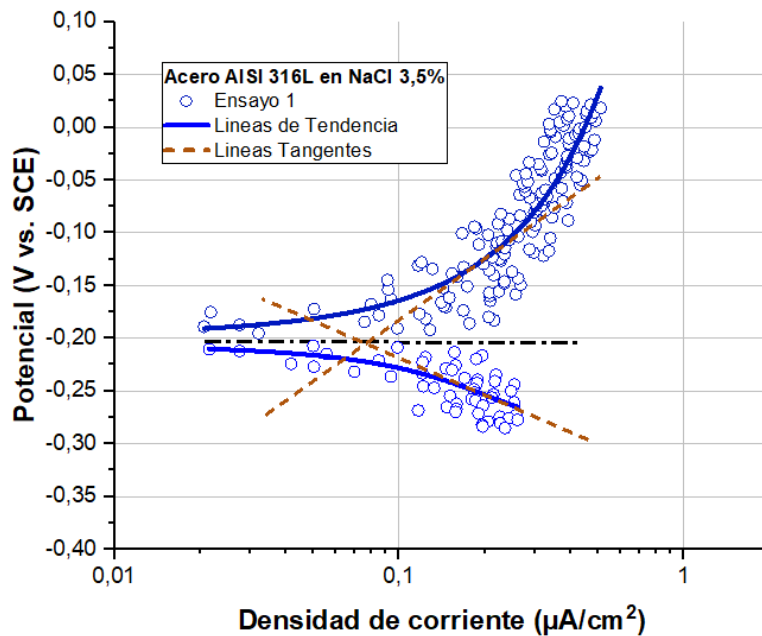


Figura 3.4 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 1)

Fuente: Elaboración propia

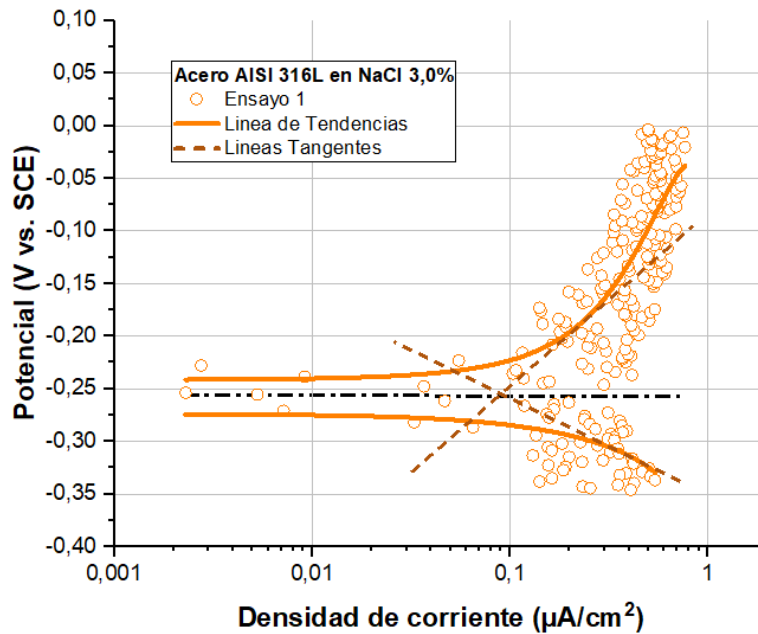


Figura 3.5 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 1)
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.4 y Figura 3.5 se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas para el acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5% y 3.0% respectivamente. Como se puede observar, los datos obtenidos no muestran dispersión presentando una similitud a la curva de extrapolación de Tafel estándar (Véase Figura 1.21), lo que permite que las líneas de tendencia tengan un mayor ajuste a los datos. En la condición de NaCl 3.5% se obtuvo una densidad de corriente corrosión de $0.0762 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y en la condición de NaCl 3.0% se obtuvo un valor de $0.0894 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Por otro lado, en la Figura 3.6 y Figura 3.7 se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas para el acero inoxidable AISI 430 en NaCl 3.5% y 3.0% respectivamente. Así mismo, en estas graficas se puede observar que para la condición de NaCl 3.0% los datos no presentaron dispersión y se obtuvo una densidad de corriente de corrosión de $0.3558 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Sin embargo, en la condición de NaCl 3.5% estos estaban demasiado dispersos, por lo que en la parte inferior se utilizó la función GaussAmp, obteniendo un valor de densidad de corriente de corrosión de $0.0873 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

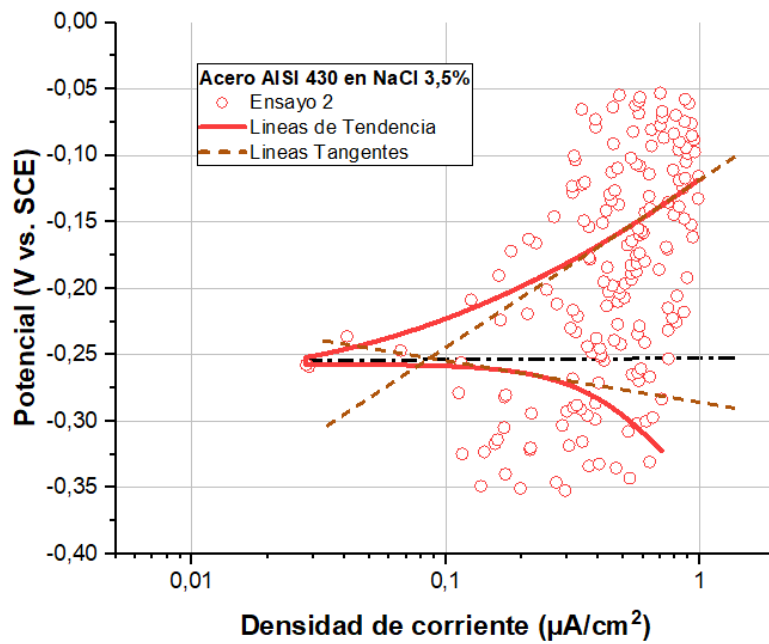


Figura 3.6 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 2)
Fuente: Elaboración propia

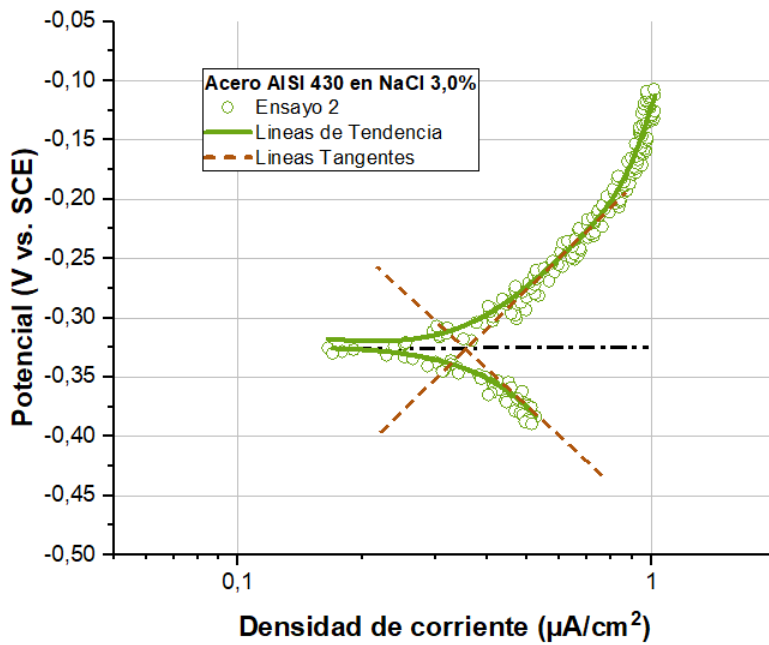


Figura 3.7 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 2)
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.5 se muestran las densidades de corriente de corrosión (i_{corr}) obtenidas en las ocho curvas de polarización potenciodinámicas, tanto de las gráficas mostradas en esta sección como las adjuntadas en el ANEXO 3. Además, como se puede observar se realizó un promedio aritmético del ensayo 1 y ensayo 2 para cada condición del diseño experimental. Todos estos resultados servirán para poder calcular la velocidad corrosión, el cual se hallará en la siguiente sección.

| Componente | Medio de ensayo | i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | |
|------------|-----------------|--|----------|----------|
| | | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| AISI 316L | NaCl 3.5% | 0.0762 | 0.1015 | 0.0889 |
| AISI 316L | NaCl 3.0% | 0.0894 | 0.0620 | 0.0757 |
| AISI 430 | NaCl 3.5% | 0.1091 | 0.0873 | 0.0982 |
| AISI 430 | NaCl 3.0% | 0.3796 | 0.3558 | 0.3677 |

Tabla 3.5 Densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%
Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Determinación de la velocidad de corrosión

Como se mencionó en la sección 1.5.5, de determinación de la velocidad de corrosión, se tienen que tomar en cuenta parámetros como la constante k_1 , densidad y peso equivalente del material analizado. En la Tabla 3.6 se muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de corrosión de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430, los cuales fueron extraídos de la norma ASTM G102-89 y ASTM G1-90. Cabe señalar, que los pesos equivalentes de los dos aceros inoxidable que se utilizaron, corresponden al tomar los valores más bajos de valencia. Esto quiere decir, que los resultados obtenidos para el cálculo de la velocidad de corrosión representan la situación más crítica en el cual el acero inoxidable es mucho más susceptible al proceso de oxidación.

| Parámetros | Material | |
|---------------------------------|-----------|----------|
| | AISI 316L | AISI 430 |
| k ₁ (mm g/μA cm año) | 0.00327 | 0.00327 |
| Densidad (g/cm ³) | 7.98 | 7.72 |
| Peso equivalente | 25.5 | 25.3 |

Tabla 3.6 Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de corrosión del acero inoxidable AISI 316L y AISI 430
Fuente: Elaboración propia

Tomando las densidades de corriente de corrosión de la Tabla 3.5 y utilizando la ecuación 1.24 con los parámetros mencionados, se obtuvo las velocidades de corrosión de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en NaCl 3.5% y 3.0% como se muestra en la Tabla 3.7. Además, en la Figura 3.8 se ha realizado un esquema que nos permitirá realizar un análisis comparativo entre todas las condiciones del diseño experimental de este estudio.

Como se puede observar, en los ensayos realizados para el acero inoxidable AISI 316L, el medio de ensayo de NaCl 3.5% presentó una ligera mayor velocidad de corrosión en comparación a la condición de NaCl 3.0%, con una diferencia de 0.000137 mm/año en promedio. Si bien, esta diferencia no es muy amplia, esto comprueba lo reportado anteriormente en otras literaturas (A. Rustandi, et al., 2016) [10], en los cuales se especifica que el comportamiento del acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5% presenta una menor resistencia a la corrosión general.

En el caso del acero inoxidable AISI 430, si se encontró una gran diferencia entre los valores de velocidades de corrosión en los dos medios de ensayo de NaCl 3.5% y 3.0%. Pero en este caso, el medio de ensayo que presentó mayor agresividad fue en el medio de NaCl 3.0%, mostrando una diferencia de 0.002888 mm/año en promedio, que es mayor a tres veces el valor obtenido en NaCl 3.5%. Esto quiere decir, que el acero inoxidable AISI 430 presenta una menor resistencia a la corrosión general en la condición de NaCl 3.0%.

| Componente | Medio de ensayo | Velocidad de corrosión (mm/año) | | |
|------------|-----------------|---------------------------------|----------|----------|
| | | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| AISI 316L | NaCl 3.5% | 0.000796 | 0.001060 | 0.000928 |
| AISI 316L | NaCl 3.0% | 0.000934 | 0.000648 | 0.000791 |
| AISI 430 | NaCl 3.5% | 0.001169 | 0.000936 | 0.001052 |
| AISI 430 | NaCl 3.0% | 0.004068 | 0.003813 | 0.003940 |

Tabla 3.7 Velocidad de corrosión de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%
Fuente: Elaboración propia

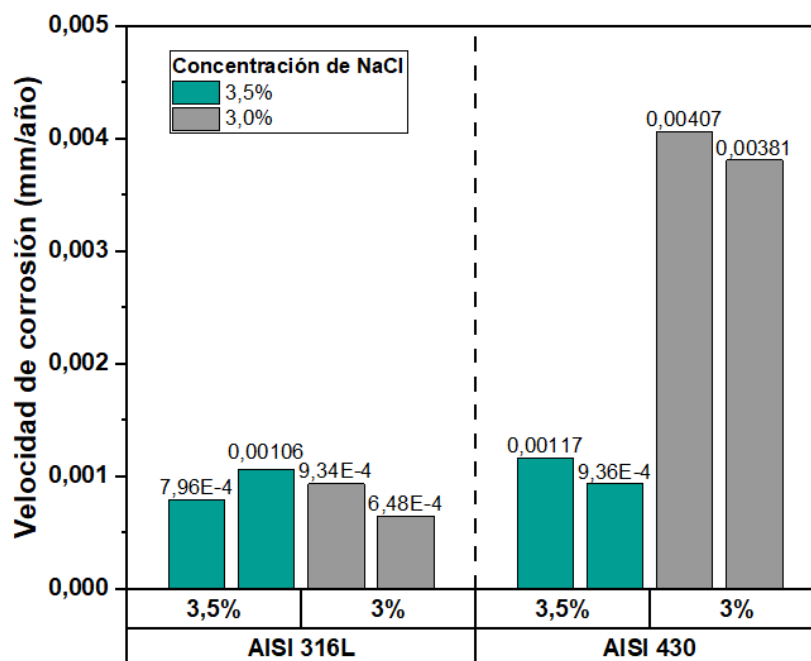


Figura 3.8 Esquema de las velocidades de corrosión de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, si comparamos entre los dos aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430, podemos observar que en el medio de ensayo de NaCl 3.5%, los valores obtenidos de velocidad de corrosión son muy cercanos y tan solo se presenta una diferencia de 0.000124 mm/año. Lo que nos da a entender, que en la condición de NaCl 3.5% el acero inoxidable AISI 430 es muy comparable al acero inoxidable AISI 316L en términos de resistencia a la

corrosión general. Sin embargo, si observamos los ensayos realizados de ambos aceros inoxidable en NaCl 3.0%, se puede observar una diferencia significativa de 0.003149 mm/año en promedio. Por lo tanto, la resistencia a la corrosión general del acero inoxidable AISI 430 en NaCl 3.0% es muy inferior a comparación a la del acero inoxidable AISI 316L.

Estas diferencias que se pueden presentar entre las velocidades de corrosión general en un medio de concentración de NaCl y otro, se debe a dos principales factores: el porcentaje de cromo en la composición química del acero inoxidable, ya que esto permite la repasivación de la capa de óxido de cromo, el cual protege al material de la corrosión general; y la agresividad del medio, el cual se determina de acuerdo a la solubilidad de oxígeno (O_2), que a su vez varía de acuerdo al grado de concentración del NaCl y el tipo de acero inoxidable en contacto.

3.3 Prueba de polarización cíclica

Siguiendo con la Fase 4 del proceso general del estudio, se obtuvo las curvas de polarización cíclicas del acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5% y 3.0% que se muestran en la Figura 3.9 y Figura 3.10. Estas curvas servirán para poder hallar el potencial de picadura (E_{pic}), el cual se denota por un incremento acelerado de la densidad de corriente, y para ello se han agregado flechas que permiten conocer el sentido mediante el cual se han registrado los datos en esta prueba. Este proceso se realizará de la misma manera en las curvas de polarización cíclica del acero inoxidable AISI 430 en NaCl 3.5% y 3.0%, las cuales se pueden observar en la Figura 3.11 y Figura 3.12 respectivamente.

Cabe mencionar, que todas las curvas de polarización cíclicas fueron trazadas en una gráfica lineal y todas han presentado la tendencia esperada de una curva de polarización cíclica estándar, la cual se mostró en la Figura 1.22.

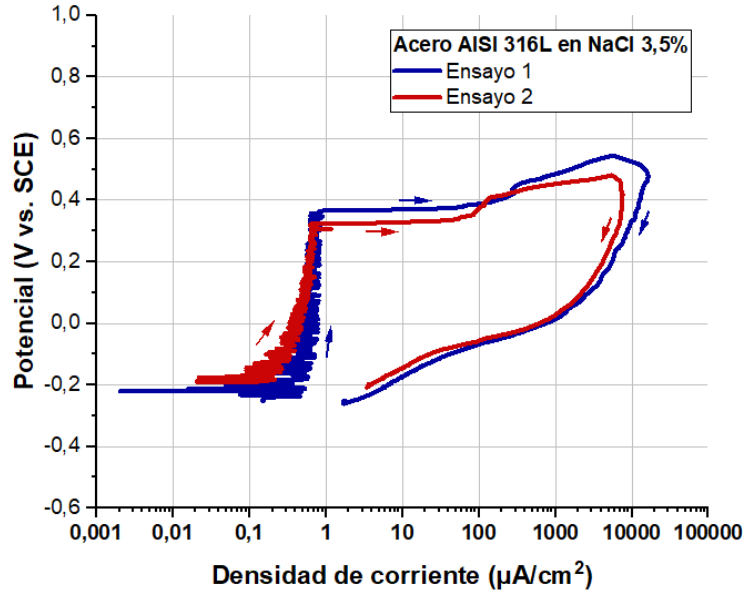


Figura 3.9 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% (ensayo por duplicado)
Fuente: Elaboración propia

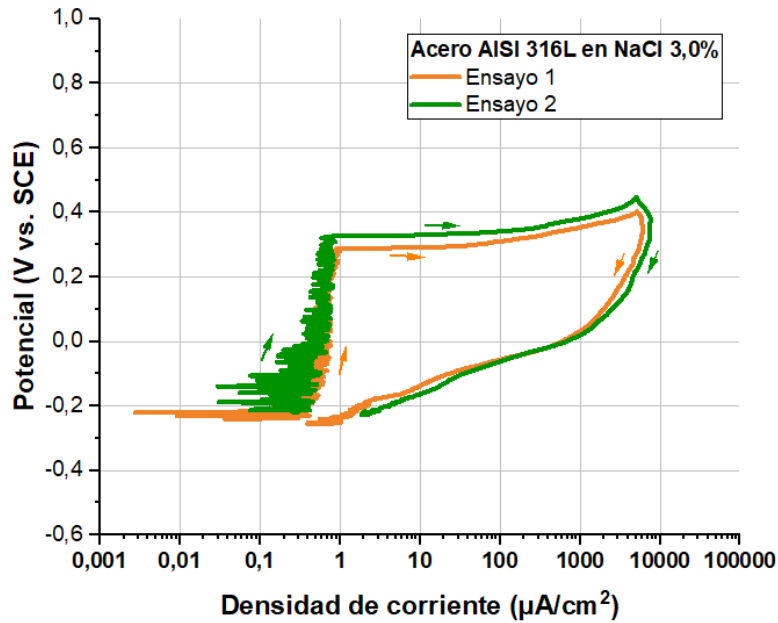


Figura 3.10 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.0% (ensayo por duplicado)
Fuente: Elaboración propia

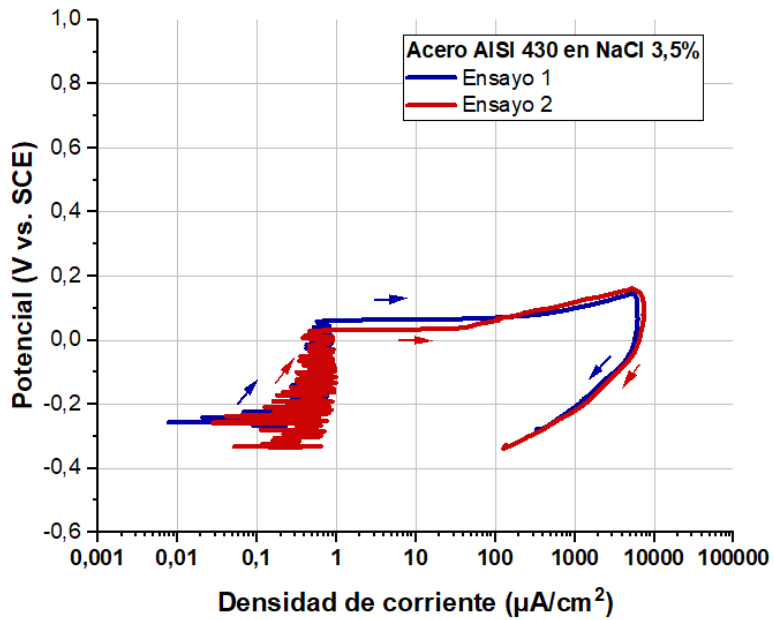


Figura 3.11 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% (ensayo por duplicado)
Fuente: Elaboración propia

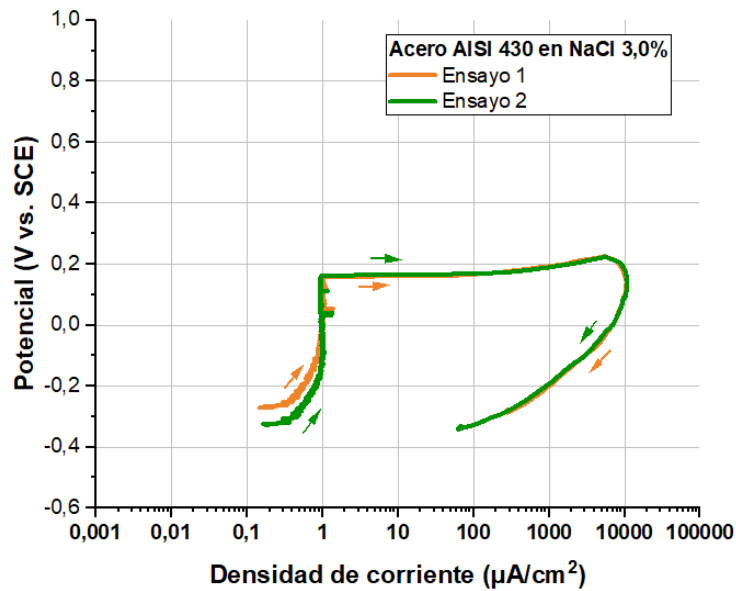


Figura 3.12 Curva de polarización cíclica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.0% (ensayo por duplicado)
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.8 se puede observar el resumen de todos los potenciales de picadura (E_{pic}) obtenidos de las curvas de polarización cíclica mostradas anteriormente. De igual manera que en la sección anterior, se calculó el potencial de picadura promedio para cada condición y se realizó un esquema de los resultados como se muestra en la Figura 3.13, el cual nos permitirá realizar el análisis.

Como se puede observar, los resultados obtenidos para el acero inoxidable AISI 316L muestran que el medio de ensayo de NaCl 3.5% tuvo un potencial de picadura levemente mayor al obtenido en NaCl 3.0%, presentando una diferencia de 0.034 V en promedio. Esto quiere decir que el acero inoxidable AISI 430 presenta mayor resistencia a la corrosión por picadura en un medio de NaCl 3.5%.

En cambio, en el acero inoxidable AISI 430 si se obtuvo una diferencia significativa entre los dos medios ensayados. En el medio NaCl 3.5% se obtuvieron valores de potencial de picadura mayores al de NaCl 3.0%, teniendo una diferencia de 0.115 V en promedio. Por lo tanto, se puede deducir que el acero inoxidable AISI 430 tiene una mayor resistencia a la corrosión por picadura en el medio de NaCl 3.5%.

| Componente | Medio de ensayo | E_{pic} (V) vs. SCE | | |
|------------|-----------------|-----------------------|----------|----------|
| | | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| AISI 316L | NaCl 3.5% | 0.361 | 0.320 | 0.341 |
| AISI 316L | NaCl 3.0% | 0.288 | 0.326 | 0.307 |
| AISI 430 | NaCl 3.5% | 0.159 | 0.163 | 0.161 |
| AISI 430 | NaCl 3.0% | 0.059 | 0.032 | 0.046 |

Tabla 3.8 Potencial de picadura (E_{pic}) de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%

Fuente: Elaboración propia

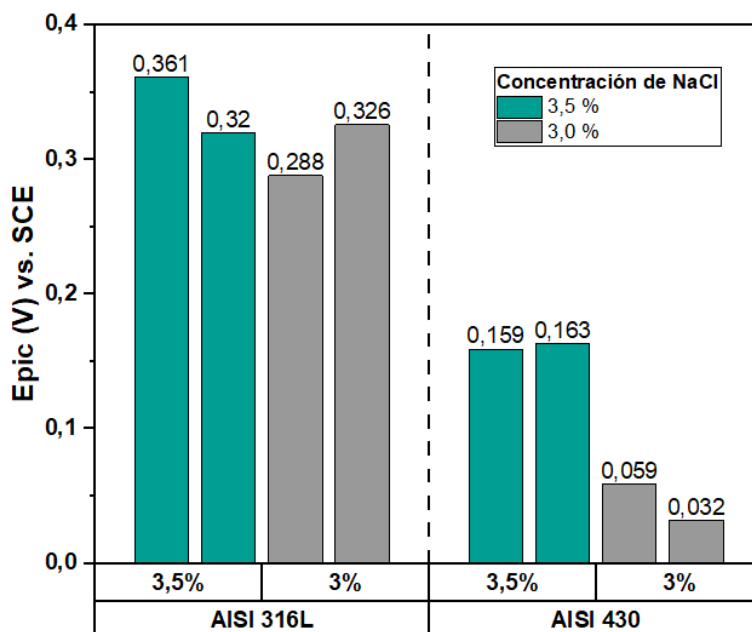


Figura 3.13 Esquema de los potenciales de picadura (E_{pic}) de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%

Por último, realizando la comparación entre los resultados de potencial de picadura obtenidos en los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430, se puede observar que existe una diferencia notable en ambos medios de ensayo. En el medio de NaCl 3.5% se presentó una diferencia de 0.180 V y en el medio NaCl 3.0% de 0.261 V, en promedio ambos. Todos estos análisis realizados nos permiten afirmar que el acero inoxidable AISI 316L tiene una mayor resistencia a la corrosión por picadura tanto en medios de NaCl 3.5% como en NaCl 3.0%.

Esto se puede entender, ya que existe una diferencia entre los porcentajes de Mo y Ni halladas en la composición química de los dos aceros inoxidable (Véase Tabla 3.1 y Tabla 3.2). Estos elementos de aleación al estar disueltos en la red de hierro permiten preservar la estructura austenítica del acero inoxidable AISI 316L, o en el caso del AISI 430 su estructura ferrítica. Además, estos elementos en conjunto con el cromo facilitan la formación de la película pasiva, evitando la propagación de la picadura.

3.4 Análisis superficial de las muestras

El proceso de análisis superficial realizado con el estereoscopio permitió obtener una visualización de la superficie de las muestras en un aumento de 15x después de los ensayos potenciodinámicos, los cuales se muestran en la Figura 3.14. Es necesario mencionar, que solo se están mostrando cuatro de las muestras ensayadas y el resto de las capturas obtenidas se encuentran en el ANEXO 4. Como se observa, las superficies de las muestras no presentaron indicios de corrosión general notoria en ninguna de las muestras. Sin embargo, si presentaron corrosión por picadura, los cuales se encontraron en dos tipos de zonas: en el borde del área expuesta de la muestra, el cual está delimitado por el o-ring del portaelectrodo (Véase Figura 2.11) y en la zona central del área circular expuesta de manera dispersa.

Como se puede observar en Figura 3.14, todas las muestras ensayadas de acero inoxidable, tanto del AISI 316L como del AISI 430, presentaron picadura en los bordes del área expuesta. Esto se debe a que existe una diferencia en la cantidad de oxígeno (O_2) que recibe la parte expuesta al medio de ensayo NaCl y la zona no expuesta cubierta por el o-ring, provocando una diferencia de potencial en las dos zonas, lo cual permite que los bordes de las muestras sean zonas mucho más susceptibles a la corrosión por picadura. Además, realizando una medición se determinó que muchas de estas picaduras en los bordes han llegado a medir hasta 0.87 mm de espesor en las zonas más afectadas.

Por otro lado, como se puede observar en la Figura 3.14.(a) y (b), el acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5% y AISI 430 en NaCl 3.0% presentaron de manera dispersa indicios de corrosión por picadura en la zona central de la muestra. En las capturas obtenidas con aumento de 15x, estas se pueden identificar como pequeñas cavidades de una tonalidad mucho más clara que del acero inoxidable, casi blanco. Además, con el fin de observar a mayor detalle estas picaduras, se obtuvieron las capturas que se muestran en la Figura 3.15, los cuales se encuentran en un aumento de 45x.

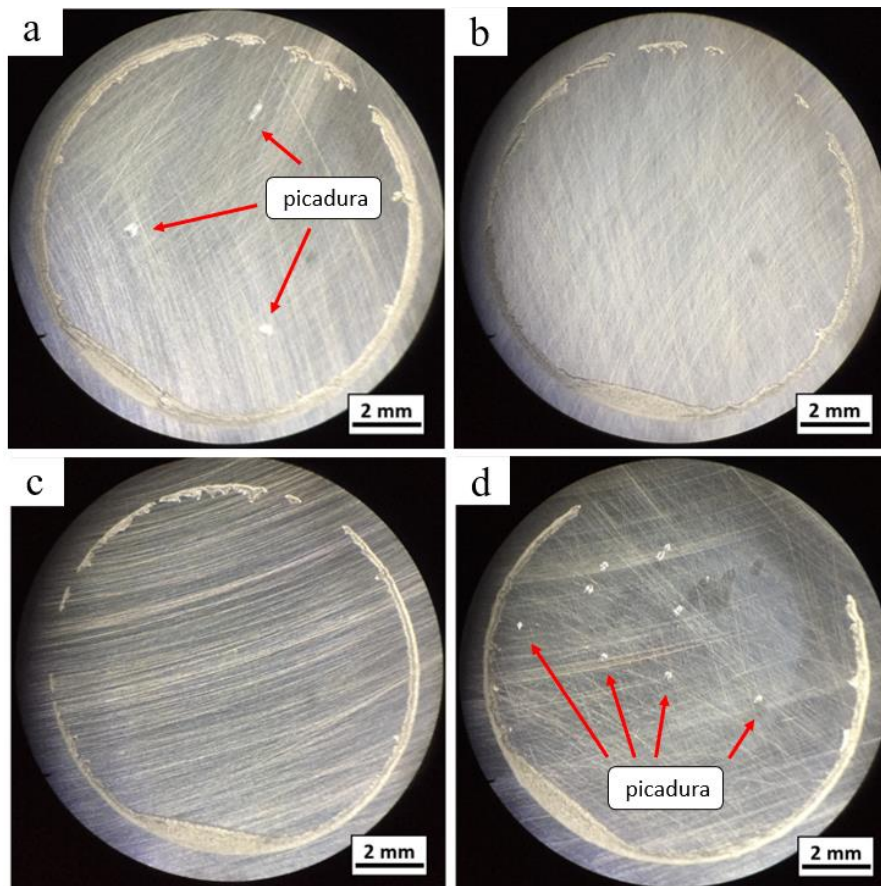


Figura 3.14 Superficie de las muestras posterior a los ensayos potenciodinámicos en aumento de 15x. Acero inoxidable AISI 316L en solución de (a) NaCl 3.5% y (b) NaCl 3.0%; Acero inoxidable AISI 430 en solución de (c) NaCl 3.5% y (d) NaCl 3.0%

Fuente: Elaboración propia

Estas picaduras encontradas en la zona central de la superficie de las muestras han sido ocasionadas por el ánodo agresivo de cloruro (Cl^-), ya que este penetra en la capa de óxido de cromo del acero inoxidable y que a su vez no permite que este se pueda repasivar propagando poco a poco la cavidad de la picadura. En el caso del acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5%, tan solo presentó 3 cavidades con un tamaño de 0.11 mm^2 en promedio. En cambio, en el caso del acero inoxidable AISI 430 en NaCl 3.0%, se encontraron 8 cavidades con un tamaño de 0.062 mm^2 y otras 2 más, pero con un tamaño mucho menor de 0.02 mm^2 .

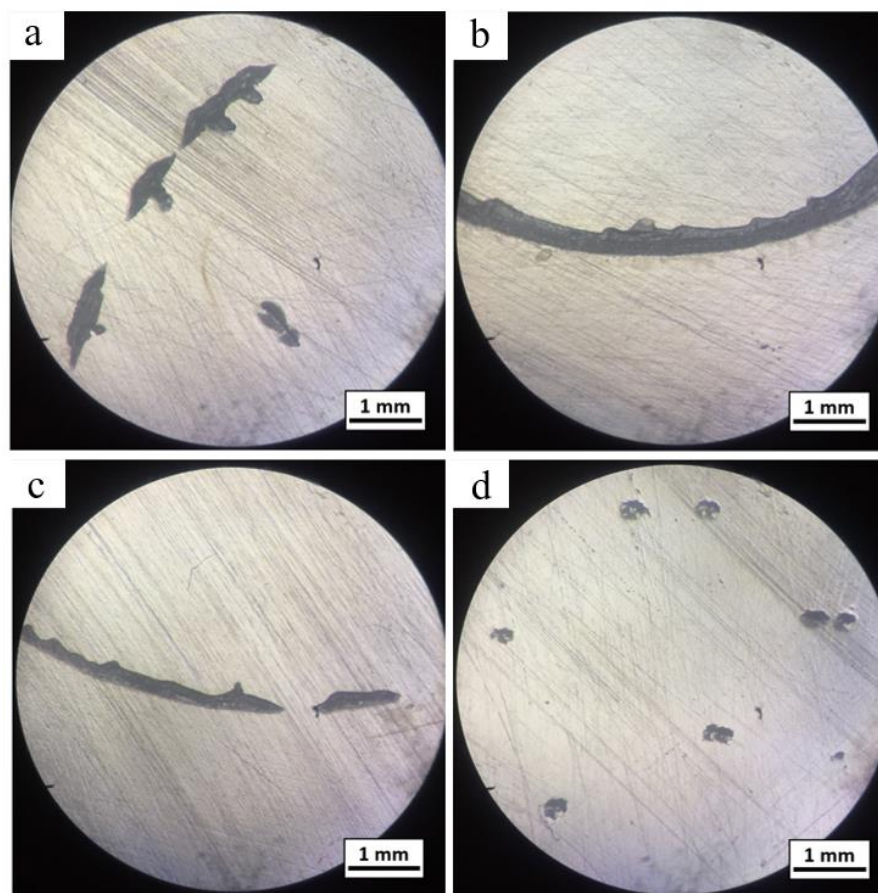


Figura 3.15 Picaduras encontradas en las muestras posterior a los ensayos potenciodinámicos en aumento de 45x. Acero inoxidable AISI 316L en solución de (a) NaCl 3.5% y (b) NaCl 3.0%; Acero inoxidable AISI 430 en solución de (c) NaCl 3.5% y (d) NaCl 3.0%

Fuente: Elaboración propia

| Componente | Medio de ensayo | Área afectada (mm ²) | | |
|------------|-----------------|----------------------------------|----------|----------|
| | | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| AISI 316L | NaCl 3.5% | 15.026 | 9.220 | 12.123 |
| AISI 316L | NaCl 3.0% | 7.203 | 10.072 | 8.6375 |
| AISI 430 | NaCl 3.5% | 8.078 | 10.480 | 9.279 |
| AISI 430 | NaCl 3.0% | 15.104 | 11.668 | 13.386 |

Tabla 3.9 Áreas afectadas por la corrosión por picadura de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430 en solución de NaCl 3.5% y 3.0%

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los valores obtenidos del área afectada por la corrosión por picadura de las muestras después de los

ensayos potenciodinámicos, estas incluyen el área de las picaduras presentadas en los bordes como en la parte central de la muestra. Es necesario recordar que el área expuesta de cada muestra fue de 133 mm^2 . Como se muestra, el área afectada por picadura del acero inoxidable AISI 430 en NaCl 3.0%, fue de 13.386 mm^2 , lo que concuerda con los valores de potencial de picadura (E_{pic}) que se mostraron en sección anterior (Véase Figura 3.13). por lo tanto se comprueba que dentro de las cuatro condiciones de este estudio esta es la menos resistente a la corrosión por picadura. Otra de las muestras que también presentó un área afectada significativa de 15.026 mm^2 , fue el acero inoxidable AISI 316L en NaCl 3.5%, tan solo en el ensayo 1. Sin embargo, esta condición obtuvo valores altos de potencial de picadura y esto se puede atribuir a que en la zona de la muestra en la que se realizó las pruebas presentó heterogeneidad, provocando esta susceptibilidad a la picadura en ciertas partes.

CONCLUSIONES

Según lo investigado en este trabajo acerca de los procesos de corrosión general y picadura se puede obtener las siguientes conclusiones:

1. En este estudio se realizó el análisis comparativo de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable AISI 316L y AISI 430, obteniendo como conclusión general que el acero inoxidable AISI 430 puede ser utilizado en un intercambiador de calor, teniendo en cuenta que la vida útil de este equipo será menor, ya que su capacidad de resistencia a la corrosión general y por picadura es inferior a la del acero inoxidable AISI 316L.
2. Se realizó la caracterización química y mecánica de los aceros inoxidables AISI 316L y AISI 430, lo cual permitió conocer la composición química, dureza de los materiales y rugosidad superficial. Con ello, se pudo comparar con los valores reportados en la literatura ASM International, logrando validar los materiales utilizados en este estudio y permitiendo proseguir con los ensayos potenciodinámicos.
3. El proceso de preparación de la celda electroquímica de corrosión bajo la norma ASTM G1-90 se desarrolló de una manera efectiva sin presentar alguna dificultad. Lo que permitió que todas las pruebas potenciodinámicas se encuentren en las condiciones especificadas de concentración de cloruro de sodio (NaCl) y el tipo de acero inoxidable del diseño experimental.
4. Se comprobó que el medio corrosivo de cloruro de sodio (NaCl) en una concentración de 3.5%, es más agresivo para el acero inoxidable austenítico AISI 316L, que en una concentración de 3.0%. No obstante, esto difiere para el acero

inoxidable AISI 430, ya que el medio de NaCl 3.0% presentó mayor agresividad que en la concentración de 3.5%. Esto se debe a que existe una diferencia del porcentaje de solubilidad de oxígeno (O_2) en el medio, el cual varía de acuerdo a la concentración de NaCl y el tipo acero en contacto.

5. Mediante las pruebas de extrapolación de Tafel se determinó que el acero inoxidable ferrítico AISI 430 en el medio de NaCl 3.5%, puede llegar a tener hasta el 87% de la capacidad de resistencia a la corrosión general del acero inoxidable austenítico AISI 316L, siempre y cuando en su composición química contenga altos contenidos de cromo (16-18%). En cambio, en el medio de NaCl 3.0%, el acero inoxidable AISI 430 llega a reducir hasta 5 veces su resistencia a la corrosión general. Eso quiere decir, que la capa de óxido de cromo del acero inoxidable AISI 430, permite una mejor restauración de la capa pasiva en un medio de NaCl 3.5%.
6. De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de polarización cíclica, se determinó que el acero inoxidable austenítico AISI 316L en el medio de NaCl 3.5%, presenta un valor de potencial de picadura (E_{pic}) de 2.12 veces que la del acero inoxidable ferrítico AISI 430. Sin embargo, teniendo en cuenta que el costo del acero inoxidable AISI 430 es hasta un 60% menor que el del austenítico, estos presentan una moderada resistencia a la corrosión por picadura y este se puede aumentar incrementando el porcentaje de Mo y Ni en su composición química.
7. En el proceso de análisis superficial de las muestras se identificó dos tipos de zonas que fueron afectadas por la picadura. En el borde de la zona expuesta de la muestra, la cual presentó una picadura continua y con espesores de hasta 0.87 mm; y en la zona central de la muestra, con picaduras en forma de cavidades en tamaños desde 0.062 mm^2 hasta 0.11 mm^2 , los cuales se encontraban de manera dispersa. Con estos resultados se pudo comprobar que el área afectada por picadura, encontrada en la superficie de las muestras, tiene concordancia con la resistencia a la corrosión por picadura hallada en las pruebas de polarización cíclica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Acmite Market Intelligence, Heat Exchangers Market, Market Research Report, 2020.
- [2] R. Shah y D. Sekulic, Fundamentals of Heat Exchanger Design, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [3] O. A. Jaramillo, «Intercambiadores de Calor,» Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, 2007.
- [4] G. Koch, «Cost of Corrosion,» de *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 3-30.
- [5] M. P. Montes, «Corrosión en el Sector Eléctrico en la Zona Costera del Perú,» *CITE energía*, 2016.
- [6] M. G. Fontana, Corrosion engineering, McGraw-hill, 1987.
- [7] Willem FAES, et al., «Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers,» *Corrosion reviews*, vol. 37, n° 2, pp. 131-155, 2019.
- [8] D. Eryener, «Thermoeconomic optimization of baffle spacing,» *Energy Conversion and Management*, pp. 1478-1489, 2006.
- [9] Č. Donik y A. Kocijan, «Comparison of the corrosion behaviour of austenitic stainless steel in seawater and in a 3.5 % NaCl solution,» *Materials and Technologies*, vol. 48, pp. 937-942, 2014.
- [10] A. Rustandi, B. Ramadhan, A. Fadhil y S. Setiawan, «Corrosion Behavior Comparison of Austenitic Stainless Steel 304l and 316l in Aqueous Sodium Chloride Solution by Using Electrochemical Impedance Spectroscopy,» *International Journal of*

Mechanical and Production Engineering (IJMPE), vol. 4, n° 12, pp. 70-74, 2016.

- [11] YU, Yang; et al., «Effect of chromium content on the corrosion resistance of ferritic stainless steels in sulfuric acid solution,» *Heliyon*, vol. 4, n° 11, p. e00958, 2018.
- [12] Ma, Mingyu, et al., «Effect of W and Ce additions on the electrochemical corrosion behaviour of 444-type ferritic stainless steel,» *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 53, n° 3, pp. 199-205, 2018.
- [13] A. D. Schino, «Corrosion behaviour of new generation super-ferritic stainless steels,» *AIMS Materials Science*, vol. 6, n° 5, p. 646, 2019.
- [14] SEO, Masahiro, et al., «The influence of minor alloying elements (Nb, Ti and Cu) on the corrosion resistivity of ferritic stainless steel in sulfuric acid solution,» *Corrosion Science*, vol. 26, n° 11, pp. 949-960, 1986.
- [15] FU, Junwei, et al., «Effect of Nb addition on the microstructure and corrosion resistance of ferritic stainless steel,» *Applied Physics A*, vol. 126, n° 3, pp. 1-12, 2020.
- [16] INDURA, S.A., «Manual de los aceros inoxidable,» *Cerrillos, Chile: 2M Impresores*, 2010.
- [17] R. Winston, *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*, John Wiley & Sons, 2008.
- [18] C. B. Martín, «arveng training & engineering,» 29 05 2019. [En línea]. Available: <https://arvengtraining.com/como-evitar-la-corrosion/>. [Último acceso: 2020 05 23].
- [19] C. P. Dillon, *Forms of Corrosion: Recognition and Prevention.*, Houston, Tex: NACE International, 1982.
- [20] Julian R. et al., «Heavy metal scaling and corrosion in geothermal heat exchanger,» de *Congreso Geotérmico mundial 2015*, 2015.

- [21] M. F. McGuire, «Stainless steels for design engineers,» *Asm International*, pp. 70-90, 2008.
- [22] F. Laque, *Marine corrosion: causes and prevention*, New York: John Wiley and Sons Inc., 1975.
- [23] E. A. E. Meguid, N. A. Mahmoud y V. K. Gouda, «Pitting corrosion behaviour of AISI 316L steel in chloride containing solutions,» *British corrosion journal*, vol. 33, nº 1, pp. 42-48, 1998.
- [24] Tomo, I.T.E.A. 22, «Aceros Inoxidables,» *Instituto técnico de la estructura en acero*.
- [25] Specialty Steel Industry of the United States, et al., *Design guidelines for the selection and use of stainless steel*, Specialty Steel Industry of the United States, 1993.
- [26] C.E.N.D.I., «Acero Inoxidable Clasificación y Características,» *Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable*.
- [27] J. E. Truman, «Corrosion: Metal/Environment Interaction,» *Newness-Butter-worths*, vol. 1, p. 352, 1976.
- [28] British Stainless Steel Association, «Classification of Stainless Steel Types,» *British Stainless Steel Association*, pp. 1-2, 2000.
- [29] B. Leffler, «Stainless steels and their properties,» *AvestaPolaritADB*, pp. 1-45, 1996.
- [30] Vander Voort, George F.; Lucas, Gabriel M.; Manivola, Elena P., «Metallography and microstructures of stainless steels and maraging steels,» *Materials Park, OH: ASM International*, vol. 9, pp. 670-700, 2004.
- [31] A.,Pardo, et al., «Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels—combining effects of Mn and Mo additions,» *Corrosion Science*, vol. 50, nº 6, pp. 1796-1806, 2008.

- [32] Flinox, «Productos en Aceros Inoxidables,» *FLINSA*.
- [33] K. W., Whitten, et al., «Química general,» de *Electroquímica*, McGraw-Hill, 1992, pp. 803-850.
- [34] M. Yris y H. Ricardo, *Electroquímica Energía y Ambiente*, Venezuela: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, 2005.
- [35] P., Herrasti, et al., *Experimentación en Química Física*, Universidad Autónoma de Madrid, 2003.
- [36] M. I. Tronco, *Estudio electroquímico de las interacciones formadas por el extracto activo de las hojas de Morinda citrifolia en la inhibición de la corrosión de acero estructural*, Universidad Autónoma del Estado de México, 2017.
- [37] G. S. Frankel, «Pitting corrosion of metals a review of the critical factors.,» *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 6, n° 145, pp. 2186-2198, 1998.
- [38] G. Fernandez, et al., «Corrosión por picadura de una tubería de acero al carbono,» *RDM: Revista de Minas*, n° 6, pp. 43-48, 1991.
- [39] A. N. Mendez, *Estudio Comparativo de dos aceros austeníticos mediante la técnica EPR (Reactivación electroquímica potencioquinética)*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1997.
- [40] K., Robert, et al., *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*, New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [41] M. Pourbaix, *Lecciones de corrosión electroquímica*, 3era edición, Instituto Español de Corrosión y Protección, 1987.
- [42] E. Otero, «Corrosión y degradación de materiales,» *Síntesis*, 1997, p. 36.

- [43] D. C. Cruz, Efecto del flujo turbulento en la corrosión de soldadura de aceros de alta resistencia, Universidad Veracruzana, 2013.
- [44] L., Bilurbina, et al., «Corrosión y protección,» Universidad Politécnica de Catalunya, 2003, pp. 74-76, 80-83.
- [45] Moosbrugger, Charles, et al., ASM Handbook, Corrosión: Fundamental, Testing and Protection, Materials Park, Ohio: ASM International, 2003.
- [46] K. Akpanyung y R. Loto, «Pitting corrosion evaluation: a review,» *Journal of Physics Conference Series*, n° 1378, 2019.
- [47] A. Sedriks, «Effects of Alloy Composition and Microstructure on the Passivity of Stainless Steels, Corrosion,» *NACE*, vol. 42, n° 7, pp. 376-389, 1986.
- [48] Z. E. Rosales, Evaluación de la velocidad de corrosión de un bronce de aluminio y los aceros austeníticos AISI/SAE 304 y 316 en medios ácido, básico y neutro con la técnica electroquímica de extrapolación de Tafel, Bogotá: Universidad de los Andes, 2009.
- [49] J. J. Bugeño, Estudio de la corrosión de acero al carbono AISI 1020 en soluciones cloradas y su dependencia con la rugosidad del material, Universidad de Chile, 2016.
- [50] P., Herrasti Gonzáles, et al., Experimentación en Química Física, Universidad Autónoma de Madrid, 2003.
- [51] International, ASTM G-59, Standar test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements, West Conshohocken, 2003.
- [52] R., Sampieri, et al., Metodología de la investigación (5ta. ed.), México: Mc Graw Hill, 2010.

- [53] R., Baboian, et al., Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation (Second Edition), ASTM, 2005.
- [54] H. G. Pulido, Análisis y diseño de experimentos (2da Edición), México: McGraw Hill, 2008.
- [55] M. D., Asaduzzaman, et al., «Effects of concentration of sodium chloride solution on the pitting corrosion behavior of AISI 304L austenitic stainless steel,» *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 17, nº 4, pp. 477-483, 2011.
- [56] R. D., Cuadrado, et al., Diseño y Construcción de un equipo trazador de curvas potencioestáticas y potenciodinámicas para pruebas de laboratorio que determinen el comportamiento de materiales en medios corrosivos, Cartagena: Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, 200.
- [57] L. F. Patiño, «Rugosímetros: Herramientas Sencillas para Grandes Resultados,» *Metal Actual*, pp. 44-49.
- [58] Euro Inox, «Stainless Steel: Tables of Technical Properties (Second Edition),» *Euro Inox*, vol. 5, pp. 1-22, 2007.
- [59] B. Bushan, Modern tribology handbook, two volume set, CRC Press LLC, 2000.

ANEXOS

ANEXO 1: Propiedades mecánicas de productos planos de aceros inoxidables

| Clase | Designación | | Forma de producto | Espesor mm | Tratamiento térmico | Limite elástico a la tensión (convencional al 2%) | Resistencia a la tensión | Elongación en 2% | Dureza | |
|--------------|-------------|-----------|-------------------|---------------|---------------------|--|-----------------------------|---------------------|--------|---------|
| | EN [N°] | AISI/ASTM | | | | Mpa | Mpa | % | HRB | HB o HV |
| AUSTENÍTICOS | 1,4372 | 201 | C | 8 | AT | 350 | 750 - 950 | 45 | 90 | 241 |
| | | | H | 13.5 | | 330 | | 40 | | |
| | | | P | 75 | | 330 | | | | |
| | 1,4373 | 202 | C | 8 | AT | 340 | 680 - 880 | 45 | 90 | 241 |
| | | | H | 13.5 | | 320 | | | | |
| | | | P | 75 | | 320 | 600 - 800 | 35 | | |
| | 1,4310 | 301 | C | 8 | AT | 250 | 600 - 950 | 40 | 85 | 217 |
| | 1,4301 | 304 | C | 8 | AT | 230 | 540 - 750 | 45 | 80 | |
| | | | H | 13.5 | | 210 | 520 - 720 | | 80 | |
| | | | P | 75 | | 210 | 45 | 149 | | |
| | 1,4307 | 304L | C | 8 | AT | 220 | 520 - 700 | 45 | 79 | |
| | | | H | 13.5 | | 200 | | | 79 | |
| | | | P | 75 | | 200 | 500 - 700 | | 143 | |
| | 1,4436 | 316 | C | 8 | AT | 240 | 550 - 700 | 40 | 79 | |
| | | | H | 13.5 | | 220 | | | 79 | |
| | | | P | 75 | | 220 | 530 - 730 | | 149 | |
| | 1,4404 | 316L | C | 8 | AT | 240 | 530 - 680 | 40 | 79 | |
| | | | H | 13.5 | | 220 | | | 79 | |
| | | | P | 75 | | 220 | 520 - 670 | | 45 | |
| | 1,4438 | 317L | C | 8 | AT | 240 | 550 - 700 | 35 | | 217 |
| H | | | 13.5 | 220 | | 85 | | | | |
| P | | | 75 | 220 | | 520 - 720 | 40 | | 85 | |
| 1,4550 | 347 | C | 8 | AT | 220 | 520 - 720 | 40 | 85 | | |
| | | H | 13.5 | | 200 | | | 85 | | |
| | | P | 75 | | 200 | 500 - 700 | | 160 | | |
| 1,4539 | 904L | C | 8 | AT | 240 | 530 - 730 | 35 | 90 | | |
| | | H | 13.5 | | 220 | | | | | |
| | | P | 75 | | 220 | 520 - 720 | | | | |

Adaptado de Euro Inox: The European Stainless Steel Development Association [60].

| Clase | Designación | | Forma de producto | Espesor mm | Tratamiento térmico | Limite elástico a la tensión (convencional al 2%) Mpa | Resistencia a la tensión Mpa | Elongación en 2% % | Dureza | |
|------------|-------------|-----------|-------------------|---------------|---------------------|---|------------------------------------|--------------------------|--------|---------|
| | EN [N°] | AISI/ASTM | | | | | | | HRB | HB o HV |
| DÚPLEX | 1,4462 | 2205 | C | 8 | AT | 500 | 700 - 950 | 20 | 31 | 293 |
| | | | H | 13.5 | | 460 | | 25 | | |
| | | | P | 75 | | 460 | 520 - 720 | 25 | | |
| | 1,4362 | 2304 | C | 8 | AT | 450 | 650 - 850 | 20 | 32 | 290 |
| | | | H | 13.5 | | 400 | | 25 | | |
| | | | P | 75 | | 400 | 630 - 800 | 25 | | |
| | 1,4410 | 2507 | C | 8 | AT | 550 | 750 - 1000 | 15 | 32 | 310 |
| | | | H | 13.5 | | 530 | | 20 | | |
| | | | P | 75 | | 530 | 730 - 930 | 20 | | |
| | 1,4507 | 255 | C | 8 | AT | 550 | 750 - 1000 | 17 | 32 | 302 |
| | | | H | 13.5 | | 530 | | 25 | | |
| | | | P | 75 | | 530 | 730 - 930 | 25 | | |
| FERRÍTICOS | 1,4512 | 409 | C | 8 | A | 220 | 380 - 560 | 25 | 75 | |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | 1,4016 | 430 | C | 8 | A | 280 | 450 - 600 | 20 | 85 | |
| | | | H | 13.5 | | 260 | | 18 | | |
| | | | P | 25 | | 260 | 430 - 630 | 20 | | 160 |
| | 1,4113 | 434 | C | 8 | A | 280 | 450 - 630 | 18 | 83 | |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | 1,4113 | 439 | C | 8 | A | 240 | 420 - 600 | 23 | 89 | 183 |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | 1,4521 | 444 | C | 8 | A | 320 | 420 - 640 | 20 | 96 | 217 |
| | | | H | 13.5 | | 300 | 400 - 600 | | | |
| | | | P | 13.5 | | 300 | 420 - 620 | | | |
| 1,4526 | 436 | C | 8 | A | 300 | 480 - 560 | 25 | | | |
| 1,4749 | 446 | C | 12 | A | 280 | 480 - 560 | 13 | | 212 | |

Adaptado de Euro Inox: The European Stainless Steel Development Association [60].

| Clase | Designación | | Forma de producto | Espesor mm | Tratamiento térmico | Limite elástico a la tensión (convencional al 2%) Mpa | Resistencia a la tensión Mpa | Elongación en 2% % | Dureza | |
|-------------------------------|-------------|-----------|-------------------|---------------|---------------------|---|------------------------------------|--------------------------|---------|-----------|
| | EN [N°] | AISI/ASTM | | | | | | | HRB | HB o HV |
| MARTENSÍTICOS | 1,4006 | 410 | C | 8 | A | 205 | máx 600 | 20 | 90 | 200 |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | | | P | 75 | QT550 | 400 | 550 - 750 | 15 | | |
| | | | | | QT650 | 450 | 650 - 850 | 12 | | |
| | 1,4021 | 420 | C | 3 | QT | | | | 44 - 50 | 440 - 530 |
| | | | C | 8 | A | 345 | máx 700 | 15 | 95 | 225 |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | | | P | 75 | QT550 | 450 | 650 - 850 | 12 | | |
| | QT650 | 550 | | | 750 - 950 | 10 | | | | |
| | 1,4034 | 420 | C | 8 | A | 345 | máx 780 | 12 | 99 | 245 |
| | | | H | 13.5 | | | | | | |
| | 1,4419 | | C | 3 | QT | | | | 46 - 52 | 450 - 560 |
| | | | C | 4 | A | | máx 760 | 15 | 97 | 235 |
| | | | H | 6,5 | | | | | | |
| 1,4422 | | H | 13,5 | A | 550 | 750 - 950 | 15 | 100 | 300 | |
| | | P | 75 | QT650 | | | | | | máx 300 |
| ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN | 1,4542 | 630 | C | 8 | AT | 1000 | ≤ 1275 | 5 | 35 | |
| | | | | | P1300 | 1150 | ≥ 1300 | 3 | | |
| | | | | | P900 | 700 | ≥ 900 | 6 | | |
| | | | P | 50 | P1070 | 1000 | 1070 - 1270 | 8 | | |
| | | | | | P950 | 800 | 950 - 1150 | 10 | | |
| | | | | | P850 | 600 | 850 - 1050 | 12 | | |
| | | | SR630 | | ≤ 1050 | | | | | |
| | 1,4568 | 631 | C | 8 | AT | máx 380 | ≤ 1030 | 19 | 92 | |
| P1450 | | | | | 1310 | ≥ 1450 | 2 | | | |

Adaptado de Euro Inox: The European Stainless Steel Development Association [60].

Notas:

- C = Tira laminada en frío; H = Tira laminada en caliente; P = Placa laminada en caliente.
- A = Recocido; QT = Templado y revenido; AT = Solución recocida; P = Endurecido por precipitación; SR = Alivio de esfuerzos

ANEXO 2: Tabla de grados de rugosidad

| Rango de valores R_a en μm | Numero de grado de Rugosidad |
|--|---------------------------------|
| 0.025 - 0.05 | N1 |
| 0.05 - 0.1 | N2 |
| 0.1 - 0.2 | N3 |
| 0.2 - 0.4 | N4 |
| 0.4 - 0.8 | N5 |
| 0.8 - 1.6 | N6 |
| 1.6 - 3.2 | N7 |
| 3.2 - 6.3 | N8 |
| 6.3 - 12.5 | N9 |
| 12.5 - 25.0 | N10 |
| ≥ 25.0 | N11 |

Adaptado de Modern Tribology Handbook, two volumen set [59]

ANEXO 3: Curvas de polarización potenciodinámicas

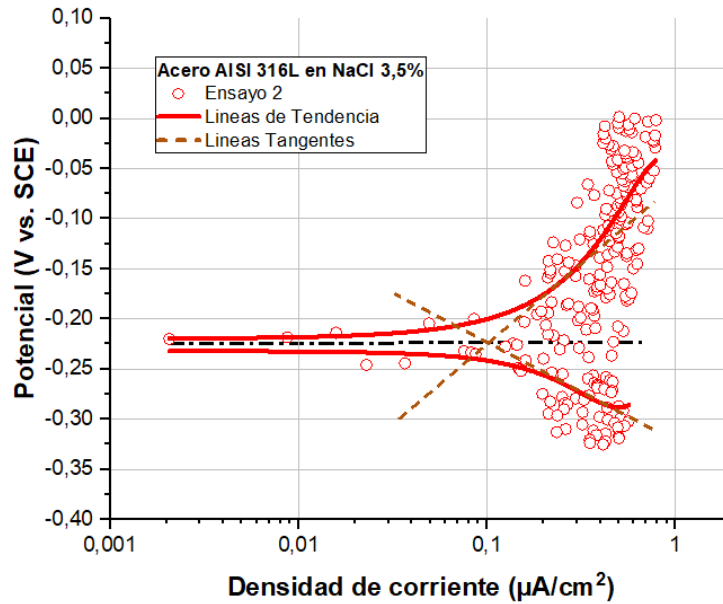


Figura A.1 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 2)

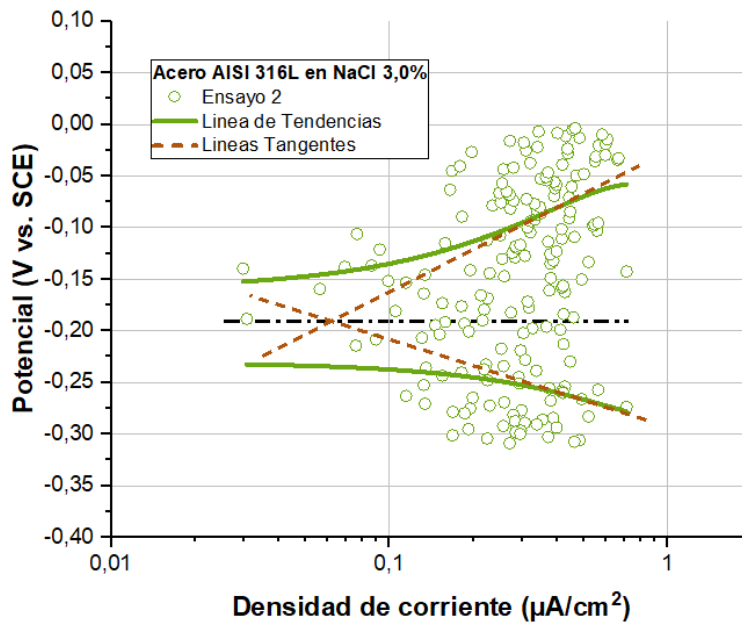


Figura A.2 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 316L en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 2)

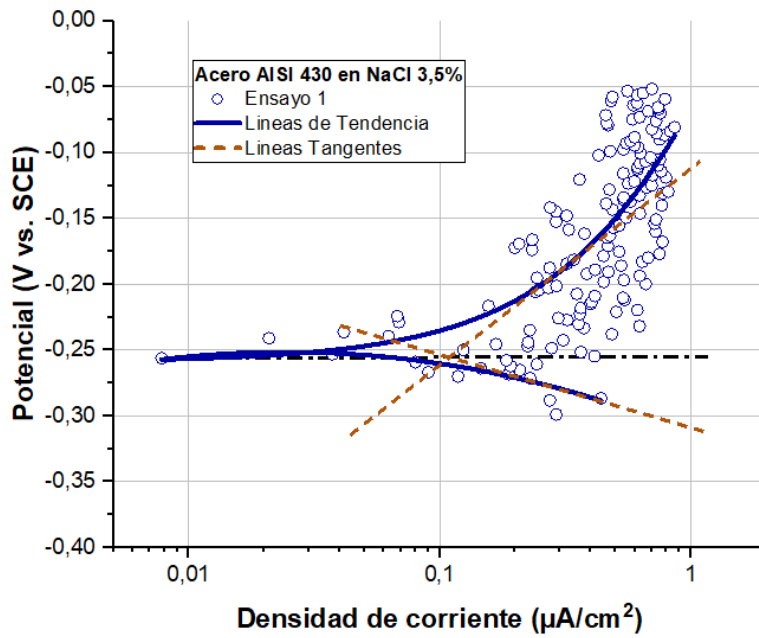


Figura A.3 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.5% (Ensayo 1)

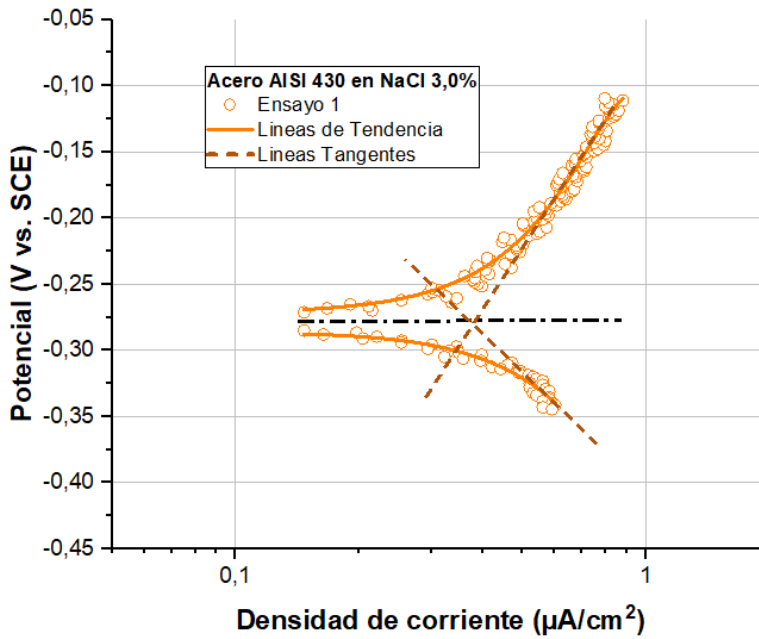


Figura A.4 Curva de polarización potenciodinámica para la muestra de acero inoxidable AISI 430 en solución de NaCl 3.0% (Ensayo 1)

ANEXO 4: Superficie de las muestras AISI 316L y AISI 430 en un aumento de 15x

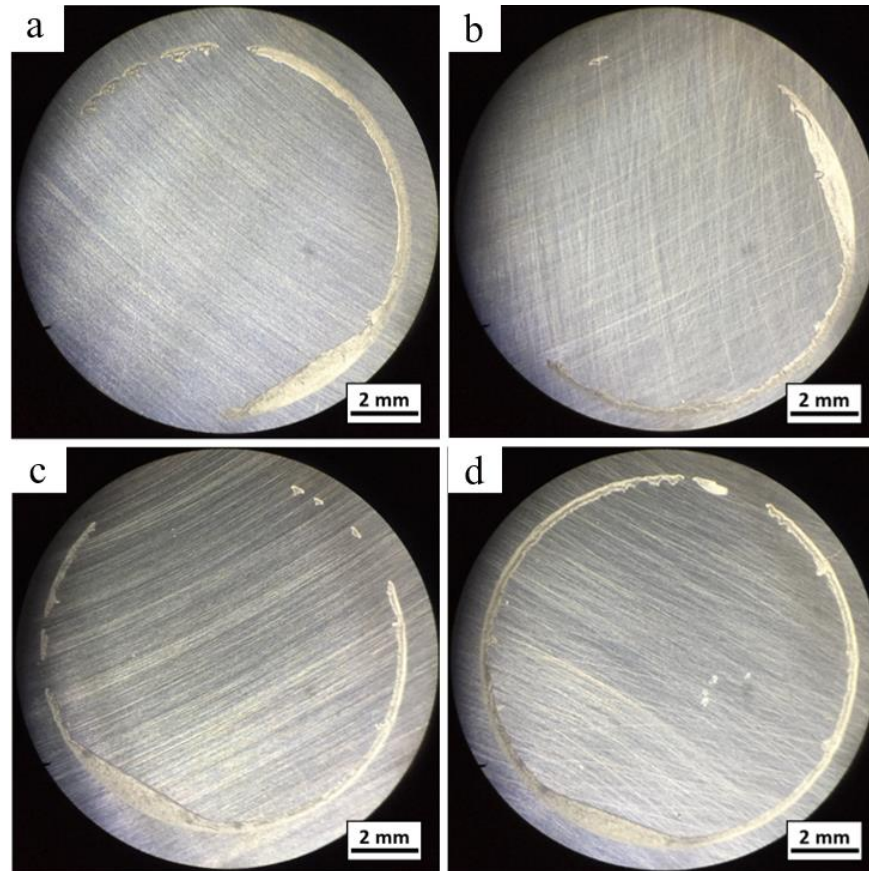


Figura B.1 Superficie de las muestras posterior a los ensayos potenciodinámicos en aumento de 15x. Acero inoxidable AISI 316L en solución de (a) NaCl 3.5% y (b) NaCl 3.0%; Acero inoxidable AISI 430 en solución de (c) NaCl 3.5% y (d) NaCl 3.0%