



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“EFECTOS DEL CARBONATO Y BICARBONATO EN LA
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN ACEROS API 5L CON
TRATAMIENTOS TERMICOS DE RECOCIDO, NORMALIZADO
Y BONIFICADO.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: JAIME ENRIQUE CHULCO YANCHA

JEFFERSON MIGUEL TACURI TROYA

DIRECTOR: Ing.MsC. MÓNICA ALEXANDRA MORENO BARRIGA

Riobamba-Ecuador

2021

©2021, Chulco Yancha Jaime Enrique; & Tacuri Troya Jefferson Miguel

El trabajo de grado es original, basado en la investigación y adaptación tecnológica, planteada en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Nosotros, Chulco Yancha Jaime Enrique y Tacuri Troya Jefferson Miguel, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados de este son auténticos y originales. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 04 de marzo del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jefferson Miguel Tacuri Troya', written in a cursive style.

Jaime Enrique Chulco Yancha

180328385-0

Jefferson Miguel Tacuri Troya

172137686-

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, **EFFECTOS DEL CARBONATO Y BICARBONATO EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN ACEROS API 5L CON TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO, NORMALIZADO Y BONIFICADO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza Su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. MsC. Edwin Fernando Viteri Nuñez		
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	<u>2021-03-04</u>
Ing. MsC. Mónica Alexandra Moreno Barriga		
DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	<u>2021-03-04</u>
Ing. MsC. Lidia del Rocío Castro Cepeda		
MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	<u>2021-03-04</u>

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a Dios, por ser parte fundamental en mi camino, además de inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso para obtener una meta anhelada. A mis amados padres, Blas Chulco y María del Carmen Yancha, que, con su esfuerzo, apoyo incondicional, trabajo y sacrificio han sido pilar fundamental, mi ejemplo de lucha y persistencia para lograr este objetivo, además de su tiempo y amor incondicional.

A mi hermano, por su confianza, apoyo en todo momento, fue primordial para cumplir esta meta, gracias a mi novia que, con sus palabras de aliento, siempre estar en todo momento, más aún en los momentos difíciles, fue fundamental para alcanzar esta meta.

Jaime

Dedicado a mi madre, parte fundamental de este proceso que está en los buenos y malos momentos de mi vida y a mi padre que con su fortaleza lucho hasta dejar este mundo terrenal, a mi familia que es un apoyo incondicional y a mis amigos que convivimos varios años de amistad, forjando lazos inquebrantables.

Jefferson

AGRADECIMIENTO

A mi familia por, haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido un apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a las docentes Ing. Mónica Moreno, Ing. Lidia Castro, Ing. Nestor Ulloa, Ing. Julio Villavicencio, quien con su experiencia, tiempo y motivación me orientaron en esta investigación.

A todas aquellas personas que hicieron posible la realización de las pruebas mecánicas y químicas del proyecto, en especial Laboratorio de Metalurgia y Metalografía de la facultad de Mecánica.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a todos los docentes por la formación brindada durante mi carrera.

Jaime

Agradeciendo a Dios por darme la sabiduría y confianza para culminar esta gran etapa de mi vida. A mi madre una mujer trabajadora, decidida y que ha luchado durante toda su vida para darnos lo mejor, la educación, que gracias a sus palabras de aliento y fuerza forjaron un carácter robusto para salir del hogar en busca de una educación superior, agradezco a mis hermanas y hermano por siempre contar con su apoyo y con unas palabras de ánimo, gracias también a los docentes que hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación.

Jefferson

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XX
RESUMEN.....	XIVXI
SUMMARY/ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	3
1.1 Problematización.....	3
1.2 Justificación.....	3
1.3 Alcance.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 <i>Aceros</i>	5
1.5.2 <i>Acero de baja aleación</i>	6
1.5.2.1 <i>Acero API 5L</i>	7
1.5.3 <i>Tratamientos térmicos en los aceros</i>	10
1.5.3.1 <i>Recocido</i>	11
1.5.3.2 <i>Normalizado</i>	13

1.5.3.3	Temple.....	15
1.5.3.4	Revenido.....	17
1.5.3.5	Bonificado.....	18
1.6	Corrosión	19
1.6.1	Corrosión química.....	20
1.6.2	Corrosión electroquímica.....	21
1.6.2.1	Reacción anódica.....	21
1.6.2.2	Reacción catódica	22
1.6.3	Formas de corrosión.....	23
1.6.3.1	Corrosión uniforme.....	23
1.6.3.2	Corrosión localizada o puntual.....	24
1.6.4	Causas principales de la corrosión interna en las tuberías.....	27
1.6.4.1	Corrosión por CO ₂ (Corrosión dulce).....	28
1.6.4.2	Corrosión por H ₂ S (Corrosión Agria).....	29
1.7	Leyes de Faraday para determinar la tasa de corrosión.....	29
1.7.1	Primera ley.....	29
1.7.2	Segunda Ley.....	30
1.8	Aplicación de la primera y segunda ley de Faraday para la evaluación de	30
	la tasa de corrosión.....	
1.9	Técnicas para la evaluación de la corrosión.....	31
1.9.1	Polarización lineal (LPR).....	31
1.9.2	Extrapolación de Tafel.....	32
1.9.3	Circuito de potencial abierto (OCP).....	34
1.9.4	Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	34
1.10	Técnicas de caracterización.....	35
1.10.1	Espectrometría de emisión óptica (OES).....	35
1.10.2	Microscopia	36
1.10.3	Dureza	36
1.10.3.1	Dureza Brinell.....	37
1.10.3.2	Dureza Vickers	37
 CAPITULO II		
2.	MARCO METODOLÓGICO.....	38

2.1	Tipo y nivel de investigación.....	38
2.2	Descripción de la investigación.....	38
2.2.1	<i>Metodología.</i>	38
2.2.2	<i>Descripción de la metodología.</i>	39
2.3	Población y muestra.....	39
2.4	Materiales.	42
2.5	Tratamientos térmicos.....	47
2.5.1	<i>Recocido.</i>	47
2.5.2	<i>Normalizado</i>	48
2.5.3	<i>Bonificado</i>	48
2.6	Preparación de las soluciones.	48
2.6.1	<i>Elaboración del agua de mar sintética.</i>	48
2.6.2	<i>Elaboración de la solución de neutralización.</i>	50
2.6.3	<i>Saturación del electrolito con CO₂.</i>	50
2.7	Alcalinización del electrolito.....	51
2.8	Caracterización de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.....	52
2.8.1	<i>Análisis metalográfico de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.</i>	53
2.8.1.1	<i>Caracterización de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B mediante espectrometría.</i>	53
2.8.1.2	<i>Microscopia óptica y análisis SEM.</i>	53
2.8.2	<i>Análisis de resistencia a la indentación (dureza).</i>	53
2.8.3	<i>Ensayos de impacto.</i>	54
2.8.4	<i>Ensayos electroquímicos en los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.</i>	54
2.8.5	<i>Celda de corrosión.</i>	54
2.8.6	<i>Parámetros experimentales utilizados en los ensayos de corrosión.</i>	55
2.8.7	<i>Mediciones electroquímicas en los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.</i>	56
2.9	Evaluación de la corrosión.	57
 CAPITULO III		
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58

3.1	Microscopía óptica del acero API 5L X42.....	58
3.2	Microscopía óptica del acero API 5L Grado B.	62
3.3	Ensayo de Dureza	67
3.3.1	<i>Ensayo de Dureza Vickers</i>	67
3.3.2	<i>Ensayo de Dureza Brinell.....</i>	68
3.4	Ensayos de Impacto	70
3.5	Mediciones de pH y temperatura	71
3.6	Ensayo de corrosión.....	72
3.6.1	<i>Voltamperometría de barrido lineal.....</i>	72
3.6.2	<i>Evaluación de la tasa de corrosión.</i>	78
3.6.3	<i>Evaluación de los productos de corrosión.....</i>	81
	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES	98

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Requisitos químicos para el análisis de calor y productos por porcentaje del acero.	8
Tabla 2-1: Requisitos generales de las propiedades mecánicas del ACERO API 5L.	9
Tabla 3-1: Microestructuras óptimas para diferentes concentraciones de carbono en diferentes tratamientos térmicos.	15
Tabla 1-2: Medida promedio realizada para cada tratamiento térmico del acero API 5L.....	40
Tabla 2-2: Procedimiento para la evaluación de muestras y análisis mediante el grado de libertad.	41
Tabla 3-2: Reactivos y compuestos necesarios para la elaboración, análisis del proceso.....	42
Tabla 4-2: Equipos de laboratorio utilizados en el análisis del ensayo corrosivo.....	45
Tabla 5-2: Materiales de laboratorio necesarios para la preparación y evaluación del electrolito.....	47
Tabla 6-2: Composición química y parámetros de agua extraída del campo petrolífero.	49
Tabla 7-2: Composición química del agua de mar sintético.....	49
Tabla 8-2: Condiciones necesarias para el intercambio de iones OH^-	51
Tabla 1-3: Microestructura del material suministro en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	59
Tabla 2-3: Microestructura del material con tratamiento de recocido en aumentos de 20X, 50X, 100X.	60
Tabla 3-3: Microestructura del material con tratamiento de normalizado en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	61
Tabla 4-3: Microestructura del material con tratamiento de bonificado en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	62
Tabla 5-3: Microestructura del material suministro en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	63

Tabla 6-3: Microestructura del material con tratamiento de recocido en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	64
Tabla 7-3: Microestructura del material con tratamiento de normalizado en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	65
Tabla 8-3: Microestructura del material con tratamiento de bonificado en aumentos de 20X, 50X, 100X.....	66
Tabla 9-3: Resultados de dureza vickers promedio para las probetas API 5L X42 de suministro, recocido, normalizado, bonificado.....	67
Tabla 10-3: Resultados de dureza vickers promedio para las probetas API 5L GRADO B, con tratamientos de suministro, recocido, normalizado, bonificado	68
Tabla 11-3: Resultados de los ensayos de dureza brinell aplicados en las probetas de acero API 5L X42.....	69
Tabla 12-3: Resultados de los ensayos de dureza brinell aplicados en las probetas de acero API 5L GRADO B.	70
Tabla 13-3: Resultados de los ensayos de impacto realizados en probetas de acero API 5L X42.	71
Tabla 14-3: Resultados de los ensayos de impacto realizados en probetas de acero API 5L GRADO B.....	71
Tabla 15-3: Valores de ph promedio para las probetas de análisis: suministro, normalizado, recocido y bonificado del acero API 5L X42.	72
Tabla 16-3: Valores de pH promedio para las probetas de análisis: suministro, normalizado, recocido y bonificado del acero API 5L GRADO B.....	72
Tabla 17-3: Tasas de corrosión para tratamiento de suministro del acero API 5L X42.....	79
Tabla 18-3: Tasas de corrosión para tratamiento de normalizado del acero API 5L X42.....	79
Tabla 19-3: Tasas de corrosión para tratamiento de recocido del acero API 5L X42.....	80
Tabla 20-3: Tasas de corrosión para tratamiento de bonificado del acero API 5L X42.	80
Tabla 21-3: Tasas de corrosión para tratamiento de suministro del acero API 5L GRADO B.	80
Tabla 22-3: Tasas de corrosión para tratamiento de normalizado del acero API 5L GRADO B.	80

Tabla 23-3: Tasas de corrosión para tratamiento de recocido del acero API 5L GRADO B.....	80
Tabla 24-3: Tasas de corrosión para tratamiento de bonificado del acero API 5L GRADO B.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Diagrama de equilibrio de fases Fe-C.....	5
Figura 2-1: Composición y temperatura eutectoide influidas en diversos elementos de aleación.	6
Figura 3-1: Representación esquemática del cambio microestructural del acero.	10
Figura 4-1: Esquema del objetivo del tratamiento térmico de recocido.....	11
Figura 5-1: Transformación de la microestructura de un acero 0,45 wt. % c durante el recocido.	12
Figura 6-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T. (tratamiento térmico) de recocido	12
Figura 7-1: Ciclo térmico para los aceros a) hipoeutectoide b) hipereutectoide.	13
Figura 8-1: Región de temperaturas de tratamiento térmico del acero.	14
Figura 9-1: Ciclo térmico en un T.T. de normalizado.....	14
Figura 10-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de temple.	16
Figura 11-1: Generalidades del T.T. de temple.	17
Figura 12-1: Efectos del revenido.	17
Figura 13-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de temple y revenido.....	18
Figura 14-1: Características mecánicas en estado de bonificado.	19
Figura 15-1: Tratamiento térmico del acero.....	19
Figura 16-1: Clasificación de la corrosión.	20
Figura 17-1: Ley parabólica del crecimiento de la capa de óxido.	21
Figura 18-1: Reacción anódica-disolución del hierro.....	22
Figura 19-1: Reacción catódica- desprendimiento del hidrógeno sobre el hierro sumergido en una solución ácida.	23

Figura 20-1: Diferentes formas de corrosión localizada	24
Figura 21-1: Pitting para un acero inoxidable.	25
Figura 22-1: Corrosión por grieta para a) acero inoxidable b) cobre.....	25
Figura 23-1: Serie galvánica en agua de mar.	26
Figura 24-1: Condiciones ideales para albergar colonias de bacterias anaeróbicas.	26
Figura 25-1: Aireación diferencial en una junta atornillada.....	27
Figura 26-1: Corrosión causada por CO ₂	28
Figura 27-1: Corrosión por H ₂ S.....	29
Figura 28-1: Extrapolación de TAFEL	33
Figura 29-1: Extrapolación de TAFEL catódica.	33
Figura 30-1: OCP de varios recubrimientos.....	34
Figura 31-1: Funcionamiento del OES de chispa.....	36
Figura 1-2: Diagrama de metodología del proyecto.	39
Figura 2-2: Equilibrio carbonato-bicarbonato.	51
Figura 3-2: Electrolito con una solución de 0,1 N de NaOH.	52
Figura 4-2: Diagrama pH-potencial Fe.	55
Figura 5-2: Conexión de la celda de corrosión.....	56
Figura 6-2: Equipo de para ensayos electroquímicos.	56
Figura 1-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta suministro API 5L X42.....	82
Figura 2-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta normalizado API 5L X42.....	83
Figura 3-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta recocido API 5L X42.....	84

Figura 4-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta bonificado API 5L X42.....	85
Figura 5-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta suministro API 5L GRADO B.	86
Figura 6-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta normalizado API 5L GRADO B.	87
Figura 7-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta recocido API 5L GRADO B.	88
Figura 8-3: Análisis eds para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta bonificado API 5L GRADO B.	89

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Curvas características para análisis de varianza.....	41
Gráfico 1-3:	Curva de polarización de la probeta suministro acero API 5L X42.....	73
Gráfico 2-3:	Curva de polarización de la probeta normalizado acero API 5L X42.....	73
Gráfico 3-3:	Curva de polarización de la probeta recocido acero API 5L X42.....	74
Gráfico 4-3:	Curva de polarización de la probeta bonificado acero API 5L X42.....	74
Gráfico 5-3:	Curva de polarización de la probeta suministro acero API 5L GRADO B.	76
Gráfico 6-3:	Curva de polarización de la probeta normalizado acero API 5L GRADO B.	76
Gráfico 7-3:	Curva de polarización de la probeta recocido acero API 5L GRADO B.	77
Gráfico 8-3:	Curva de polarización de la probeta bonificado acero API 5L GRADO B.	77
Gráfico 9-3:	Resultado de la espectrometría de rayos x, evidenciando los productos de corrosión para la probeta suministro API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,3$	83
Gráfico 10-3:	Resultado de la espectrometría de rayos x, evidenciando los productos de corrosión para la probeta normalizado API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un p de $7\pm 0,3$	84
Gráfico 11-3:	Resultado de la espectrometría de rayos x, evidenciando los productos de corrosión para la probeta recocido API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,3$	85
Gráfico 12-3:	Resultado de la espectrometría de rayos x, evidenciando los productos de corrosión para la probeta bonificado API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,3$	86
Gráfico 13-3:	Curvas de polarización del acero API 5L X42 a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado.....	91
Gráfico 14-3:	Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en el acero API 5L X42.	92

Gráfico 15-3: Curvas de polarización del acero API 5L GRADO B a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado.....	94
Gráfico 16-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en el acero API 5L GRADO B.	95

LISTADO DE ABREVIACIONES

ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
SEM	Microscopio Electrónico de Barrido
EDS	Espectroscopia de Rayos X con Dispersión de Energía
XRD	Difracción de rayos X
CR	Velocidad de corrosión
SR	Radio de saturación
MPY	Milipulgadas por año
OCP	Potencial de circuito abierto

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ENSAYOS DE DUREZA BRINELL ACERO API 5L X42

ANEXO B: ENSAYOS DE DUREZA BRINELL ACERO API 5L GRADO B

ANEXO C: ENSAYOS DE DUREZA VICKERS ACERO API 5L X42

ANEXO D: ENSAYOS DE DUREZA VICKERS ACERO API 5L GRADO B

ANEXO E: ENSAYOS DE IMPACTO ACERO API 5L X42

ANEXO F: ENSAYOS DE IMPACTO ACERO API 5L GRADO B

RESUMEN

Este documento analiza los efectos de los carbonatos y bicarbonatos en la resistencia a la corrosión para aceros API 5L X42 y Grado B, debido a la acción corrosiva por condensación de CO₂ al mezclarse con agua líquida o vapor, dichos aceros se sometieron a tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado, se comparó entre estos y el material de suministro con el fin de encontrar diferencias microestructurales, así como la formación de carbonatos o bicarbonatos en la superficie ensayada por medio del SEM, se realizaron ensayos de Dureza Vickers bajo NTE INEN ISO 6507-1 e impacto bajo norma ASTM E23, así como ensayos de corrosión, realizando una saturación de CO₂ durante 1 hora al 99.9%, un electrolito bajo norma ASTM D-1141, mediante una celda electroquímica Metrohm Autolab con capacidad de 1L bajo norma ASTM G5, un Potenciostato/Galvanostato PGSTAT204 Metrohm Autolab, por último para el análisis se usó el Software NOVA 2.1. A partir de estos ensayos, como se esperaba al realizar un tratamiento térmico la dureza y la capacidad de absorber energía durante un impacto varían para todos los tratamientos térmicos con respecto al material de suministro, además se obtuvo que el acero API 5L X42 normalizado presenta una mejora considerable del 2.54% en la resistencia a la corrosión con respecto al suministro; el acero API 5L Grado B mejora en un 46.47% con respecto al normalizado. En conclusión, el acero API 5L Grado B bonificado es el que presenta una mejor resistencia a la corrosión debido a la formación de Carbonatos de Calcio y Carbonatos de Hierro, comprobados por medio de un EDS, se forma una fina capa de carbonatos sobre la superficie de los materiales. Como recomendación crear nuevas ramas de investigación donde la temperatura y el electrolito sean diferentes para relacionarlos y sacar nuevas conclusiones.

Palabras clave: <CIENCIA DE LA INGENIERÍA>, <CORROSIÓN>, <RESISTENCIA A LA CORROSIÓN>, <RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL>, <EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL>, <REACCIÓN ANÓDICA>, <REACCIÓN CATÓDICA>, <ENSAYO ACELERADO>.



25-03-2021

0847-DBRAI-UTP-2021

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

El acero es un material de gran importancia a nivel mundial, debido a la facilidad de obtenerlo de modo que ha sido utilizado en la gran mayoría de industrias como: automotriz, petrolera, química, naval, construcción entre otras.

Debido a sus propiedades mecánicas el acero ha sido empleado en las operaciones de extracción y transporte de petróleo y gas, en la fabricación de tuberías, bombas, válvulas, varillas de bombeo, etc. Al ser utilizadas en medios como el agua salina, sulfuros y cloruros disueltos, además de gases como el CO_2 , se ven afectados por el ataque corrosivo, es decir, al tener el hierro con un potencial negativo provocando la donación de electrones, más la presencia de cloruros que actúa sobre la superficie del material, provocan el proceso de corrosión.

La corrosión tiene impacto negativo en toda infraestructura industrial, por lo que en toda empresa conlleva un gasto adicional con el fin de mitigar la tasa de degradación del material, por esta razón, se emplea diferentes métodos como inhibidores, recubrimientos, protecciones catódicas, pasivadores, por mencionar algunos.

Según el artículo, *“Molecule adsorption and corrosion mechanism of steel under protection of inhibitor in a simulated concrete solution with 3.5% NaCl”* (Zhang, 2018). Proponen un mecanismo de corrosión para el acero, en el que se discute un usual comportamiento del acero al carbono, bajo la protección de un inhibidor como lo es el triazol. Los investigadores concluyeron: en el proceso de corrosión existe la presencia de iones como Na^+ , K^+ , Mg^+ , Ca^+ Cl^- además de iones sulfato y la presencia de gases como H_2S y CO_2 , los mismos que son la principal razón de pérdida de material en tuberías, debido a la degradación de material, adicionalmente proponen que la molécula de triazol puede ser un inhibidor efectivo para resistir el ataque de iones Cl^- que se presentan en el proceso de corrosión y por lo tanto incrementa la vida útil del acero.

Por otra parte, en el artículo, *“Assessment and influence of temperature, NaCl and H₂S on CO₂ corrosion behavior of different microstructures of API 5L X52 carbon steel in aqueous environments”* (Hooman & Mehdi, 2019), se evalúan el efecto de cuatro tipos de microestructuras incluido el recocido, templado-normalizado y templado en las propiedades sobre el comportamiento a la corrosión por CO_2 del acero API 5L X55 en un ambiente acuoso con concentraciones de NaCl y gas H_2S , la investigación concluye: las microestructuras que contienen un mayor porcentaje de perlita muestran mayor resistencia a la corrosión y que la influencia de la concentración de NaCl en el comportamiento a la corrosión en cada microestructura no fue significativa además también manifiestan que a bajas concentraciones de H_2S se evidencia la formación de FeS como producto de corrosión.

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo analizar los efectos de los carbonatos y bicarbonatos en la resistencia a la corrosión de aceros API 5L, aplicando tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado. La evaluación de las propiedades mecánicas y metalográficas permite establecer el mejor tratamiento térmico realizado al material que brinde las mejores propiedades ante la corrosión del mismo.

De acuerdo con un estudio realizado en el 2010, la corrosión es causante del 65% de fallas internas y externas en tuberías de recolección de crudo (Melo, 2017), datos que conlleva mayores gastos en mantenimiento y reparación de los sistemas de tubería, por no mencionar la para total o parcial de la producción que afecta a la economía de empresas públicas o privadas, así como el daño al medio ambiente por el derrame de petróleo en zonas rurales, afectando a la biodiversidad.

Al llevar a cabo la investigación, se obtiene las velocidades de corrosión dependientes de un electrolito que simule las condiciones de extracción y conducción de crudo, dicho dato se puede correlacionar en el control de la integridad de la tubería y por lo tanto evaluar un tratamiento térmico adecuado que disminuya el proceso de corrosión.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO REFERENCIAL

1.1 Problematización

La corrosión, es una de las principales causas de falla en las tuberías de aceros al carbono en especial en aceros microaleados utilizados en la industria de transporte de hidrocarburos en el Ecuador, la mayoría de estos aceros sufren de corrosión dulce ocasionada por el CO₂, provocando así, pérdidas económicas por mantenimiento y sustitución completa de tramos de tuberías. Por lo tanto, esta investigación plantea contribuir al estudio de la resistencia a la corrosión por CO₂ que presentan estos tipos de aceros, con la finalidad de encontrar las condiciones microestructurales que presenten mayor resistencia a la corrosión, para ello se analiza 3 tratamientos térmicos: recocido, normalizado y bonificado.

1.2 Justificación

La investigación aporta y genera conocimientos sobre los efectos de los carbonatos y bicarbonatos en la resistencia a la corrosión en aceros API 5L con tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado, para lo cual se emplea métodos experimentales que permite encontrar los tratamientos térmicos que mejoren las propiedades de la resistencia a la corrosión.

A fin de mejorar la resistencia a la corrosión por CO₂ en este tipo de aceros es necesario recrear o aproximar las condiciones de trabajo, para ello es necesario aplicar inicialmente una serie de tratamientos térmicos a probetas de aceros caracterizados como API 5L, utilizados en las tuberías de transporte en la industria hidrocarburífera del Ecuador y del mundo, se emplea procedimientos experimentales y cuantitativos, estos resultados sirven como fundamentos experimentales para trabajos con similares parámetros en los que se busque crear opciones para mitigar el proceso de corrosión por CO₂ en los aceros API 5L y de comprobar su viabilidad, usarse en la industria petrolífera y en industrias con similares características de trabajo.

Dicha investigación surge a partir de las necesidades de la industria por conocer el tratamiento que presente mejor eficiencia ante la corrosión por CO₂, brindando a la empresa petrolífera la

oportunidad de mitigar o minimizar la corrosión en las tuberías de transporte de crudo, favoreciendo así a las sociedades y a su economía.

1.3 Alcance

La investigación tiene como finalidad determinar la influencia de los tratamientos térmicos ante la corrosión, además de conocer la incidencia de la microestructura frente a la resistencia de dicha degradación del material, evaluando las propiedades mecánicas de los mismos.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General*

- Evaluar los efectos del carbonato y bicarbonato en la resistencia a la corrosión en aceros API 5L, con tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Determinar el electrolito sintético del agua que se produce en las tuberías de petróleo.
- Realizar los tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado.
- Determinar la influencia de la microestructura por Normalizado en la resistencia a la corrosión de aceros API 5L.
- Determinar la influencia de la microestructura por Recocido en la resistencia a la corrosión de aceros API 5L.
- Determinar la influencia de la microestructura por Bonificado en la resistencia a la corrosión de aceros API 5L.
- Evaluar las tasas de corrosión para cada tratamiento térmico.
- Evaluar las propiedades mecánicas de impacto y dureza Brinell del material tratado térmicamente que presente las mejores características frente a la corrosión.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Aceros

Los aceros son aleaciones binarias con un contenido de carbono que está entre 0,003 a 1,2 wt. % (porcentaje en peso), los diagramas que rigen el comportamiento de los aceros al carbono son los Fe-C y Fe-Fe₃C; estos determinan el comportamiento en condiciones próximas al equilibrio. La figura 1 muestra el sistema binario hierro-carbono, donde se aprecia la evolución microestructural y las zonas de interés como es la zona donde ocurre la reacción eutectoide y eutéctica (Callister, 2010, págs. 364-366).

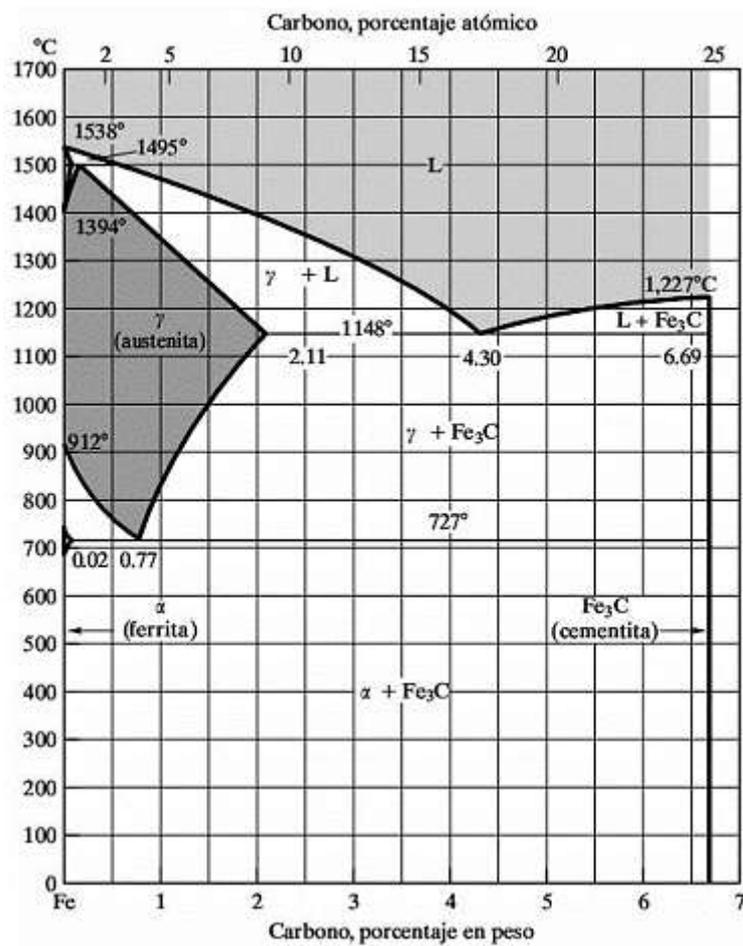


Figura 1-1. Diagrama de equilibrio de fases Fe-C.

Fuente: (Shackelford, 1998)

Las aleaciones férricas comprenden un 90% en peso de los materiales metálicos empleados por el hombre, esta inmensa familia de materiales posee un amplio rango de microestructuras y propiedades asociadas. Estos aceros pueden alcanzar resistencias aproximadas de 690MPa, sacrificando ductilidad y tenacidad. Por otro lado, existen los aceros aleados que son aquellos que

contienen elementos como Ni, Cr, Mo, V, Si, Cu, Al, W, Ti, Co, Zr, Pb, B y otros, que mejoran las propiedades de los aceros (Shackelford, 1998, págs. 420-423) .

1.5.2 Acero de baja aleación.

Los aceros de baja aleación son aquellos que su contenido de carbono está comprendido entre 0,25-0,6 wt. %, pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. La adición de elementos aleantes como el níquel, cromo y molibdeno mejoran la capacidad de las aleaciones para ser tratados térmicamente generando una buena combinación resistencia-ductilidad, ya que la presencia de estos elementos cambia la posición y localización del punto eutectoide reduciendo el contenido de carbono al eutectoide y reduciendo su temperatura como se observa en la figura 2-1.

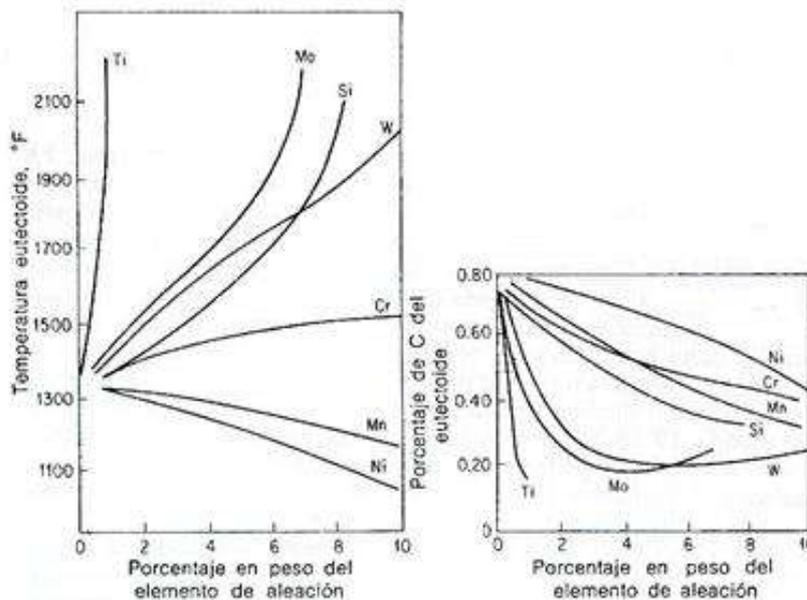


Figura 2-1: Composición y temperatura eutectoide bajo la influencia de diversos elementos de aleación.

Fuente: (Avner, 1977)

Poseen buenas propiedades que permiten un fácil mecanizado, soldado y además son económicos. Las principales aplicaciones son en la fabricación de carrocerías de automóviles, vigas y láminas para construir tuberías, edificios, puentes y latas estañadas (Callister, 2010, pág. 372).

A este grupo pertenecen los aceros denominados, de alta resistencia, seguido de una baja aleación denominados por sus siglas en inglés, (*HSLA, high-strength, low alloy*) (Callister, 2010), se trata aceros microaleados que surgieron en respuesta al propósito de reducir el peso de los vehículos.

Contienen bajo carbono, por debajo del 0,2 wt. % C típicamente y alrededor de 1 wt. % (Mn, O, Si, Cr, Ni, Mo) y una cantidad reducida de Nb, V y Ti. Son conformados en caliente para obtener una estructura con un grano muy fino, con valores elevados en el módulo de Young y la resistencia (Shackelford, 1998, pág. 395).

El acero HSLA no solo se utiliza en aplicaciones estructurales también se usa en tuberías de transporte de petróleo siendo uno de estos los aceros API 5L, los cuales contienen elementos como Nb, V y Ti, elementos conocidos como microaleantes por sus cantidades de menor magnitud en masa cuya finalidad es mejorar sus propiedades mecánicas (ASM International Committee, 1990).

1.5.2.1 **Acero API 5L**

Estos aceros son los más comunes y utilizados en las tuberías de conducción de crudo y sus derivados, para las tuberías sin costura, el material de fabricación debe cumplir con los requisitos de la norma ISO 11960/API 5CT. Las composiciones químicas para la fabricación de este tipo de aceros se presentan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Requisitos químicos para el análisis de calor y productos por porcentaje del acero.

(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)
Grado y Clase	Carbono Máximo	Manganeso Máximo	Fósforo Mín.	Fósforo Máx.	Azufre Máximo	Titanio Máximo	Otros
Sin Costura							
A25, CII	0.21	0.60		0.03	0.03		
A25, CI II	0.21	0.60	0.045	0.08	0.03		
A	0.22	0.90		0.03	0.03		
B	0.28	1.20		0.03	0.03	0.04	b, c, d
X42	0.28	1.30		0.03	0.03	0.04	c, d
X46, X52, X56	0.28	1.40		0.03	0.03	0.04	c, d
X60	0.28	1.40		0.03	0.03	0.04	c, d
X65, X70	0.28	1.40		0.03	0.03	0.06	c, d
Soldados							
A25, CII	0.21	0.60					
A25, CI II	0.21	0.60	0.045	0.03	0.03		
A	0.22	0.90		0.08	0.03		
B	0.26	1.20		0.03	0.03	0.04	b, c, d
X42	0.26	1.30		0.03	0.03	0.04	c, d
X46, X52 X56	0.26	1.40		0.03	0.03	0.04	c, d
X60	0.26	1.40		0.03	0.03	0.04	c, d
X65	0.26	1.45		0.03	0.03	0.06	c, d
X70	0.26	1.65		0.03	0.03	0.06	c, d

Fuente: (American Petroleum Institute, 2004)

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Los requisitos de análisis mínimos para los aceros API 5L GR B y X42, deben incluir las mediciones de los siguientes elementos.

- a. Carbono, manganeso, fosforo, azufre, cromo, columbio [niobio], cobre, molibdeno, níquel, silicio, titanio y vanadio.
- b. Boro (solo si el análisis de calor indica un contenido de boro menos de 0,001%, de ser esto posible no requiere determinación de boro para análisis del producto)
- c. Cualquier otro elemento de aleación durante la fabricación de acero para un propósito diferente a la desoxidación.

También este tipo de acero debe cumplir las propiedades mecánicas a tracción que se detallan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Requisitos generales de las propiedades mecánicas del acero API 5L.

(1) Grado	(2) Esfuerzo Mín.		(4) Esfuerzo Máx.		(5) Resistencia a la tracción final Mín.		(6) Resistencia a la tracción final Máx.		(7) Elongación en 2 in. (50.8 mm) Porcentaje Mín.
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	
B	35000	241	65000	448	60000	414	110000	758	a
X42	42000	290	72000	496	60000	414	110000	758	a
X46	46000	317	76000	524	63000	434	110000	758	a
X52	52000	359	77000	531	66000	455	110000	758	a
X56	56000	386	79000	544	71000	490	110000	758	a
X60	60000	414	82000	565	75000	517	110000	758	a
X65	65000	448	87000	600	77000	531	110000	758	a
X70	70000	483	90000	621	82000	565	110000	758	a
X80	80000	552	100000	690	90000	621	120000	827	a

Fuente: (American Petroleum Institute, 2004)

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Por lo general, todo tipo de material que se encuentre destinado al diseño de oleoductos se encuentra normado bajo (API, 2001), por lo que, el análisis se realizará en materiales como API 5L GR B y X42.

Estos tipos de materiales para tuberías se caracterizan por ser duros y presentar buena resistencia a la fractura, además de poseer conductividad eléctrica elevada, además de menor resistencia al proceso de corrosión.

Las principales características de los aceros API 5L GR B y X42 son:

- Alta precisión de tamaño y forma.
- Buena tenacidad a baja temperatura.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Alta resistencia al torque.
- Excelente resistencia a fatiga y larga vida útil.

Cabe recalcar, que este tipo de tuberías se pueden tratar térmicamente, ya sea, mediante el proceso de normalizado, mismo que ayudan a aliviar esfuerzos residuales, además de la consideración de tratamientos como el revenido para aceros de grado X.

1.5.3 Tratamientos térmicos en los aceros.

El objetivo de los tratamientos térmicos es mejorar propiedades mecánicas y físicas de un acero como: dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión. Como definición de tratamiento térmico (TT) dada por (Callister, 2010) dice que es una conjugación de operaciones donde se eleva y disminuye la temperatura en tiempos determinados aplicándose a un material metálico.

Los tratamientos térmicos más usados en la industria son:

- Recocido, Normalizado, Temple y Revenido (Bonificado)
- Cementación: Solida, Liquida, Gaseosa.
- Envejecimiento Artificial (Endurecimiento Por Precipitación)

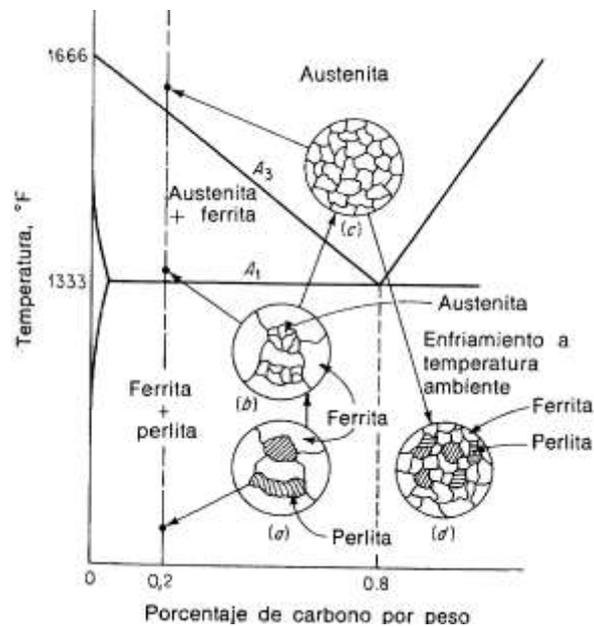


Figura 3-1: Representación esquemática del cambio microestructural del acero.

Fuente: (Avner, 1977, pág. 253)

De acuerdo con la Figura 3-1, representación microestructural del acero, se observa temperaturas a las cuales se realizan los tratamientos térmicos, por lo que es necesario conocer cada una de ellas:

- A_0 , se considera en temperaturas (210-230) °C, por lo que a mayor temperatura la cementita deja de ser magnética.
- A_1 , a temperaturas (723-727) °C, se considera el límite de la fase perlita.

- A_2 , (768 °C), se considera que, a temperaturas mayores, la ferrita deja de ser magnética.
- A_3 , varía en temperaturas (723-910) °C, dependiendo del porcentaje de carbono, se puede reconocer el límite de la fase ferrita.
- A_{cm} , este punto crítico varía entre (723 y 1130) °C, determinando de tal forma el límite de cementita.

1.5.3.1 Recocido

Este proceso consiste en incrementar de forma adecuada la temperatura y luego disminuirla lentamente a lo largo del intervalo de transformación. Este calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a A_3 , su enfriamiento por lo general se hace en el horno. Su principal objetivo es ablandar el acero con el fin de eliminar tensiones residuales y regenerar su estructura.

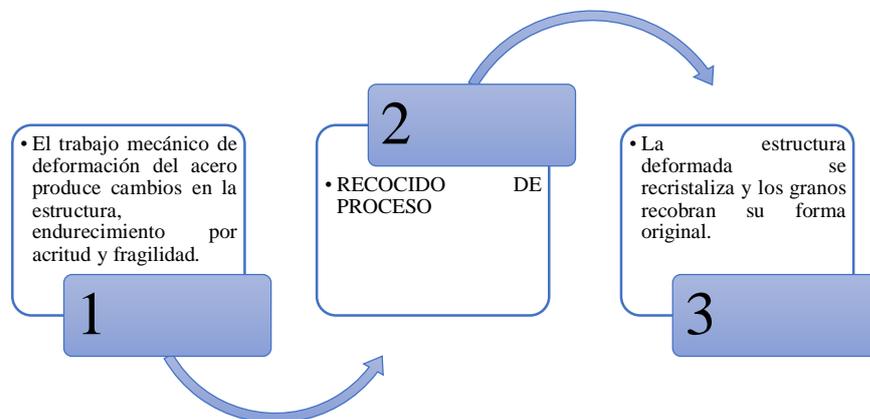


Figura 4-1: Esquema del objetivo del tratamiento térmico de recocido.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Características del tratamiento térmico de recocido.

- Refinar el grano
- Reducir la dureza
- Mejorar el maquinado
- Mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas

Las transformaciones que se producen en un acero con un 0,45 wt. % C durante el recocido cuando el enfriamiento es lento se visualiza en la figura 5-1.

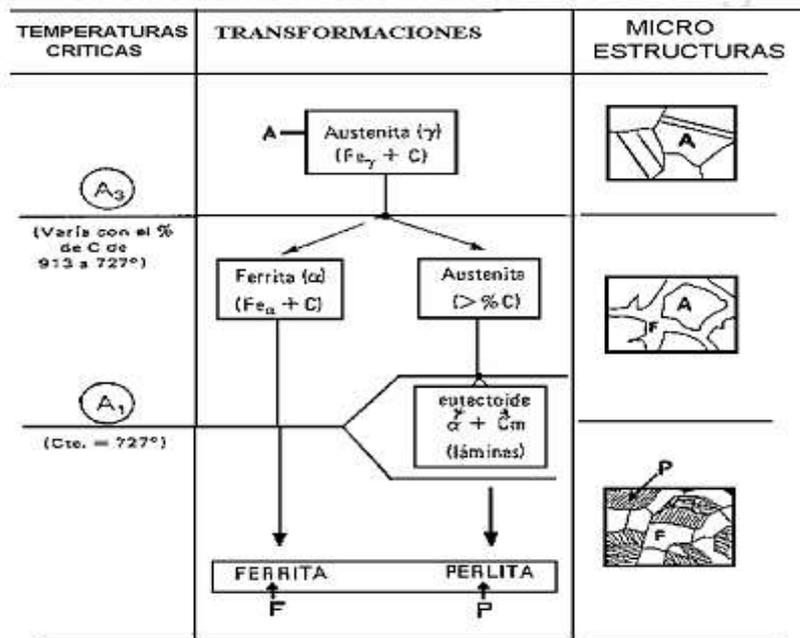


Figura 5-1: Transformación de la microestructura de un acero 0,45 wt. % C durante el recocido.

Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2003)

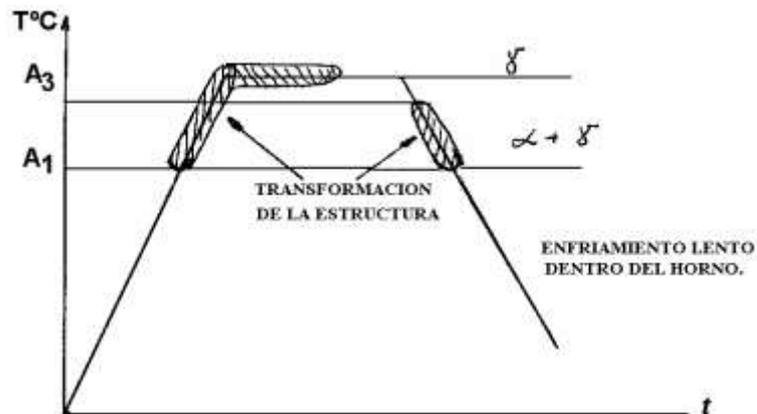


Figura 6-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T (Tratamiento Térmico) de Recocido.

Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2003)

Las temperaturas críticas A_3 y A_1 (figura 6-1), establecen que si se ha calentado por encima de la temperatura A_3 (crítica superior) toda la microestructura muestra solo pequeños granos de austenita. Por otro lado, si el calentamiento no ha llegado hasta la línea A_1 (crítica inferior), no ocurrirá transformación de austenita, esta se dará una vez que las temperaturas sobrepasen la crítica inferior. Se estima que para 1 in de espesor de acero el tiempo de recocido será de 1 hora.

A partir de la figura 7-1 se puede establecer dos ciclos térmicos para un acero hipoeutectoide e hipereutectoide.

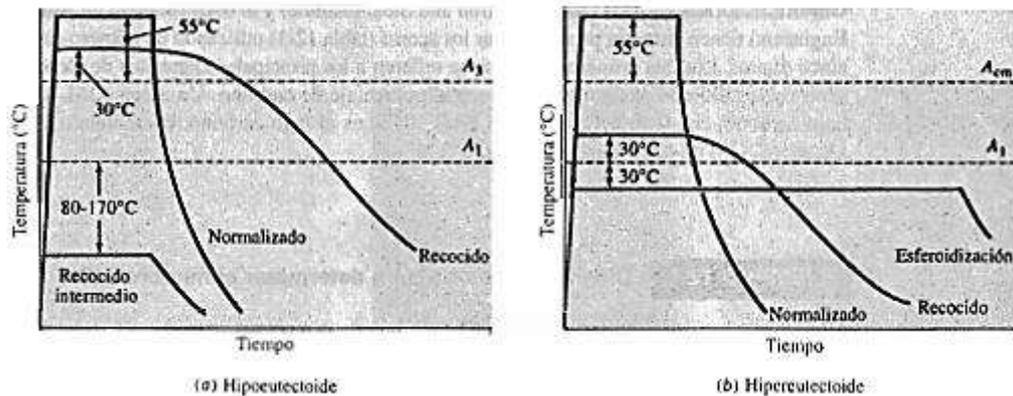


Figura 7-1: Ciclo térmico para los aceros a) Hipoeutectoide b) Hipereutectoide.

Fuente: (Askeland, 1998, pág. 324)

1.5.3.2 Normalizado

El tratamiento térmico de normalizado consiste en calentar las piezas ligeramente (55-85°C) arriba de la línea crítica A_m (Callister, 2010, pág. 340), seguido de un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente. Se emplea en piezas fundidas, forjadas o conformadas mecánicamente. El objetivo de este tratamiento es producir aceros con una propiedad de dureza alta en relación con el recocido, al igual que el recocido el tratamiento térmico de normalizado los aceros hipo e hipereutectoides tienen diferente ciclo térmico, siendo la temperatura a alcanzar para un acero hipoeutectoide una por encima de A_{cm} con la finalidad de disolver la red de cementita (Avner, 1977, pág. 257). Para mejorar la dureza este tratamiento térmico afina la estructura y elimina tensiones que suelen aparecer en la solidificación u operaciones posteriores (Universidad de Santiago de Chile, 2003, pág. 327).

Es un tratamiento típico en los aceros al carbono de construcción de 0,15-0,4 wt. % C, y rara vez se emplea en los aceros para herramientas, ni en los aceros aleados de construcción.

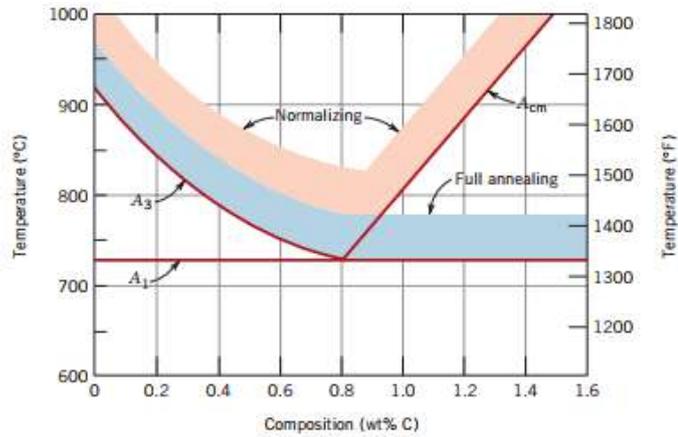


Figura 8-1: Región de temperaturas de tratamiento térmico del acero.

Fuente: (Callister, 2010, pág. 339)

La velocidad de enfriamiento importante en la normalización corresponde al punto en que toda la austenita se ha transformado en perlita, casi siempre situándose velocidades de enfriamiento en 700 °C o en intervalos de 700 a 500 °C. La velocidad de enfriamiento influye en la cantidad de perlita, como en su tamaño y su espaciado, si la velocidad de enfriamiento es mayor produce más perlita, así como laminas menos espaciadas y más finas, dando como resultado mayor dureza, tenacidad y resistencia, pero si el acero es demasiado duro puede generar acritud lo que deriva a una fragilidad alta. Las velocidades de enfriamiento lentas causan piezas más blandas (Dúctiles) y de menor resistencia.

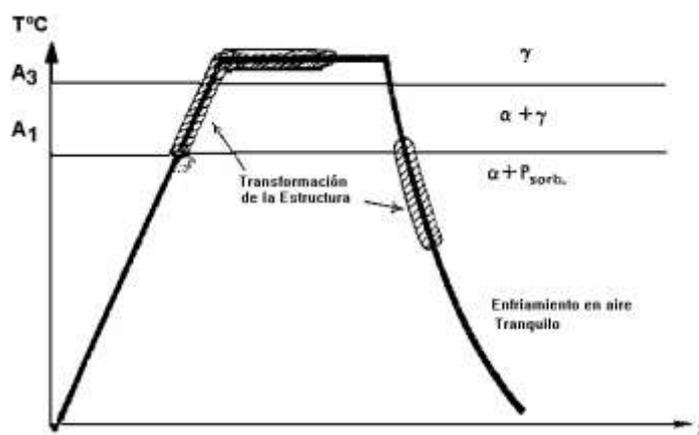


Figura 9-1: Ciclo térmico en un T.T de normalizado.

Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2003)

Características del tratamiento térmico de normalizado.

- Mejora la resistencia mecánica y la dureza.
- Mejora la maquinabilidad.
- Modifica las estructuras dendríticas de piezas de fundición.
- Homogeniza la microestructura.

Las microestructuras óptimas de los aceros para maquinado con diferente contenido de carbono suelen ser como se indican en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Microestructuras óptimas para diferentes concentraciones de carbono en diferentes tratamientos térmicos.

Carbono %	Microestructura Óptima
0.06 a 0.20	Como laminado en frío
0.20 a 0.30	Inferior a 3plg de diámetro, normalizado
0.30 a 0.40	Superior a 3plg de diámetro como laminado en frío
0.40 a 0.60	Recocido, para dar perlita gruesa
0.60 a 1.00	Recocido, para dar perlita gruesa o esferoidita gruesa
	100% de esferoidita, de gruesa a fina

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

1.5.3.3 Temple

El objetivo principal del tratamiento térmico de temple es producir una estructura totalmente martensítica. Es un tratamiento propio de los aceros y consiste en la austenización de un acero y luego enfriarlo en una forma más o menos rápida (dependiendo de su composición química y tamaño de las piezas), en un medio adecuado como: agua, aceite o sales fundidas con objeto de aumentar la resistencia del acero.

Otra definición de temple viene definida por la (ASM International Committee, 1990), estableciendo que el temple consiste en disminuir de manera repentina la temperatura del acero desde una temperatura alta. Los factores de los que depende el temple son de importancia decisiva, es por ello que cada proceso debe darse con cuidado y consideración. El éxito de una pieza templada depende de cuatro factores principales: buen acero, buen diseño, buen tratamiento térmico y buen

servicio. Por lo general el tratamiento es muy dependiente de la composición del acero y de su mecanismo posterior. Los factores considerados durante el temple son:

- Incremento de temperatura
- Temperatura de austenización.
- Tiempo de permanencia en la temperatura de austenización.
- Procesos para el enfriamiento.

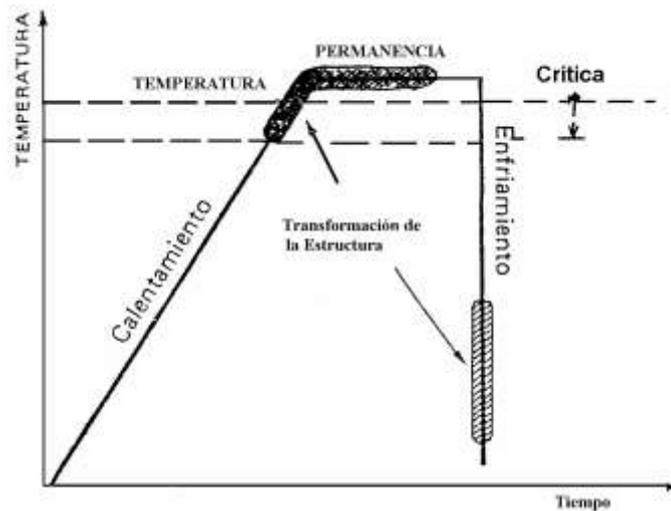


Figura 10-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de Temple.

Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2003, pág. 328)

La martensita es una estructura del hierro que pasa de FCC (cúbica centrada en las caras) (austenita) a BCT (tetragonal centrada en el cuerpo) (ferrita distorsionada). Esto produce el endurecimiento, baja la ductilidad y tenacidad, pero a la vez provoca la fragilización del acero. En la mayoría de los aceros la estructura martensítica parece vaga en las aleaciones al alto carbono, la estructura acicular de la martensita está definida más claramente. Todo acero templado debe ser revenido.

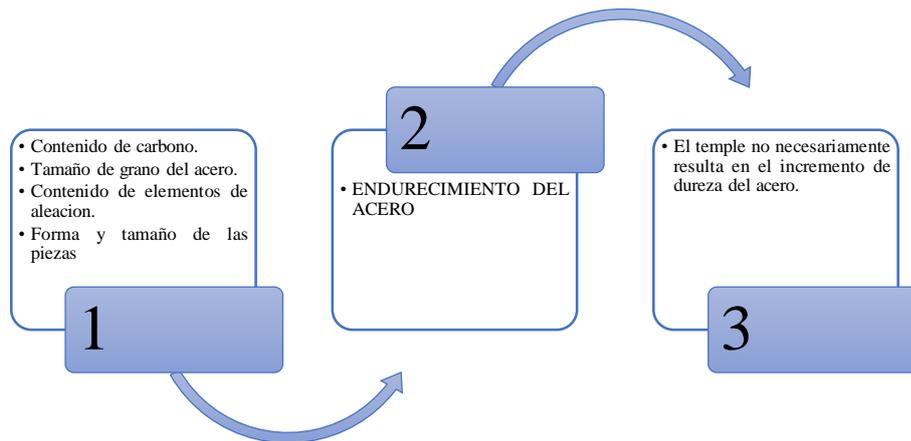


Figura 11-1: Generalidades del T.T. de temple.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

1.5.3.4 Revenido.

Como se explica en el párrafo anterior el revenido es el tratamiento térmico que sigue a todo temple. Pues en este último estado, la pieza es muy frágil, si bien su dureza es alta, este tratamiento implica un calentamiento por debajo de la temperatura crítica inferior A_1 , y mientras sus temperaturas sean menores, se tendrán mejores resultados prácticos en cuanto a ganancia de tenacidad con poca disminución de dureza.

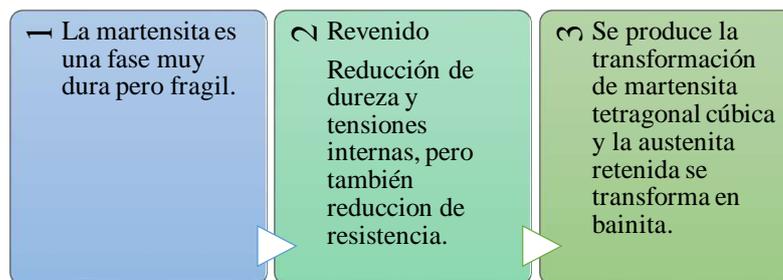


Figura 12-1: Efectos del revenido.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

El objetivo del revenido es modificar y no eliminar los efectos del temple, una vez que se ha calentado el acero a la temperatura inferior a $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_3), se mantiene a un tiempo adecuado y posterior a ello se enfría a temperatura ambiente. Como se especifica en la figura 13-1.

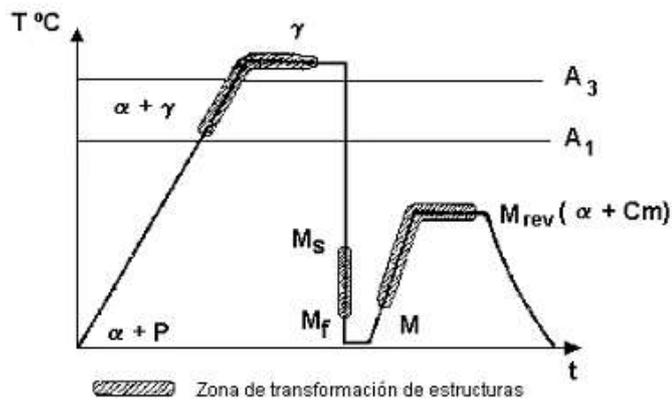


Figura 13-1: Ciclo térmico utilizado en un T.T.

de temple y Revenido.

Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2003, pág. 329)

El microconstituyente típico en el revenido es la martensita revenida y también se sabe que la austenita residual en el revenido puede formar Bainita.

1.5.3.5 **Bonificado.**

Al tratamiento completo de temple más revenido se le conoce como Bonificado, es un tratamiento térmico adecuado para aceros aleados o para aquellos con un contenido alto de carbono. Los aceros por defecto se entregan en condición de bonificado y se utilizan en maquinaria sometida a altos esfuerzos dinámicos (fatiga) y altas exigencias mecánicas como: cigüeñales, ejes de leva, arboles de transmisión, barras de torsión, ejes de cardan, ejes de bombas y ejes de hélices para aviones, etc.

Características del Bonificado:

- Lleva al material a un estado de fragilidad mínima, haciendo más suave y evitando que se falle con facilidad.
- Disminuir las tensiones internas debido al temple.
- Reducir la resistencia a la rotura debido a la acción de fuerzas a tracción
- Aminorar el límite elástico, así como la dureza.
- Incrementar las características de ductilidad
- Hace que el material se comporte de mejor manera frente al alargamiento, a la estricción y mejore su tenacidad.

Resistencia en estado recocido		CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO BONIFICADO					
máx. kgs/mm ²	dureza Brinell máx. HB 30	Diámetro mm.	Límite de fluencia min. kg/mm ²	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Alargamiento (L=5d) min. %	Contracción min. %	Resiliencia según DVM mkg/cm ² (Valores de guías)
75	223	hasta 16	90	110 - 130	10	40	5
		de 16 a 40	78	100 - 120	11	45	6
		de 40 a 100	65	90 - 110	12	50	6
		de 100 a 250	57	80 - 95	13	55	6
		> 250		75 - 90	14	55	6

Figura 14-1: Características mecánicas en estado de bonificado.

Fuente: (Alva, 2014)

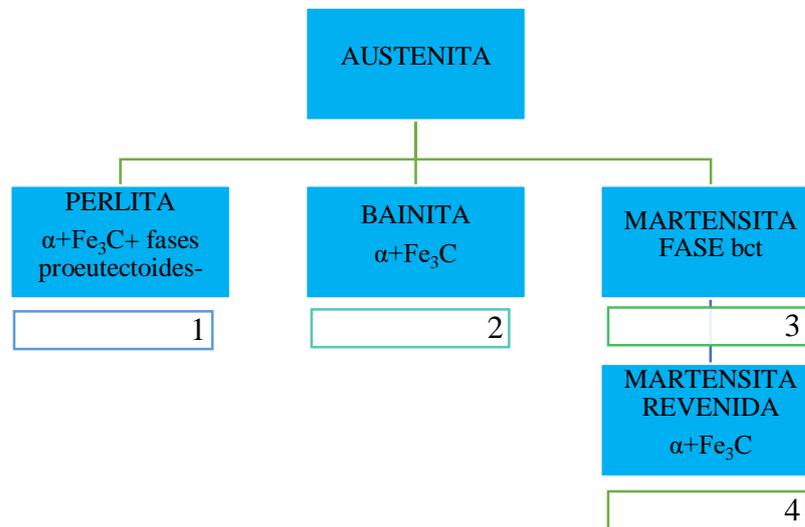


Figura 15-1: Tratamiento térmico del acero.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

1.6 Corrosión

Según la (ASTM, 1994), la corrosión está conceptualizada como la reacción química o electroquímica entre un metal y su entorno, produciendo un deterioro o degradación del material y por consecuencia de sus propiedades.

Existen cuatro efectos principales que dan origen a la corrosión. Entre ellos está el ánodo, donde se produce la disolución del metal, que genera iones metálicos y electrones. Los electrones generados en el ánodo se dirigen al cátodo a través de un camino electrónico del material, y

finalmente se usan en el cátodo para la reducción de iones positivamente cargados (Volkan, Corrosion Engineering, 2014, pág. 15). Estos iones viajan cargados positivamente del ánodo al cátodo por medio de una corriente iónica (Volkan, Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook, 2017, pág. 5). El ion metálico cuando existe una oxidación a alta temperatura se convierte en un constituyente más de la red del óxido formado (Cargua, 2019, pág. 16).

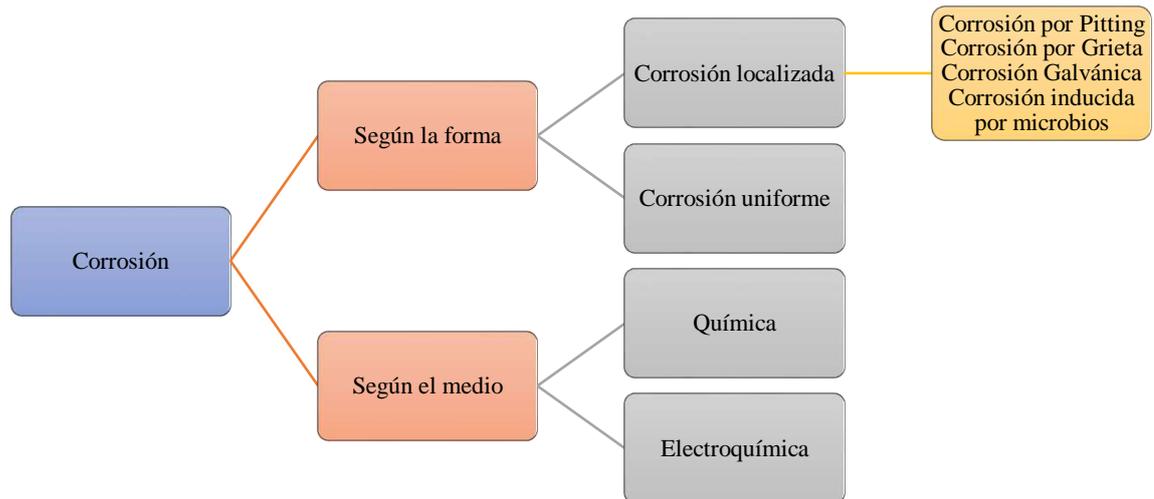


Figura 16-1: Clasificación de la corrosión.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

1.6.1 *Corrosión química.*

La corrosión química u oxidación, comienza en la superficie del metal, la capa de óxido forma una barrera que tiende a obstaculizar la continuidad de la oxidación. Para que la oxidación siga adelante debe juntarse con el oxígeno del metal, y esto puede ocurrir ya sea por difusión del metal o del oxígeno a través del óxido hacia el metal o ambos (Universidad de Santiago de Chile, 2003, pág. 360).

Si la oxidación es uniforme y la capa de óxido es no porosa, sin descarga de óxido la velocidad de oxidación será inversamente proporcional al espesor (x) observable en la figura 17-1.

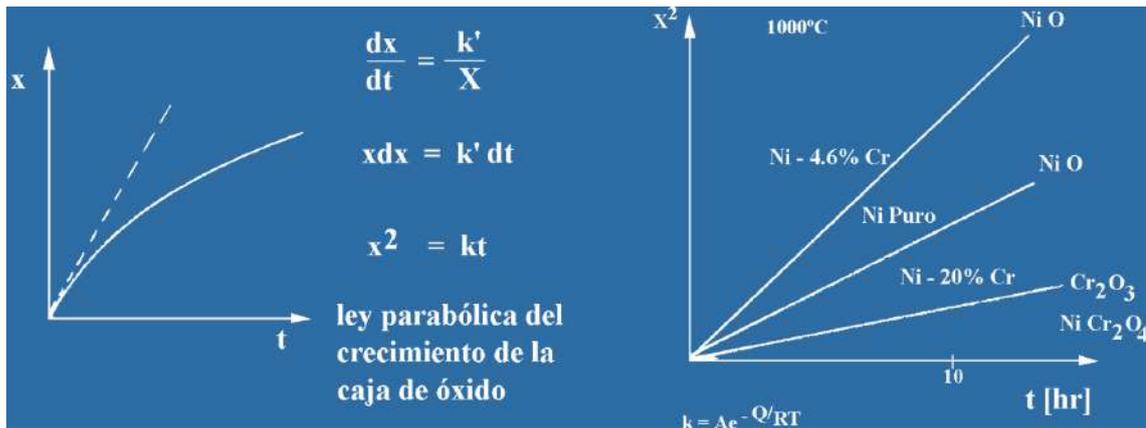


Figura 17-1: Ley parabólica del crecimiento de la capa de óxido.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

La constante k depende mucho de la solubilidad del metal y/o oxígeno en el óxido y el metal, el coeficiente de difusión a través de él depende entonces exponencialmente con la temperatura. El Al, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, Ni, Si, Zn, siguen la ley representada en la figura anterior.

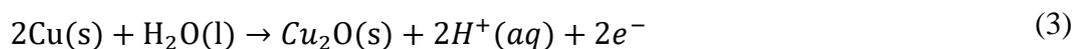
1.6.2 Corrosión electroquímica.

La corrosión es un proceso electroquímico. Es decir, la corrosión generalmente no ocurre por una reacción química directa de un metal con su entorno, sino por la operación de reacciones electroquímicas de media celda acopladas (McCaferty, 2010, pág. 15).

La corrosión en forma generalizada suele activarse por medio de una reacción electroquímica, misma que producen dos reacciones, como son anódica y catódica en la celda electroquímica.

1.6.2.1 Reacción anódica.

La pérdida del metal ocurre como una reacción anódica como, por ejemplo.



Dónde: las notaciones (aq), (s) y (l) se refieren a las fases acuosa, sólida y líquida respectivamente, cada una de las reacciones anteriores en las ecuaciones (1), (2), (3) son reacciones anódicas debido a lo siguiente:

1. Una especie dada sufre oxidación, es decir, hay aumento en su número de oxidación.
2. Hay una pérdida de electrones en el sitio anódico (la reacción produce electrones). Estas ideas se ilustran en la figura 18-1.

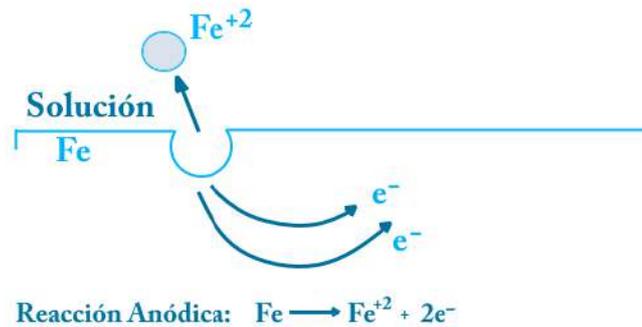


Figura 18-1: Reacción anódica-disolución del hierro.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

1.6.2.2 Reacción catódica

En una reacción catódica se enuncian los siguientes ítems.

1. Una especie dada sufre una reducción, es decir, hay una disminución en su número de oxidación.
2. Hay una ganancia de electrones en el sitio catódico (la reacción consume electrones).

Un ejemplo de la reacción catódica, en la reducción de los iones de hidrógeno en una superficie para formar una molécula de hidrógeno.



En la figura 19-1, se ilustra la representación esquemática de esta reacción. Esta reacción catódica es predominante para soluciones acidas.

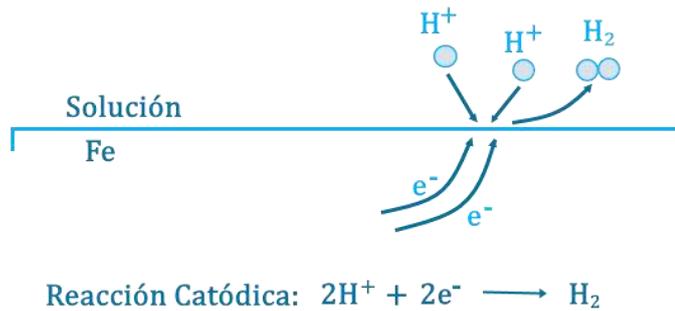


Figura 19-1: Reacción catódica- desprendimiento del hidrógeno sobre el hierro sumergido en una solución ácida.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Otra reacción catódica común es la reducción de oxígeno disuelto a iones de hidróxido, una reacción de reducción que ocurre en soluciones neutras o básicas.



1.6.3 Formas de corrosión.

La corrosión se a subdividido en algunas formas de corrosión siendo éstas, la corrosión uniforme y la corrosión localizada.

1.6.3.1 Corrosión uniforme.

Como su nombre lo indica, ocurre en la mayor parte de la superficie de un metal a una velocidad constante y a menudo predecible. Aunque es antiestético su previsibilidad facilita el control, el método más básico es hacer que el material sea lo suficientemente grueso como para funcionar durante la vida útil del componente. La corrosión uniforme puede ralentizarse o detenerse de cinco maneras (Bahadori, 2014).

1. Detener el paso de los electrones o reducir su movimiento.
 - a. Cubrir la superficie con un medio no conductor como pintura, laca o aceite.
 - b. Reducir la conductividad de la solución en contacto con el metal, siendo un caso extremo mantenerlo seco.

- c. Lavar regularmente los contaminantes conductores
 - d. Aplicar una corriente al material.
2. Reducir la velocidad o evitar que el oxígeno llegue a la superficie. Esto es difícil de realizar por completo pero los recubrimientos pueden ayudar.
 3. Evitar que el metal ceda electrones.
 - a. Usar un metal más resistente a la corrosión más alto en la serie electroquímica.
 - b. Usar una capa de sacrificio que ceda sus electrones más fácilmente que el metal protegido.
 - c. Aplicar protección catódica.
 - d. Usar inhibidores.
 4. Seleccionar un metal que forme un óxido que sea protector y detenga la reacción.
 5. El control y la consideración de los factores ambientales y térmicos también es esencial.

1.6.3.2 Corrosión localizada o puntual.

La corrosión localizada o puntual tiene un efecto más grave que la corrosión uniforme generalmente porque la falla ocurre sin previo aviso y después de un período sorprendentemente corto de uso o exposición. La aplicación de los cinco principios básicos requiere una mayor reflexión y comprensión. Este tipo se subdivide en los siguientes mecanismos.

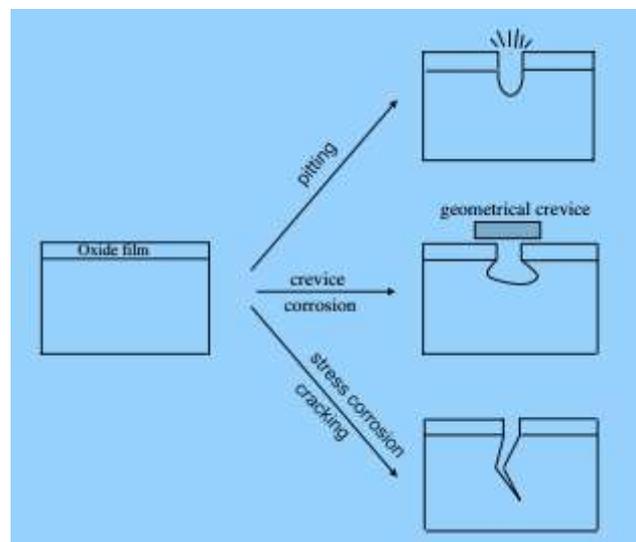


Figura 20-1: Diferentes formas de corrosión localizada.

Fuente: (McCaferty, 2010, pág. 26)

- a) Corrosión por picadura o Pitting: Este tipo de corrosión es la más común en aleaciones de Al y en aceros, da mayores problemas al momento de estar en presencia de un pH de 7 o casi neutro, donde existen aniones corrosivos como cloruro y sulfato. Ocurre en materiales que

tienen una película protectora, como un producto de corrosión o revestimiento. Cuando este se rompe el metal queda expuesto y cede electrones fácilmente y se inicia la reacción formando pequeños hoyos con química localizada que respalda el ataque rápido.

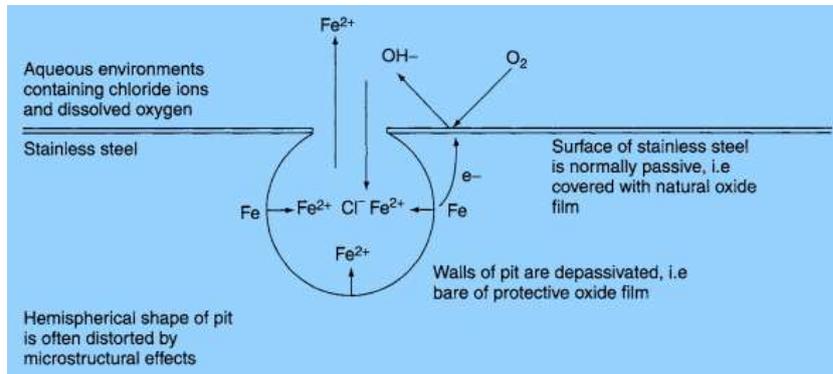


Figura 21-1: Pitting para un acero inoxidable.

Fuente: (Schofield, 2002, pág. 4)

- b) Corrosión por grieta: Se trata de una corrosión puntal, debido a la aglomeración de lodo o polvo, en algunos casos la existencia de agujeros y cavidades presentes entre las superficies de los metales. (Ahmad, 2006, pág. 6). El mecanismo se ilustra en la figura 22-1.

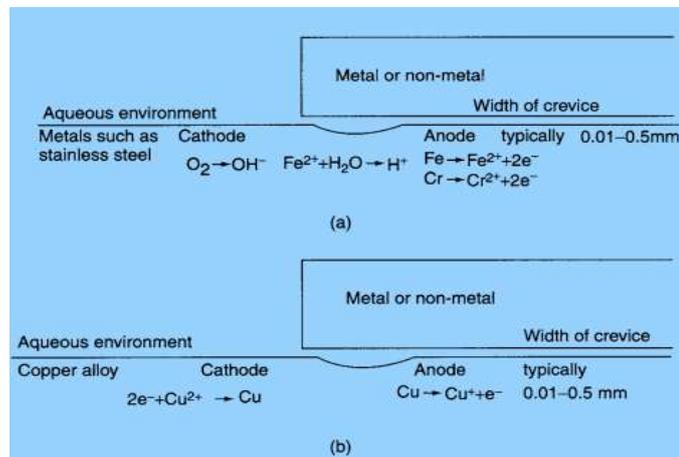


Figura 22-1: Corrosión por grieta para a) Acero inoxidable b) Cobre.

Fuente: (Schofield, 2002, pág. 6)

- c) Corrosión galvánica: Ocurre cuando dos metales diferentes entran en contacto entre sí y es causado por la mayor disposición de uno para entregar electrones que el otro. Una de las condiciones primordiales es que se desarrollen condiciones electrolíticas entre dos o más metales, de modo que se cierre el circuito eléctrico (Cargua, 2019, pág. 20), (Volkan, Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook, 2017, pág. 8). En los problemas reales de corrosión se

requiere una tabla o serie galvánica para materiales de ingeniería o aleaciones. Como la que se muestra a continuación en la figura 23-1.

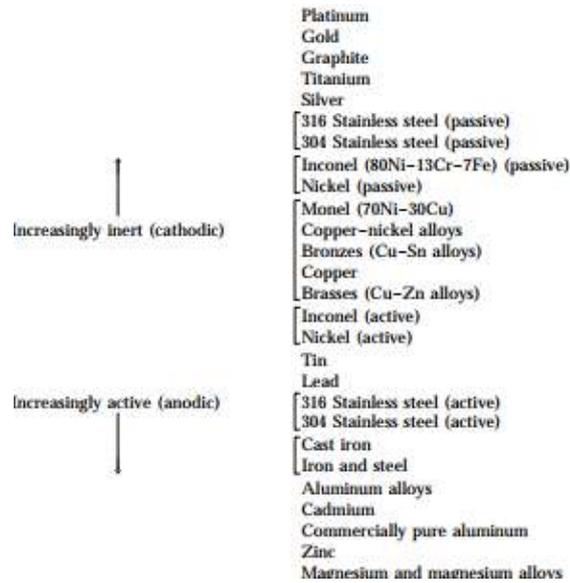


Figura 23-1: Serie galvánica en agua de mar.

Fuente: (Fontana, 1986, pág. 100)

- d) Corrosión por microbios: Esta clase de generalmente cubre la degradación del material por bacterias, mohos y hongos, o sus subproductos. Esto puede ocurrir por una variedad de acciones, tales como:
- Ataque al metal o revestimiento protector por subproductos ácidos, azufre, hidrógeno, sulfuro o amoníaco.
 - Interacción directa entre los microbios y el metal bajo ataque.

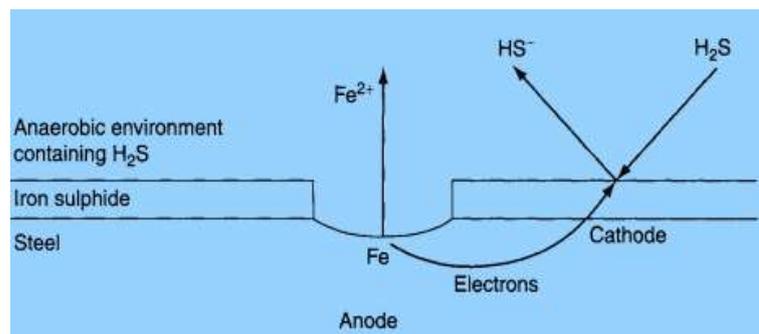


Figura 24-1: Condiciones ideales para albergar colonias de bacterias anaeróbicas.

Fuente: (Schofield, 2002, pág. 7)

- e) Corrosión por celda de concentración (Crecive): Si dos áreas de un componente en proximidad diferente difieren en la cantidad de constituyente reactivo disponible, la reacción

en una de las áreas se acelera. Como ejemplo de esto es la corrosión por grietas, que ocurre cuando el oxígeno no puede penetrar en una grieta y se establece en una celda de aireación diferencial. Esta corrosión ocurre rápidamente en el área con menos oxígeno (Bahadori, 2014, pág. 4).

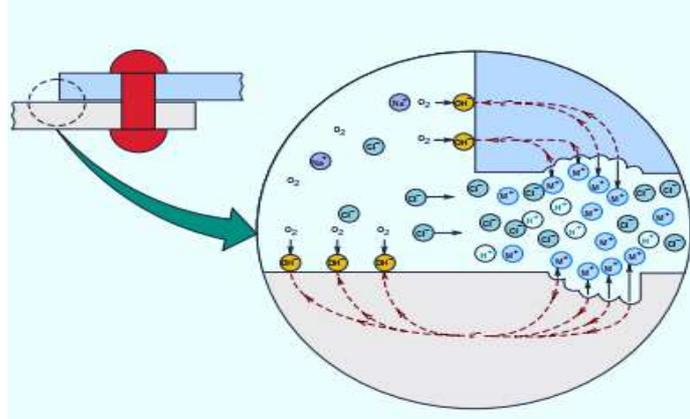


Figura 25-1: Aireación diferencial en una junta atornillada.

Fuente: (Callister, 2010, pág. 589)

1.6.4 *Causas principales de la corrosión interna en las tuberías.*

Los principales riesgos de corrosión interna en las tuberías se clasifican en la tabla 1-1, a la vez se discuten los factores influyentes asociados, en forma general depende de varios factores como lo es, composición del material, ambiente al que se encuentra expuesto el metal, composición de la sustancia que se encuentra en contacto, la mezcla de todos ellos conlleva el proceso de corrosión.

Los mecanismos de corrosión y su velocidad dependen de la composición química del fluido. La química del agua en oleoductos y gasoductos (agua condensada y agua de formación), es la característica principal de la corrosividad del fluido (Olvera, Genesca, & Flores, 2015). Debido a esto es necesario verificar la fase acuosa dentro de la tubería antes de analizar otros compuestos químicos (Chevrot, 2012, pág. 20).

Las mediciones de CO₂ en muestras no presurizadas deben tomarse con alta precisión ya que el CO₂ se libera rápidamente de la solución no presurizada y de esta manera, el pH medido no introduce las condiciones in situ del fluido (Askari, Aliofkhaezai, Ghaffari, & Hajizadeh, 2018).

Debido a la presencia de sales como cloruro y sodio, sulfato de bario, sulfato de sodio, carbonato de calcio, el agua de formación del reservorio puede provocar escamas en la tubería. La inyección

de agua en algunos depósitos provoca la liberación del agua de formación. La mezcla de compuestos químicos y la generación de H₂S también pueden causar escamas en la tubería. Se sabe también, que algunos pozos contienen ácido acético, que aumenta la velocidad de corrosión en los sistemas con presencia de CO₂ (Nesic, Nordsveen, Maxwell, & Vrhovac, 2001).

1.6.4.1 Corrosión por CO₂ (Corrosión dulce)

La degradación de un material depende de diferentes elementos y procesos, mismos que de forma conjunta permiten la corrosión de un metal, entre los diferentes tipos de elementos o agentes, se encuentran los químicos como CO₂, H₂S, O₂, además de agentes biológicos, mismos que en asistencia de temperatura, presión, humedad, más condiciones de uso, dan como resultado el proceso de corrosión.

Este tipo de corrosión se considera como uno de los problemas más típicos y comunes en los campos de producción de petróleo y gas. A pesar de los modelos de predicción para este tipo de corrosión, sigue siendo un fenómeno que no es muy claro en todos sus aspectos, y con una cierta incertidumbre respecto al mecanismo y los parámetros efectivos (Nešić, 2007).

El dióxido de carbono seco no es corrosivo a temperaturas comunes de los sistemas de petróleo y gas, pero cuando se disuelve en la fase acuosa, hace que se active una reacción electroquímica entre el acero y los medios. El CO₂ contiene una alta solubilidad en agua dulce y agua salina, y su solubilidad en hidrocarburos es ligeramente mayor (Askari, Aliofkhazraei, Ghaffari, & Hajizadeh, 2018).

Los fluidos de los hidrocarburos generalmente se producen en contacto con la fase acuosa y en muchos casos, los depósitos de hidrocarburos contienen una cantidad significativa de CO₂. Como resultado, el CO₂ se disuelve en la fase acuosa del hidrocarbonato y esta fase acuosa causa corrosión del acero al carbono (Kerani & Morshed, 1997).



Figura 26-1: Corrosión causada por CO₂

Fuente: (Parra, 2013, pág. 17)

1.6.4.2 Corrosión por H₂S (Corrosión Agria)

La corrosión por el sulfuro de hidrógeno es muy compleja. H₂S se disuelve en el agua para formar un ácido débil, que luego se descompone parcialmente para formar hidrógeno y iones bisulfato (Brunner, 1980). La baja solubilidad del FeS conduce al desarrollo de productos de corrosión para proteger al acero de la corrosión, esencialmente en altas concentraciones de H₂S.

En general en altas concentraciones de hidrógeno (superiores a 200 ppm) en la fase acuosa a altas temperatura producen una película altamente pasivante. Sin embargo, las películas conductoras de sulfuro de hierro son cátodos efectivos y, en muchos sistemas, la rotura de la película puede causar un ataque localizado debido a la imposibilidad de volver a formar la película en la superficie del pozo anódico. A temperaturas inferiores a 40°C y presencia de contenido bajo de H₂S y CO₂, las películas a menudo están hechas de sulfuro de hierro con baja adhesión en la parte superior de la capa de carbonato de hierro, como se puede ver la corrosión general. El ataque de la corrosión localizada se puede ver en el nivel promedio de concentración de H₂S (Kvarekval & Dugstad, 2006).



Figura 27-1: Corrosión por H₂S.

Fuente: (Parra, 2013, pág. 19)

1.7 Leyes de Faraday para determinar la tasa de corrosión.

1.7.1 *Primera ley.*

La masa de los productos generados de forma primaria en el electrodo, durante el proceso de electrolisis poseen una relación directamente proporcional a la cantidad de corriente que pasa por ellos.

$$m \propto It \text{ o } m = ZIt \quad (6)$$

Donde:

I es la corriente en amperios (A), t representa el tiempo en segundos, m detalla la masa del producto primario en gramos (g), además de la constante de proporcionalidad Z (equivalente electroquímico), es decir, se trata de la masa de una sustancia liberada por 1 amperio-segundo de corriente (1 coulomb). (Ahmad, 2006, pág. 57)

1.7.2 Segunda Ley

Representa la relación existente entre las masas de los productos formados a partir de cantidades de corrientes iguales, con respecto a la masa molar y el número de electrones involucrados en la relación.

$$m_1 \propto \frac{M_1}{n_1} \propto Z_1 \quad (7)$$

$$m_2 \propto \frac{M_2}{n_2} \propto Z_2 \quad (8)$$

Donde: (m_1 y m_2) representan a los productos primarios en gramos (g), adicional se tiene (M_1 , M_2) siendo la masa molar dada en ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), (n_1 y n_2) simbolizan el número de electrones, además de (Z_1 y Z_2) los cuales especifican las equivalentes electroquímicas.

Luego de combinar la primera y segunda ley de Faraday, se tiene la ecuación:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} It \quad (7)$$

Donde: F= representa la constante de Faraday, que viene dada por el valor de 96485 coulombs por gramo equivalente. (Ahmad, 2006, pág. 58)

1.8 Aplicación de la primera y segunda ley de Faraday para la evaluación de la tasa de corrosión.

Las leyes establecidas por Faraday son utilizadas para describir la electrólisis que se origina en el proceso de corrosión electroquímica, la tasa de corrosión representa la pérdida de masa en función del tiempo de una manera inversamente proporcional ($\text{g}\cdot\gamma^{-1}$ o $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

La siguiente ecuación se relaciona en función de la pérdida de peso del metal frente al tiempo, obteniendo:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{MI}{nF} \quad (8)$$

A la ecuación (6), se la divide para el área expuesta del material y sabiendo que I/A es la densidad de corriente (i), se expresa de la siguiente ecuación:

$$\frac{w}{At} = \frac{Mi}{nAF} \quad (9)$$

Dónde: w = tasa de corrosión [mmy; mpy; mg.dm².día⁻¹]; M = Masa molar [g.mol⁻¹]; n = número de electrones; A = área de exposición [mm², in²]; t = tiempo[año, día, seg]; F = constante de Faraday[96500 C/eq] (Ahmad, 2006, pág. 58).

1.9 Técnicas para la evaluación de la corrosión

Si el objetivo es evaluar la vida útil de los materiales metálicos utilizados en las industrias petroquímica, químicas e industrias de la construcción es imperativo cuantificar la tasa de corrosión la cual miden la capacidad que posee el medio de trabajo para oxidar dichos materiales y evalúan la efectividad de los procesos de protección contra la corrosión.

1.9.1 Polarización lineal (LPR).

La polarización lineal es también conocida como resistencia de polarización lineal como lo indican sus siglas en inglés (*Resistance Polarization Linear*), esta técnica permite medir la tasa de corrosión en tiempo real, se trata de un método de pronta identificación del proceso de degradación para un material, mismo que se encuentra vinculado al uso de medios conductivos líquidos.

Conforme a (Rodney, 1973), se evidencia que la técnica de polarización lineal es una de las herramientas principales para la evaluación de las tasas de corrosión media y bajas, además aclara que el hecho de que las curvas de polarización presenten una curvatura de potencial (E_{corr}) no niega la efectividad de la técnica.

La polarización lineal pretende encontrar la corriente de corrosión bajo las pendientes anódicas y catódicas de las curvas de polarización para luego ser evaluadas en la aplicación de la ley de

Faraday con el fin de encontrar una velocidad de corrosión, se debe tener en cuenta que la velocidad de barrido debe ser menor a los 100 mV/s para no afectar a la resistencia de polarización (Popov, 2015, pág. 183).

A ecuación que expresa la corriente de corrosión bajo la polarización lineal se expresa de la siguiente manera:

$$I_{corr} = \frac{b_c b_a}{2.303(b_c + b_a)} \frac{1}{R_p} \quad (10)$$

Dónde: b_a y b_c representa las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente, y R_p = resistencia de polarización (Popov, 2015, pág. 183).

1.9.2 Extrapolación de Tafel

La extrapolación de Tafel es un método que proporciona una medición directa de la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión, y es muy utilizada para predecir la tasa de corrosión de varios sistemas de corrosión. Es técnica de monitoreo de tasa de corrosión, con mayor exactitud que es igual o mejor a la técnica convencional de medición por pérdida de peso (Popov, 2015, pág. 202).

La rápida determinación de la velocidad de corrosión con las curvas Tafel presenta una ventaja para la evaluación de inhibidores y comparación de aleaciones. Para las mediciones de corrosión son tomadas usando un potenciostato que está conectado a una celda de electroquímica. El metal esta polarizado en un rango de 150-300 mV referentes al OCP (*Open Circuit Potencial*) el salto de voltaje normalmente está dentro de los 5-10 mV (Cargua, 2019, pág. 34).

De tal forma, la extrapolación de Tafel (ya sea en la recta anódica o catódica), correspondiente a una reacción controlada por la transferencia de energía, nos permite conocer la densidad de corriente (i_{corr}).

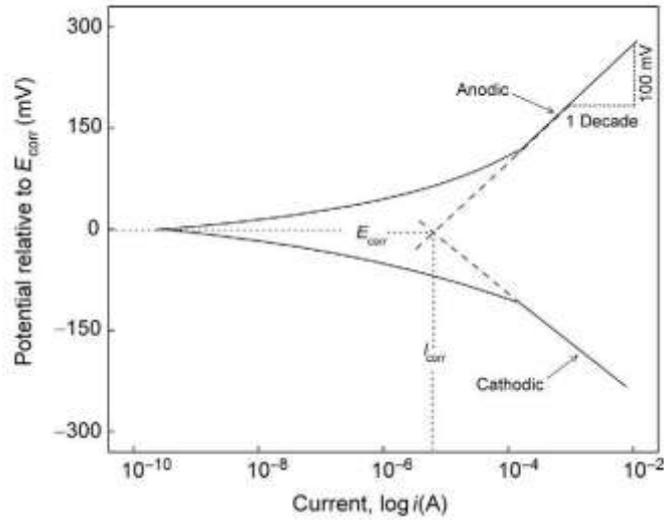


Figura 28-1: Extrapolación de Tafel

Fuente: (Popov, 2015, pág. 204)

Basandose en la figura 28-1, ese puede indicar que se hace necesario por lo menos 1 decano de densidad de corriente y un ΔV de 100mV sobre una sección de la curva que posea una relación lineal entre sus variables.

El poco uso de las curvas anódicas es debido a la carencia de zonas linealmente dependientes, por esta razón, para muchas aleaciones metálicas presentan una conducta activa-pasiva, para esto es necesario solo valerse de la curva catódica como se ilustra en la figura 29-1 (Stansbury & Buchanan, 2000, pág. 237).

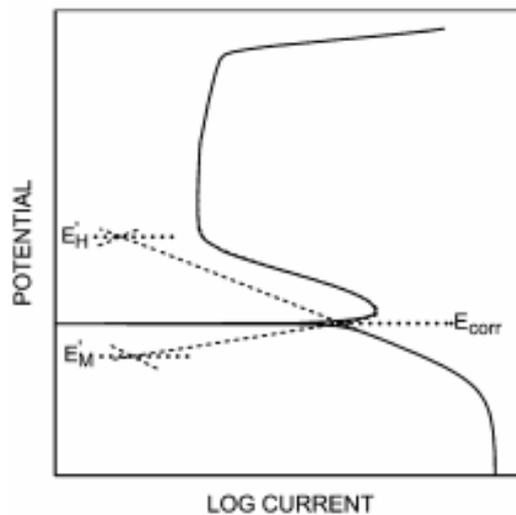


Figura 29-1: Extrapolación de Tafel catódica.

Fuente: (Stansbury & Buchanan, 2000, pág. 283).

1.9.3 Circuito de potencial abierto (OCP).

La técnica de medición del OCP (*Open Circuit Potential*), refleja como cambia el potencial en relación al tiempo de un electrodo de trabajo, asociándolo con un electrodo de referencia, los dos electrodos encontrándose dentro del mismo ambiente, con una aplicación nula de potencial o corriente. Las variaciones de OCP, que presenta esta técnica deben ser únicamente originadas por la varianza en la intercala electrolito-metal, debido a esto el electrodo de trabajo debe poseer características estables es decir que no varien con el tiempo, por lo general los aumentos de OCP indican que se ha formado una capa que provoca pasivación sobre el metal, que está en contacto íntimo con el medio.

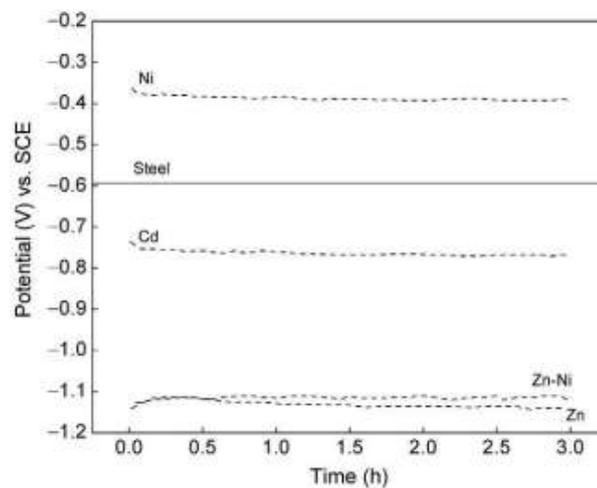


Figura 30-1: OCP de varios recubrimientos.

Fuente: (Popov, 2015, pág. 201).

1.9.4 Espectroscopia de impedancia electroquímica.

La (EIS) Espectroscopia de Impedancia Electroquímica es una técnica electroquímica de corrosión, en la que se aplica una señal de corriente alterna (CA) al sistema, y analiza la respuesta frente al estímulo generado, por lo general se induce una señal de voltaje y se mide una respuesta de corriente. Dicho proceso es muy eficiente cuando se trata de la caracterización superficial de metales, es decir, esta técnica se usa cuando se desee obtener información acerca de las propiedades del sistema como son los mecanismos de corrosión, formación de productos de corrosión, difusión electrónica, y películas o capas de corrosión sobre el material estudiado.

La impedancia del circuito se define como:

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \varphi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \varphi)} \quad (11)$$

La ecuación (11), describe una perturbación a la interfaz de un voltaje armónico $V_0 \sin(\omega t)$ de amplitud E de algunos mV y cuya frecuencia varía desde los mHz, hasta MHz, como respuesta se detecta una corriente de $i_0 \sin(\omega t + \varphi)$ de esta forma se puede graficar un diagrama en el plano complejo (Z), en el cual nos permite graficar la parte real (Z') e imaginaria y la parte imaginaria (Z'') de la impedancia, la frecuencia angular se sigue a la siguiente fórmula $\omega = 2\pi f$ (Cargua, 2019, pág. 36), (Lvovich, 2014, págs. 486-487).

Diagrama bode: Caracteriza una respuesta dentro del campo de existencia de la frecuencia para un sistema dado. Está constituido por dos partes; una corresponde al valor o magnitud de la respuesta y mientras que la otra permite evaluar el desplazamiento en fase de una señal a la salida del sistema relacionándolo con la entrada para una frecuencia dada (Genescá, 2002, págs. 64-71), (Cargua, 2019, pág. 37).

Diagrama Nyquist: Estos diagramas generan las funciones de transferencia que sirven para la modelación del comportamiento físico del sistema, ya que proporciona información de cuán estable es la respuesta ante la excitación externa, en otras palabras, este tipo de diagramas nos favorece conocer el circuito equivalente físico (LRC) o (RC) (Genescá, 2002, págs. 64-71), (Cargua, 2019, pág. 37).

1.10 Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización son aquellas que nos permiten evaluar las propiedades metalográficas de los materiales metálicos siendo una de estas la Espectrometría de emisión óptica de chispa (OES), microscopía y dureza Brinell y microdureza Vickers.

1.10.1 Espectrometría de emisión óptica (OES)

Es una técnica utilizada con el fin de cuantificar los elementos presentes en los materiales metálicos como el acero y aleaciones ferrosas y no ferrosas, a excepción de polvos, la espectrometría consiste en generar un arco que genere la suficiente energía para pulverizar la muestra y producir iones con la característica que se encuentran excitados eléctricamente todo esto

comprendido en el espectro visible de (130-800nm). El esquema de funcionamiento se presenta en la figura 31-1.

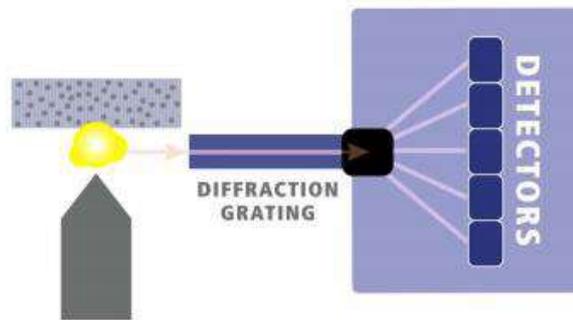


Figura 31-1: Funcionamiento del OES de chispa.

Fuente: (Escudero, 2016, pág. 11)

1.10.2 *Microscopia*

Se trata de una técnica que permite el estudio de características de un metal o una aleación a partir de escalas microscópicas. Este procedimiento tiene como objetivo determinar tamaño de grano, forma, inclusiones y distribución de fases, las cuales tienen gran influencia sobre las propiedades mecánicas del metal. Esta técnica depende de diferentes factores como el cuidado y limpieza que se tenga en la muestra. Mismo que debe presentar una superficie plana, sin ralladura, capaz de permitir una buena visibilidad mediante el microscopio.

1.10.3 *Dureza*

La dureza es una propiedad de los materiales que presentan al ser indentados con un marcador o indentador con una determinada fuerza, este proceso lo realiza un durómetro que usa sistemas de palanca para aplicar dichas cargas.

Basado en el sistema de prueba, la dureza es expresada mediante una magnitud inversamente proporcional a la penetración de indentación para una carga y marcador especificado, o proporcional a una carga media sobre el área de la indentación o huella. (Callister, 2010)

1.10.3.1 Dureza Brinell.

Es un método de medición de dureza a través de una máquina calibrada, forzando una bola de acero, o bien de carburo de tungsteno. La prueba consiste en aplicar una carga, contra la superficie del material durante un lapso de tiempo, dejando una indentación sobre el material ensayado. Este valor medido del diámetro de esta indentación servirá para aplicar la siguiente fórmula y determinar su dureza.

$$HB = \frac{L}{\left(\frac{\pi D}{2}\right) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (12)$$

Dónde: L= carga de prueba [kg]; D= diámetro de la bola [mm]; d= diámetro de impresión[mm] (Cargua, 2019).

1.10.3.2 Dureza Vickers

Para determinar la magnitud de esta dureza se utiliza un indentador piramidal de diamante de base cuadrada, el ángulo que se forma entre dos caras opuestas del indentador es de 136°. La dureza Vickers se emplea bajo el mismo principio con el que se trabaja para la dureza Brinell (Avner, 1977).

$$HV = \frac{1.854L}{d^2} \quad (13)$$

Dónde: L= carga de prueba [kg];

d= diámetro de impresión [mm].

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo y nivel de investigación.

Para el presente trabajo de titulación se realizará una investigación de tipo: *Experimental*, (se analizará cada una de las variables y efectos que se presenten durante los ensayos electroquímicos). *Sincrónica*, (la experimentación se realizará en tiempo menor a un año). *Cuantitativa*, (se recolectará los datos de varios ensayos realizados a las probetas suministro y tratamientos térmicos). *Cualitativa*, al analizar características que hacen de cada tratamiento térmico único.

El grado de profundidad dicta el nivel de este trabajo y el alcance del mismo, así que el nivel de investigación será aprehensivo ya que se analizarán y compararán datos de desgaste por corrosión y efectos de la adición de CO₂ en la velocidad de corrosión y los resultados obtenidos en esta investigación serán un aporte a la industria petrolera, por parte de los organismos generadores de nuevos conocimientos.

2.2 Descripción de la investigación.

Los aceros API 5L tienen un amplio uso en la industria del petróleo, ya que son utilizados en el transporte de crudo y gas (gasoductos y oleoductos). Debido a la afección que poseen estos en las condiciones de transporte es necesario analizar alternativas para mejorar el comportamiento y vida útil de estos aceros. El estudio está centralizado a la aplicación de tratamientos térmicos con el fin de evaluar la incidencia y el mejor comportamiento a corrosión en cada tratamiento térmico con el fin de evitar en específico la corrosión dulce (corrosión por CO₂).

2.2.1 Metodología.

En la figura 1-2, se presenta un diagrama donde se puede visualizar la metodología a seguir en el presente proyecto.

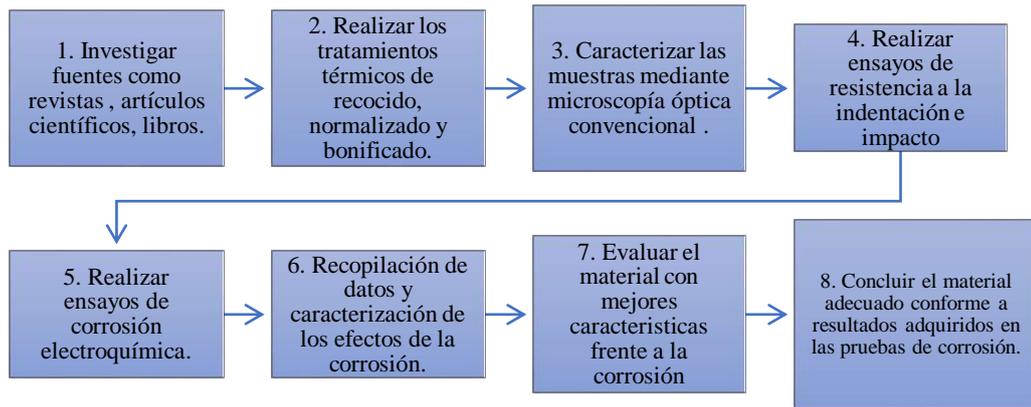


Figura 1-2: Diagrama de metodología del proyecto.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

2.2.2 Descripción de la metodología.

- Inicialmente se recolectará información en fuentes como libros, revistas, artículos científicos, documentos técnicos, entre otros, con la finalidad de respaldar un correcto desenvolvimiento del problema planteado.

Entre los temas más destacados para la presente investigación son:

- Tratamientos térmicos de los aceros API 5L.
- Diagramas de fase de los aceros de baja aleación.
- Temperaturas promedio ambientales adecuadas para la corrosión dulce.
- Durómetros para los ensayos de dureza.
- Caracterización del material mediante metalografías.
- Para realizar los ensayos de corrosión y metalografía se emplearán los equipos del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.
- Para la etapa final del proyecto se escogerá el mejor tratamiento térmico que brinde un excelente comportamiento ante la corrosión dulce.

2.3 Población y muestra.

Para determinar el tamaño de la muestra de análisis se considera un diseño experimental basado en la varianza unifactorial, considerando como única variable independiente el cambio de tratamiento térmico. Por tal, es necesario el promedio de dureza de cada tratamiento térmico.

Tabla 1-2: Medida promedio realizada para cada tratamiento térmico del acero API 5L.

%	μ
Recocido	130
Normalizado	148
Bonificado	158

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

$$\sum_{i=1}^3 \mu = 436$$

$$\bar{\mu} = \frac{436}{3} = 145,33$$

$$\tau_1 = (\mu_1 - \bar{\mu}) = 130 - 145,33 = -15,33$$

$$\tau_2 = (\mu_2 - \bar{\mu}) = 148 - 145,33 = -2,33$$

$$\tau_3 = (\mu_3 - \bar{\mu}) = 158 - 145,33 = 12,67$$

$$\sum_{i=1}^3 \tau^2 = 402,67$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \tau^2}{n-1}}$$

$$s = 14,286$$

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_i^a \tau^2}{a s^2}$$

n= número de probetas.

$$a= 3$$

a= N° tratamientos térmicos.

Con un error de $\alpha=0,01$

$$\Phi^2 = \frac{n \times 1632,67}{3 \times 14,286^2} = 3,999n$$

A fin de encontrar los valores de la potencia, es necesario hallar el valor de la probabilidad de aceptar la hipótesis β que se encuentra localizando las curva con un error $\alpha=0,01$, con el valor

$a(n-1)$ se traza una línea vertical con el valor de Φ y la horizontal nos dará como resultado el valor β . (Cargua, 2019)

En la Tabla 2-2, se detalla los valores necesarios para la evaluación de la técnica de muestreo.

Tabla 2-2: Procedimiento para la evaluación de muestras y análisis mediante el grado de libertad.

n	Φ^2	Φ	a(n-1)	β	Potencia (1-β)
2	7,999	2,880	2	-	-
3	11,999	3,464	4	-	-
4	15,997	3,999	6	0.068	0.932

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Fuente: (Cargua, 2019)

El grado de libertad representa un paso importante al momento de escoger la figura correcta que se expresa de la siguiente forma:

$V_1 =$ Grado de libertad

$$V_1 = (n-1) = (4-1) = 3$$

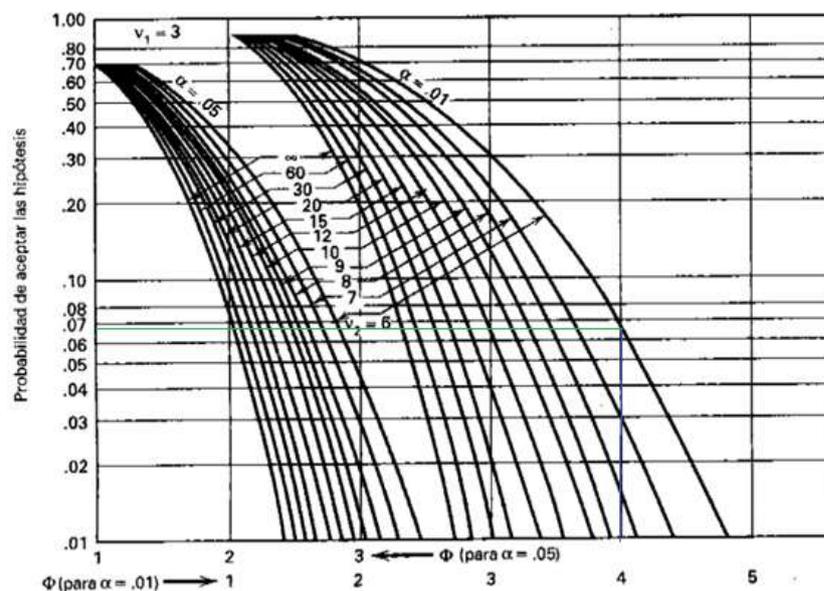


Gráfico 1-2: Curvas características para análisis de varianza.

Fuente: (Montgomery, 2004, pág. 654)

Mediante el proceso descrito se obtiene como resultado la cantidad de probetas necesarias para realizar las dos técnicas de caracterización. Para el presente trabajo de investigación la cantidad

de probetas son 4, de las cuales se dividirán dos muestras para ensayos de corrosión acelerada, una muestra para ensayos de dureza Brinell y una muestra para ensayos de dureza Vickers.

2.4 Materiales.

Los compuestos químicos, equipos y materiales utilizados durante los ensayos de corrosión, se detallan en las Tablas 3-2, Tablas 4-2.

Tabla 3-2: Reactivos y compuestos necesarios para la elaboración, análisis del proceso.

Compuestos	Detalle	Propiedades Físicas y Químicas
1. Hidróxido de Sodio (NaOH)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 39,997 g/mol - Densidad: 2,1 g/cm³ - Pureza: 99,7 %
2. Cloruro de sodio (NaCl)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 58,443 g/mol - Densidad: 2,16 g/cm³ - Concentración: 24,53 g/L
3. Cloruro de Magnesio (MgCl ₂)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 95,211 g/mol (anhidro) - Densidad: 2,32 g/cm³ - Concentración: 5,2 g/L
4. Sulfato de Sodio (Na ₂ SO ₄)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 142,04 g/mol (anhidro) - Densidad: 2,664 g/cm³ (anhidro) - Concentración: 4,09 g/L

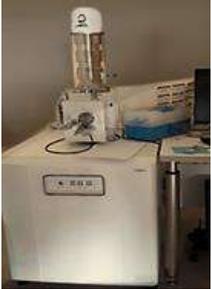
Compuestos	Detalle	Propiedades Físicas y Químicas
5. Cloruro de Calcio (CaCl ₂)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 110,99 g/mol - Densidad: 2,15 g/cm³ - Concentración: 1,16 g/L
6. Cloruro de Potasio (KCl)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 74,55 g/mol - Densidad: 1,987 g/cm³ - Concentración: 0,695 g/L
7. Bicarbonato de Sodio (NaHCO ₃)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 84,01 g/mol - Densidad: 2,173 g/cm³ - Concentración: 0,201 g/L
8. Bromuro de Potasio (KBr)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 119,002 g/mol - Densidad: 2,74 g/cm³ - Concentración: 0,101 g/L
9. Ácido Bórico (H ₃ BO ₃)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 61,83 g/mol - Densidad: 1,435 g/cm³ - Concentración: 0,027 g/L

Compuestos	Detalle	Propiedades Físicas y Químicas
10. Cloruro de Estroncio (SrCl ₂)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 157,84 g/mol - Densidad: 3,05 g/cm³ - Concentración: 0,025 g/L
11. Fluoruro de Sodio (NaF)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 41,9881 g/mol - Densidad: 2,56 g/cm³ - Concentración: 0,003 g/L
12. Alúmina (Al ₂ O ₃)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 101,96 g/mol – - Densidad: 3,961 g/cm³
13. Agua destilada (H ₂ O)		<ul style="list-style-type: none"> - Masa molar: 18,015 g/mol - Densidad: 1 g/cm³

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 4-2: Equipos de laboratorio utilizados en el análisis del ensayo corrosivo.

Equipos	Detalle	Características Principales
1. Balanza analítica.		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: OHAUS. - Capacidad máxima: 220 g. - Precisión: 0,0001 g.
2. pH metro		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Oakton - Modelo: pH 700 - Rango pH: -2 -16
3. Agitador magnético		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: SONICA Sweep System. - Modelo: 500 WATT MODEL. - Rango de temperatura: 5-40 °C. - Humedad relativa: 20-90%
4. Celda de corrosión		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Metrohm Autolab. - Tipo de Probeta: Circular. - Capacidad: 1 L - Área expuesta: 1 cm².
5. Potenciostato/ Galvanostato.		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Metrohm Autolab. - Modelo: Autolab PGSTAT204. - Corriente máx.: ±400 mA. - Rango (i): 100 mA-10nA. - Rango potencial: ±10V.

Equipos	Detalle	Características Principales
6. Espectrómetro de argón.		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Bruker - Modelo: Q2-ION. - Cobertura: 170 - 685 nm. - Frecuencia (Hz): 50-1000 - Consumo (Ar): 2,5 L/min.
7. Microscopio óptico		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Nikon. - Modelo: Eclipse-E200. - Iluminación: Tipo led
8. Microscopio electrónico de barrido (SEM)		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: Jeol-SEM - Modelo: JSM - IT100 - Aumento: x5 a x300.000. - Resolución: 3nm-(30kv), 4nm(20kv), 8nm(3kv), 15nm(1kv).
9. Banco de lijado		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: S/N. - Capacidad: 2 lijas. - Tipo: Banco manual.
10. Banco de pulido		<ul style="list-style-type: none"> - Marca del equipo: S/N - Numero de platos: 1. - Velocidad de rotación:150/300 rpm

Realizado por: Jefferson Tacuri, Jaime Chulco, 2020

Tabla 5-2: Materiales de laboratorio necesarios para la preparación y evaluación del electrolito.

1. Vasos de precipitación de capacidad 50,100 ml.	2. Piceta
3. Vidrio reloj	4. Espátula
5. Termómetro	6. Balón aforo 1000 ml.
7. Vidrio reloj	8. Electrodo de referencia Ag/AgCl
9. Contraelectrodos (Acero Inox).	10. Dummy Cell 2.0
11. Papel abrasivo de 1 μ m	

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

2.5 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos se realizaron bajo la siguiente metodología, siguiendo cada uno de los pasos mencionados a continuación:

1. Precalentar el horno a 400 °C.
2. Calentar
3. Permanencia acorde al tratamiento térmico.
4. Enfriamiento

2.5.1 *Recocido.*

Con el fin de obtener la ferrita y perlita se realiza el tratamiento térmico de recocido se realizaron los siguientes pasos:

1. Calentar las probetas a una temperatura mayor a la superior A3 (913-727 °C).
2. Enfriar lentamente dentro del horno hasta el siguiente día.
3. Quitar del horno y limpiar el carbono de la superficie.

2.5.2 *Normalizado*

Con el fin de eliminar tensiones residuales y afinar la microestructura para obtener ferrita y perlita más fina se aplica el siguiente procedimiento:

1. Calentar las muestras a una temperatura superior a la crítica A3 (913-727 °C).
2. Tiempo de permanencia de 1 hora a temperatura constante superior a A3.
3. Retirar del horno y enfriar al aire libre durante un día.

2.5.3 *Bonificado*

Para este tratamiento térmico se realizó inicialmente un temple seguido de un revenido bajo los siguientes parámetros de temperatura.

1. Calentar a una temperatura superior a la crítica A3 (913-727 °C).
2. Tiempo de permanencia de 2 horas temperatura superior a A3.
3. Retirar del horno y enfriar en agua a 25°C.

2.6 **Preparación de las soluciones.**

Para la investigación previa, se utiliza soluciones necesarias para la experimentación como: 1 litro de agua de mar sintética para cada ensayo basado en la norma ASTM D-1141, además de 1 litro de NaOH en concentración 0,1 N, mismo que ayudará a elevar el pH al agua de mar, debido a la disminución de concentración luego de la saturación por CO₂ (gas).

2.6.1 *Elaboración del agua de mar sintética.*

De acuerdo con algunas investigaciones realizadas en las plataformas y pozos petroleros de Akita y Niigata en Japón en el año 2008 de las condiciones in situ del agua de campo petrolífero debe contener los siguientes iones.

Tabla 6-2: Composición química y parámetros de agua extraída del campo petrolífero.

Parámetro	Agua de mar [SW]	Sulfato - Agua salada [SO ₄]	Agua salada [Cl]
Cl ⁻ [mg/L]	25600	25600	25600
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	2640	2640	0
Mg ²⁺ [mg/L]	1280	0	0
Ca ²⁺ [mg/L]	420	0	0
K ⁺ [mg/L]	400	0	0

Fuente: (Handa, y otros, 2010, pág. 793)

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

De acuerdo a las investigaciones realizadas, señalando los iones de la Tabla 6-2, como precursores del proceso de corrosión, es preciso hallar el compuesto ideal, por lo que, en base a líneas de investigación similares sobre el proceso de corrosión, se opta por el agua de mar, mismo que se preparó de acuerdo a los parámetros establecidos en el estándar ASTM D1141-98, en la tabla siguiente se detallan los valores de los elementos químicos constituyentes del agua de mar sintético.

Tabla 7-2: Concentración en (g/L) del agua de mar sustitutiva.

Compuestos Químicos	Concentración en g/L
NaCl	24.53
MgCl ₂	5.20
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201
KBr	0.101
H ₃ BO ₃	0.027
SrCl ₂	0.025
NaF	0.003

Fuente: ASTM D1141-98 (Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water) (D1141-98, 2013)

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Para la preparación del agua de mar sustitutiva se tiene los siguientes pasos:

1. Pesar cada compuesto químico en una balanza analítica.
2. Añadir los compuestos químicos de la Tabla 7-2 en 100 ml de agua destilada.
3. Colocar cada uno de los compuestos químicos acorde se homogenice la solución.
4. Aforar a un litro con agua destilada.
5. Homogenizar la solución.

6. Dejar reposar la solución por 24 horas y homogenizar nuevamente.

2.6.2 *Elaboración de la solución de neutralización.*

Según los investigadores (Hooman & Mehdi, 2019) y (Abd, Naji, & Hashim, 2019) sobre el proceso de corrosión, establecen que para que exista una variación en el comportamiento del acero a corrosión (su tasa de corrosión), los valores de pH deben estar dentro de las condiciones in situ evaluadas en algunos pozos petroleros con rangos de ($4 < \text{pH} < 6$).

Por tal razón, es necesario ajustar el pH de la solución sustituto de agua de mar, con la adición de NaOH a 0,1 N (normalidad recomendable), en la ecuación (14) se determina los gramos requeridos para la preparación de la solución.

$$N = \frac{eq}{L_{\text{solución}}}$$

$$N = \frac{\text{moles de NaOH}}{L_{\text{solución}}} \tag{14}$$

$$0,1 = \frac{\text{moles de NaOH}}{1L_{\text{solución}}}$$

$$\text{moles de NaOH} = 0,1 \text{ mol NaOH} \times \frac{39,997 \text{ g}}{1 \text{ mol NaOH}} = 3,999 \text{ g NaOH (puro)}$$

Dónde: N, representa la normalidad de la solución; eq, significa el número de moles equivalentes de NaOH.

Luego de calcular los gramos requeridos de NaOH, se procede a:

- *Primero:* Pesar en una balanza analítica 3.999 gramos de NaOH.
- *Segundo:* Disolver el compuesto NaOH en 50 ml, con ayuda de un agitador magnético.
- *Tercero:* Colocar la solución de 50 ml de NaOH, en un balón de aforo de capacidad 1000 ml.
- *Cuarto:* Aforar hasta 1000 ml.

2.6.3 *Saturación del electrolito con CO₂.*

Con la finalidad de recrear o aproximar las condiciones adecuadas del agua de pozos petrolíferos es necesario saturar las soluciones con CO₂ (99,99%) de pureza, esto según recomiendan algunos autores e investigadores (Askari, Aliofkhazraei, Ghaffari, & Hajizadeh, 2018) y (Olvera, Genesca, & Flores, 2015), el tiempo de saturación depende mucho del ensayo que se vaya a realizar en caso de ser

ensayos para medición de velocidades de corrosión por pérdidas de peso, saturar 8h y en caso contrario si son pruebas en celdas electrolíticas el tiempo de saturación debe hacerse de (1-2) horas, ahora una vez que se ha saturado el pH será bajo ligeramente ácido y para esto se necesitara una neutralización con iones OH.

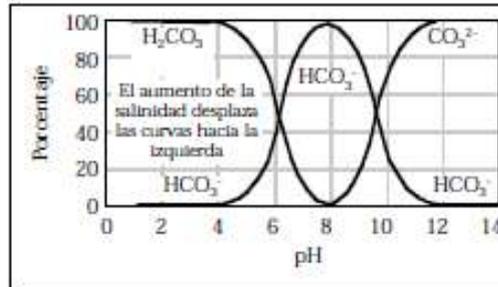


Figura 2-2: Equilibrio carbonato-bicarbonato.

Fuente: (API, 2001, pág. 115)

2.7 Alcalinización del electrolito.

De acuerdo a la investigación ya detallada con anterioridad, en el proceso de saturación con CO₂ existe la disminución de pH, por lo que es necesario saber a qué concentración se requiere estabilizar el electrolito, en base a la ecuación (15).

Como se enuncia en el apartado anterior, los efectos visibles se pueden apreciar a partir de un pH cercano a 4 y 6, por lo tanto, para la investigación, se escoge un nivel de pH 7, debido a que las propiedades a corrosión se verán afectadas con una mayor liberación de iones hierro, con esto se inicia el cálculo de los OH⁻ necesarios para subir el pH.

$$pH = 14 + \log[OH^-] \tag{15}$$

Dónde:

OH⁻, representa los iones necesarios para determinar una concentración de pH.

Tabla 8-2: Características necesarias para que se produzca el intercambio de OH⁻

Estado	Concentración OH ⁻	Diferencia	Neutralización
Inicial	$1 \times 10^{-5} \frac{mol\ OH^-}{L}$	$9,99 \times 10^{-5} \frac{mol\ OH^-}{L}$	8ml de NaOH a 0,1N, para aforar 1000 ml de electrolito.
Final	$1 \times 10^{-6} \frac{mol\ OH^-}{L}$		

Realizado por: Jefferson Tacuri, Jaime Chulco, 2020

De acuerdo con (Chang & College, 2002, págs. 660-665), la ecuación (15), se emplea en bases fuertes (capaces de donar iones OH^-), por lo que se utiliza para obtener una reacción de neutralización, verificando el traspaso de iones OH^- , a la solución durante la disociación al 100%.



Figura 3-2: Solución de NaOH de a 0,1 N.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

2.8 Caracterización de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.

Para realizar la caracterización de las muestras se usa dos técnicas, metalográfica y resistencia a la indentación en los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.

La metalografía se realizará a probetas de acero API 5L X42 y Grado B, mismas que se encuentran tratadas térmicamente a procesos recocido, normalizado, bonificado, además de suministro, verificando su microestructura e inclusiones que pueden afectar el proceso de corrosión,

Mediante la técnica de resistencia a indentación se verificará las características mecánicas que presenta los materiales frente a condiciones de trabajo.

2.8.1 *Análisis metalográfico de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.*

Para el análisis metalográfico es necesario que las probetas se preparen de acuerdo con el estándar ASTM E3-11, de forma que se lleve a cabo un rectificado, hasta obtener las dimensiones requeridas, 3 mm de espesor y un diámetro de 14.4 mm.

Luego de obtener las probetas con las especificaciones dimensionales, se procede al desbaste manual en los bancos de lijas, por medio de papeles abrasivos de la serie 240, 320, 400, 600, 1000, 1200 y 1500.

Para obtener un acabado tipo espejo se procede a pulir a una velocidad de 150 rpm, haciendo uso de alúmina Buehler de 1 μ ,

2.8.1.1 *Caracterización de los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B mediante espectrometría.*

De acuerdo con el estándar ASTM 1251, indica la aplicación de la chispa en tres puntos, con el objetivo de obtener datos de los elementos que componen el material, a fin de obtener un promedio de la composición en % peso de la probeta, en un tiempo aproximado de 15 minutos en cada punto, dichos datos son necesarios para vincular de forma adecuada al material más cercano.

2.8.1.2 *Microscopía óptica y análisis SEM.*

Con la finalidad de analizar la concentración de ferrita y perlita, además del cambio microestructural en los aceros API 5L, es necesario realizar la revelación microestructural haciendo uso del químico Nital 5%.

Las muestras son observadas a una amplificación de 20X, 50X y 100X, con ayuda del microscopio óptico Olympus BX41M-LED y el microscopio electrónico Jeol, permitiendo identificar fases presentes en el acero, además de un análisis EDS en las probetas de corrosión.

2.8.2 *Análisis de resistencia a la indentación (dureza).*

Para el ensayo de dureza se utiliza dos métodos de análisis: ensayo de Dureza Vickers y ensayo de Dureza Brinell.

La ejecución del ensayo de dureza Vickers se realiza en el equipo Micro-durometro FUTURE TECH, modelo FM800, de serie FMX8340. Cada una de las mediciones se hacen bajos los siguientes parámetros.

- Carga aplicada: 9,807 N
- Tiempo de aplicación: 15 segundos.

De forma similar se realiza los ensayos de dureza Brinell, mediante el uso de Durómetro ERNST, modelo NR3 DR, de serie 4651. Cada una de las mediciones se realiza bajo los siguientes criterios.

- Patrón de ensayo: 95,4 HB/30 \pm 5.
- Tiempo de duración de la fuerza: 10 segundos.

2.8.3 *Ensayos de impacto*

Para el ensayo de impacto se considera la norma ASTM E23, ensayo de impacto para materiales metálicos a temperatura ambiente, mediante el equipo Máquina de ensayos Charpy PIC 450/C con serie M152552AR14, cada uno de los ensayos sigue los siguientes parámetros:

- Entalle normalizado en “V”
- Energía aplicada de 450 J (Joules)

2.8.4 *Ensayos electroquímicos en los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.*

Los ensayos de corrosión acelerada, se realiza en el laboratorio de Metalografía de la Facultad de Mecánica para las probetas suministro y tratamientos térmicos de normalizado, recocido y bonificado, los análisis se detallan en la tercera parte del proyecto de investigación.

2.8.5 *Celda de corrosión.*

La celda de corrosión está compuesta por cinco partes designadas bajo la estándar ASTM (G5, G59, G61).

- Recipiente de vidrio con la capacidad de 1 L.
- Porta muestras con un área de 1cm².
- Electrodo de trabajo (WE): Probetas de bajo carbono en sus diferentes composiciones.
- Electrodo de referencia (RE) de Ag/AgCl.
- 2 contra electrodos de acero inoxidable (CE) de 2mm de diámetro.

- Termómetro de 0-150° C

2.8.6 Parámetros experimentales utilizados en los ensayos de corrosión.

Para las pruebas de corrosión se realiza y se toma en cuenta los parámetros ya mencionados en el capítulo I y enunciados a continuación.

1. Saturación de la solución con CO₂ durante 1 hora.
2. Determinación del OCP con intervalo de tiempo de 30 min.
3. Realizar las voltamperometrías a las siguientes condiciones.
 - a) Voltajes de (±300 mV Vs. OCP).

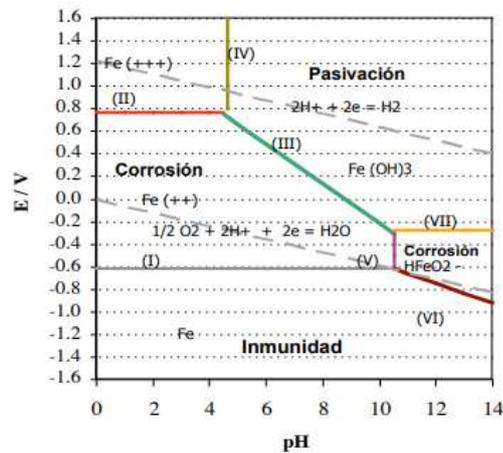


Figura 4-2: Diagrama que demuestra la relación entre pH-potencial Fe.

Fuente: (Popov, 2015, pág. 170)

- b) Tasa de escaneo (Swep rate) 0,175 mV/s

4. Temperatura ambiente

El proceso de corrosión suele realizarse a diferentes temperaturas, por tal, para la presente investigación del proceso de corrosión acelerada, se toma a consideración autores como, (Olvera, Genesca, & Flores, 2015) mismo que recomienda, el agua debe estar entre los intervalos de (40-80°C) y otros investigadores como (Benamor, Talkhan, Nasser, Hussein, & Okonkwo, 2018) que puede variar entre los (20-60°C), dependiendo básicamente del compuesto ideal.

Por lo que, para este trabajo de investigación en base al electrolito, se ha tomado en cuenta el sustituto de agua de mar, a una temperatura entre 20-60 °C, mezclando la saturación de CO₂ al proceso de corrosión en la celda electroquímica.

Además, para el estudio de las velocidades de barrido se toma en cuenta a (Macdonald, Urduqui-Macdonald, & Rocha-Filho, 1991), el autor concluye: si se tiene velocidades iguales o menores a 200 mV/s, la resistencia de polarización no se ve afectada en los ensayos de corrosión.

De acuerdo con las citas mencionadas, se utiliza temperaturas de acuerdo con (Benamor, Talkhan, Nasser, Hussein, & Okonkwo, 2018), temperatura ambiente y apreciaciones de velocidad menores a 200 Mv/S.

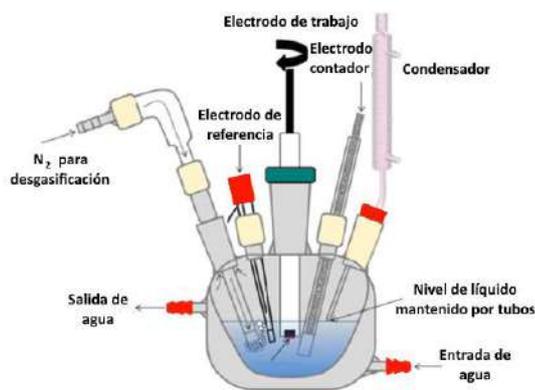


Figura 5-2: Conexión de la celda de corrosión.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

2.8.7 Mediciones electroquímicas en los aceros API 5L X42 y API 5L Grado B.

Las mediciones electroquímicas se obtienen a partir del uso de un Potenciostato/Galvanostato PGSTAT 204 Metrohm Autolab y NOVA 2.1 Software. Dichos datos se determinan en base a cada tratamiento térmico, evaluando la velocidad de corrosión, por lo que su valoración se detallará en los resultados pertinentes.



Figura 6-2: Potencioestato/Galvanostato PGSTAT 204.

2.9 Evaluación de la corrosión.

Las muestras ensayadas por medio del proceso de corrosión se inspeccionan mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), mismo que permite observar la superficie del material, además de visualizar productos de corrosión, la exploración de los productos se realiza mediante un análisis de espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS), y lograr además la obtención de un microanálisis químico.

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

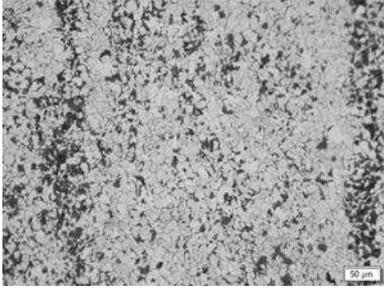
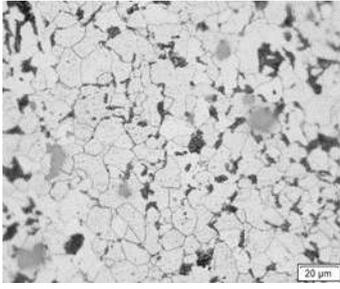
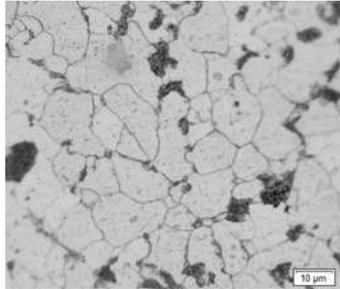
En esta sección se detalla los resultados obtenidos de la experimentación, donde se analiza cada uno de los tratamientos térmicos realizados en los aceros API 5L de categoría, X42 y Grado B, microestructura, ensayos mecánicos como impacto y resistencia a la indentación, además de verificar las tasas de resistencia a la corrosión.

3.1 Microscopía óptica del acero API 5L X42.

La microscopía óptica representa una gran ayuda en la ciencia de los materiales, ya que muchas de las técnicas de iluminación permiten la captura digital de imágenes como microfotografías en alta resolución, permitiendo de esta forma observar en los materiales, inclusiones, fases dentro del material, para las probetas asignadas se utilizó lente ocular de 10X.

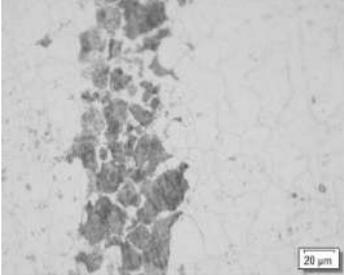
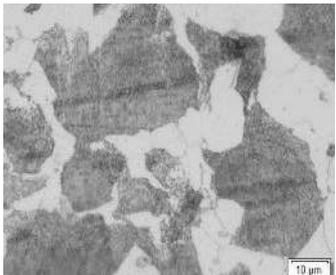
En la Tabla 1-3, se muestra las metalografías obtenidas del material base del acero API 5L X42, previo al ensayo de corrosión.

Tabla 1-3: Microestructura del material suministro en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Suministro API 5L X42		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta suministro		
		
Descripción:		
<p>El proceso de toma de micrografías se realiza con los aumentos especificados, haciendo uso del revelador Nital al 5% en un tiempo de 5 segundos en todas las probetas. De acuerdo con las micrografías presentadas se puede observar una matriz de ferrita (sección blanca), junto a pequeñas áreas de perlita (sección oscura), mismas micrografías presentan la dirección en la que fueron obtenidas en el proceso de manufactura, por lo general este tipo de microestructura se obtiene en tubos sin costura mediante el proceso de laminación, (Ochoa, Vega, Pébere, Lacaze, & Brito, 2015), además posee forma de grano de sección irregular, observando además pequeñas inclusiones redondas y alargadas de color gris, al momento de visualizar la microestructura de la probeta de suministro. (Villavicencio, Ulloa, Lozada, Moreno, & Castro, 2020)</p>		

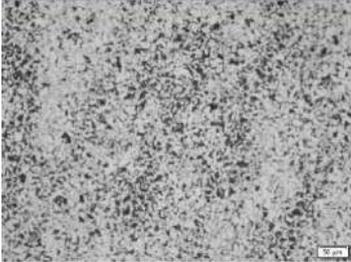
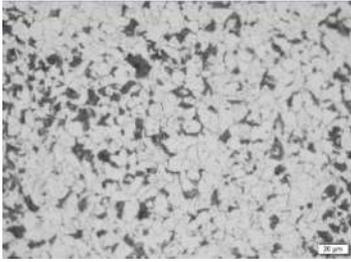
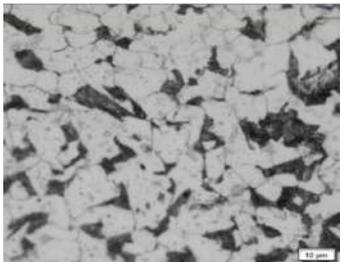
Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 2-3: Microestructura del material con tratamiento de recocido en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Recocido API 5L X42		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta recocido		
		
Descripción:		
<p>En base a las micrografías presentadas se puede observar una matriz de ferrita (sección blanca), además de líneas alargadas (bandas) de perlita, en gran mayoría en los bordes de grano se puede observar ferrita, propias del acero API 5L X42 en estado de recocido, se observa también inclusiones negras, mismas que se detallan como óxido de aluminio junto a pequeñas cantidades de óxido de silicio.</p>		

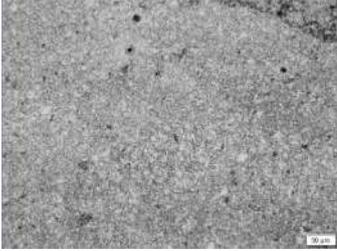
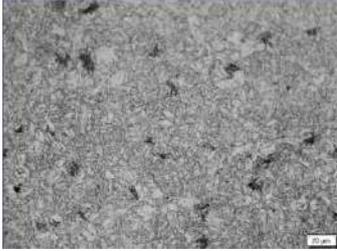
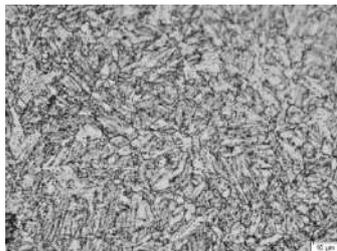
Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 3-3: Microestructura del material con tratamiento de normalizado en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Normalizado API 5L X42		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta Normalizado		
		
Descripción:		
<p>De acuerdo con las micrografías detalladas se observa la matriz ferrítica (sección blanca) junto a pequeñas secciones de perlita (sección negra), por lo que se argumenta que se encuentra 80% de Ferrita + 20% Perlita, en este caso la ferrita proeutectoide se encuentra ubicada en los límites de grano, además se observa pequeñas cantidades de óxido de aluminio (inclusiones).</p>		

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 4-3: Microestructura del material con tratamiento de bonificado en aumentos de 20X, 50X, 100X.

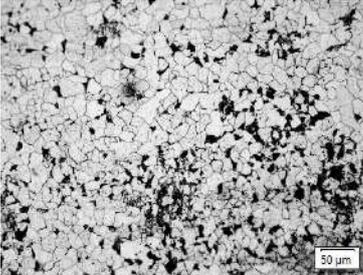
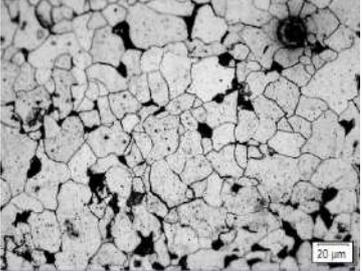
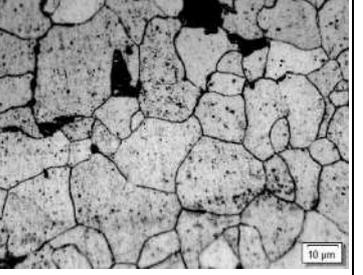
Probeta de Bonificado API 5L X42		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta bonificado		
		
Descripción:		
<p>De acuerdo con las micrografías se observa la formación de espigas de perlita, mismas de un tratamiento térmico de bonificado, ya que, en el proceso de temple, las agujas son características principales, de forma específica se tiene, matriz de cementita más la adición de perlita (ECIJG, 2011), adicionalmente presenta inclusiones de forma redonda y alargada, clasificadas como óxidos de aluminio y óxidos de hierro.</p>		

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

3.2 Microscopía óptica del acero API 5L Grado B.

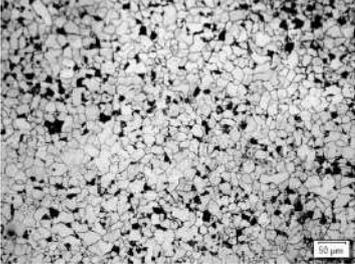
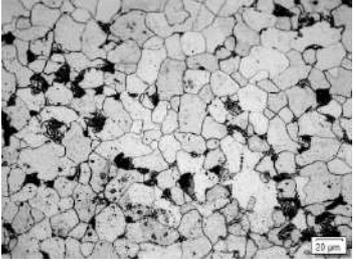
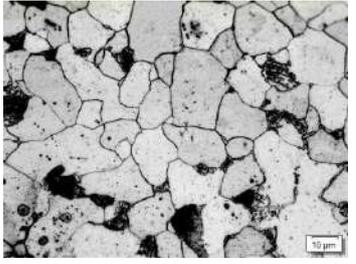
La microscopía óptica posee un amplio campo de visión que garantiza muy buen rendimiento y posibilidad de recolectar gran cantidad de datos como fases dentro del material, inclusiones, en la Tabla 5-3, se muestran las metalografías obtenidas del material API 5L Grado B, con ayuda de un lente ocular de 10X.

Tabla 5-3: Microestructura del material suministro en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Suministro API 5L Grado B		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta suministro		
		
Descripción:		
<p>La toma de micrografías se realiza con ayuda del revelador Nital al 5%, durante el tiempo de ataque de 5 segundos. Cada una de las micrografías se evalúa a una ampliación de 20x, 50x y 100x.</p> <p>La micrografía a una ampliación de 20X, presenta de forma clara los límites de grano, además de las fases presentes como ferrita (sección blanca) y perlita (sección oscura), mientras que a una ampliación de 50X, se observa mayor cantidad la fase de ferrita en relación con la fase de perlita.</p> <p>Luego de considerar a 20X, 50X, se observa a 100X, donde se constata la fase perlítica en una matriz ferrítica, además de la consideración de inclusiones (óxidos) en los límites del grano.</p>		

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 6-3: Microestructura del material con tratamiento de recocido en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Recocido API 5L Grado B		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta recocido		
		
Descripción:		
<p>En base a las micrografías presentadas se puede observar una estructura lamelar de perlita, con relación a la ampliación de 20X, se observa los límites de grano evidenciando fases de ferrita y perlita, siendo la fase ferrita con mayor contenido, mientras mayor ampliación se tiene (100X), se observa una microestructura de matriz ferrítica junto pequeños granos de perlita.</p>		

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 7-3: Microestructura del material con tratamiento de normalizado en aumentos de 20X, 50X, 100X.

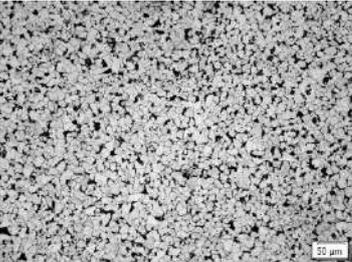
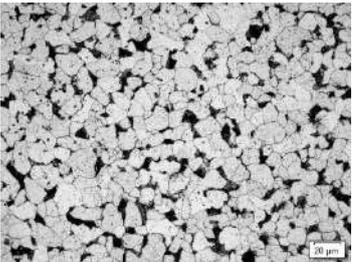
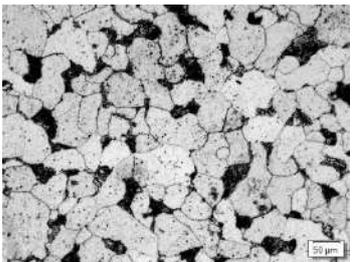
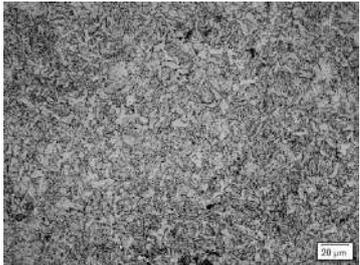
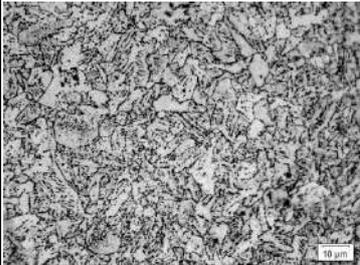
Probeta de Normalizado API 5L Grado B		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta normalizado		
		
Descripción:		
<p>De acuerdo con las micrografías mostradas se tiene fases de ferrita (matriz) más perlita, donde la sección blanca y en mayor cantidad pertenece a la ferrita y la sección oscura pertenece a la fase perlita, con tamaño y forma de grano no homogéneo, luego de analizar con mayor ampliación (100X), se tiene pequeñas formaciones de carburos en los límites de grano, mismas que son por parte del tratamiento dado a la probeta del acero API 5L Grado B.</p>		

Tabla 8-3: Microestructura del material con tratamiento de bonificado en aumentos de 20X, 50X, 100X.

Probeta de Bonificado API 5L Grado B		
Ampliación: 20x	Ampliación: 50x	Ampliación: 100x
Ataque químico realizado a la probeta bonificado		
		
Descripción:		
<p>Conforme a las micrografías obtenidas a la ampliación de 20X, 50X y 100X, se observa la formación de espigas de perlita, características en el proceso de bonificado, además de poseer una matriz de cementita más la adición de perlita (ECIJG, 2011), adicionalmente presenta inclusiones redondas y alargadas clasificadas como óxidos de aluminio.</p>		

3.3 Ensayo de Dureza

3.3.1 Ensayo de Dureza Vickers

Para los ensayos de Dureza Vickers se maquinó 5 probetas adicionales del material API 5L X42 y Grado B, de dimensiones descritas en la Tabla 5-3, con la finalidad de verificar las características mecánicas del material y su respectivo tratamiento térmico.

Los ensayos realizados en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero (CFPMC), se encuentran basados en la norma NTE INEN ISO 6507-1, el informe entregado se encuentra en el Anexo C, los datos promedios obtenidos se detallan a continuación.

Tabla 9-3: Resultados de dureza Vickers promedio para las probetas API 5L X42 de suministro, recocido, normalizado, bonificado

Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HV)	Probetas Ensayadas
Suministro	21	56.9	147.44	
Recocido	20.4	58.6	141.16	
Normalizado	21	56.9	148.46	
Bonificado	20.5	58.5	173.7	

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

De acuerdo con los datos de la Tabla 9-3, para cada una de las muestras, el mínimo valor promedio que se encontró es de la probeta de recocido, en fin, reconociendo que existe un cambio en la microestructura del material, y por debajo de la dureza mostrada de la probeta suministro, al momento de tener un tratamiento térmico de calentamiento a 870°C, mantenimiento por 1 hora y su posterior enfriamiento en la mufla, su cambio es notorio al obtener mejor ductilidad y reducir la dureza del material base (Askeland, 1998).

Tabla 10-3: Resultados de dureza Vickers promedio para las probetas API 5L Grado B, con tratamientos de suministro, recocido, normalizado, bonificado

Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HV)	Probetas Ensayadas
Suministro	20.3	55.5	164.2	
Recocido	21.8	49.7	116.58	
Normalizado	21.7	49.9	138.74	
Bonificado	21.8	49.9	151.9	

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

De acuerdo con los datos de la Tabla 10-3, el máximo valor promedio pertenece a la probeta suministro, al igual que el mínimo valor promedio es de la probeta recocido, es decir, el tratamiento térmico interviene en gran medida a la dureza del material, obteniendo de tal forma mejores características de ductilidad.

3.3.2 *Ensayo de Dureza Brinell*

Los ensayos realizados en el CFPMC, en base a la norma NTE INEN ISO 6506-1, para materiales metálicos arrojó los siguientes resultados promedio detallados en la Tabla 11-3, el informe de los ensayos realizados se encuentra en el Anexo B.

Tabla 11-3: Resultados de los ensayos de dureza Brinell aplicados en las probetas de acero API 5L X42

Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HB)	Probetas Ensayadas
Suministro	21.6	52.2	146	
Recocido	21.4	52.4	129.6	
Normalizado	21.3	52.4	147.4	
Bonificado	21.3	52.6	158	

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

De igual forma se realizó los ensayos para cada una de las probetas: suministro, recocido normalizado y bonificado, hallando valores de dureza promedio mínima en la muestra de recocido, y mayor valor en la probeta de bonificado, ya que su proceso conlleva calentamiento a la temperatura de austenización (870°C) durante 60 minutos y enfriamiento en agua, posterior a ello se realiza el templado a 650°C durante 60 minutos seguido de enfriamiento por aire, concluyendo su aumento en la resistencia y mejor tenacidad del elemento.

Tabla 12-3: Resultados de los ensayos de dureza Brinell aplicados en las probetas de acero API 5L Grado B.

Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HB)	Probetas Ensayadas
Suministro	21	54.4	163.2	
Recocido	21.1	54.2	119.4	
Normalizado	21.2	54.2	139.2	
Bonificado	21.2	54.1	142.2	

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

La Tabla 12-3, presenta los resultados de dureza Brinell para el acero API 5L Grado B, detallando menor dureza para el tratamiento de recocido y mayor dureza a la probeta suministro, expresando mejores características sin ningún tratamiento térmico realizado, si se relaciona algún tratamiento térmico, el proceso de bonificado resulta mejor frente a la obtención de mayor dureza y tenacidad del acero.

3.4 Ensayos de Impacto

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de impacto se detallan en la Tabla 13-3 y Tabla 14-3, el informe completo de los ensayos realizados en el CFPMC se encuentra en el Anexo E.

Cada uno de los datos obtenidos se encuentran en función a los parámetros especificados en la metodología.

Tabla 13-3: Resultados de los ensayos de impacto realizados en probetas de acero API 5L X42.

Tratamiento Térmico	Altura (cm)	Ancho (cm)	Temperatura °C	Humedad %	Energía Absorbida Promedio (J)
Suministro	0.797	0.5	23.8	47.9	84.6
Recocido	0.794	0.503	24.2	47.3	65.9
Normalizado	0.806	0.492	23.8	48.8	92.5
Bonificado	0.777	0.499	23.9	47.8	107.7

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 14-3: Resultados de los ensayos de impacto realizados en probetas de acero API 5L Grado B.

Tratamiento Térmico	Altura (cm)	Ancho (cm)	Temperatura °C	Humedad %	Energía Absorbida Promedio (J)
Suministro	0.947	0.634	22.9	57.3	71.1
Recocido	0.811	0.500	23.1	56.6	45.9
Normalizado	0.798	0.498	22	59.1	51.5
Bonificado	0.799	0.501	22.6	57.5	64.6

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

3.5 Mediciones de pH y temperatura

Para el proceso de corrosión se toma en cuenta las mediciones de pH y temperatura, ya que estos parámetros son características esenciales en la termodinámica de la corrosión.

Tabla 15-3: Valores de pH promedio para las probetas de análisis: Suministro, Normalizado, Recocido y Bonificado del acero API 5L X42.

Electrolito	Probeta	pH luego de saturación de CO ₂	pH luego de la adición de ion OH ⁻	Temperatura (°C)
Solución de agua de mar sintética	Suministro	5,95	7,03	23
	Normalizado	6,10	7,00	23
	Recocido	5,70	7,03	23
	Bonificado	5,87	7,00	23

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 16-3: Valores de pH promedio para las probetas de análisis: Suministro, Normalizado, Recocido y Bonificado del acero API 5L Grado B.

Electrolito	Probeta	pH luego de saturación de CO ₂	pH luego de la adición de ion OH ⁻	Temperatura (°C)
Solución de agua de mar sintética	Suministro	5,74	7,01	23
	Normalizado	5,60	7,04	23
	Recocido	5,69	7,00	23
	Bonificado	5,63	7,03	23

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

3.6 Ensayo de corrosión

Los ensayos de corrosión se realizan en el laboratorio de Metalografía de la Facultad de Mecánica, bajo los parámetros experimentales establecidos en el inciso 2.8.6, haciendo uso de una celda electroquímica, además de la implementación de saturación mediante CO₂.

Los resultados obtenidos de los ensayos de corrosión conforme al electrolito utilizado se encuentran bajo el estándar ASTM D-1141, concluye con los siguientes datos.

3.6.1 Voltamperometría de barrido lineal

Este método se realiza bajo las condiciones mencionadas en el inciso 2.9, cada tratamiento térmico consta de dos probetas de análisis, a fin de percibir el comportamiento de las curvas de polarización.

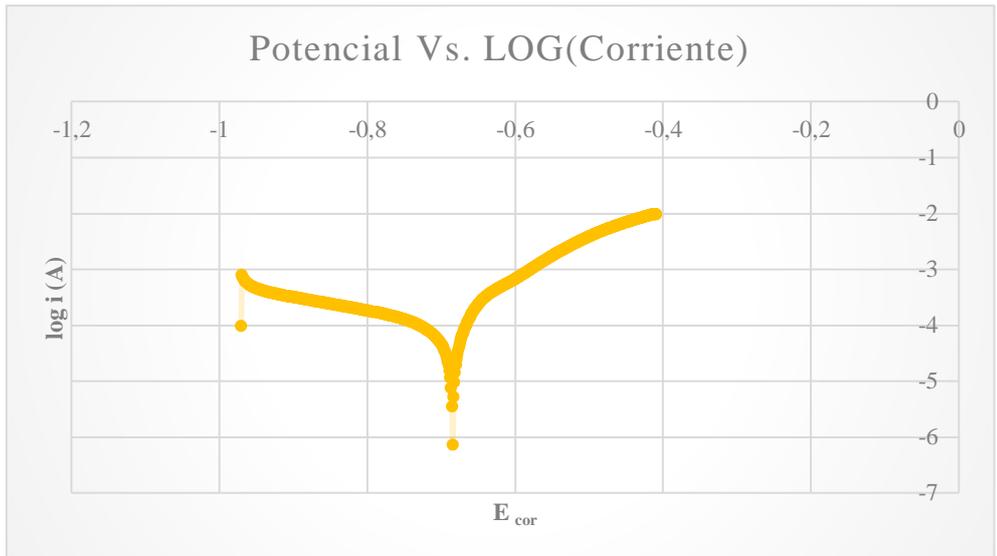


Gráfico 1-3: Curva de polarización de la probeta suministro acero API 5L X42.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

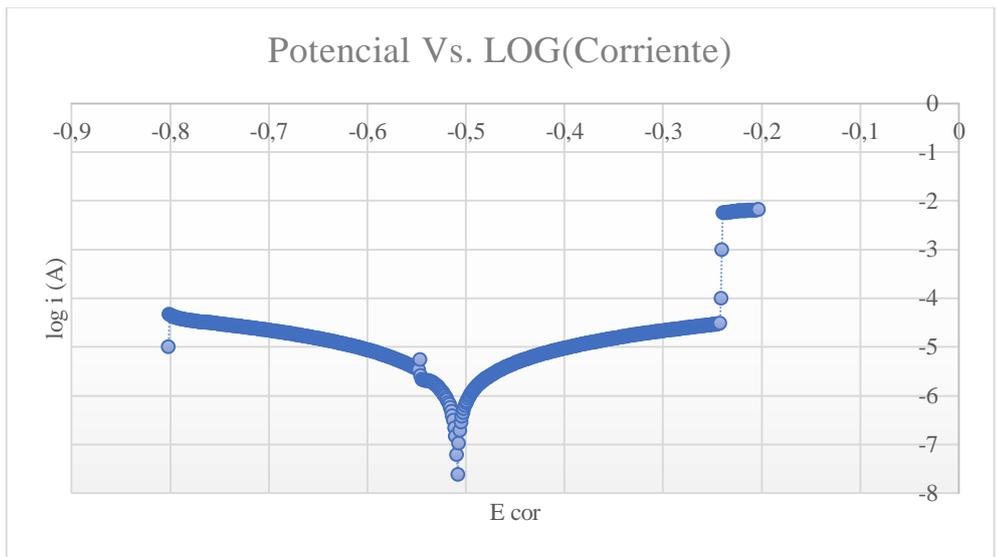


Gráfico 2-3: Curva de polarización de la probeta normalizado acero API 5L X42.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

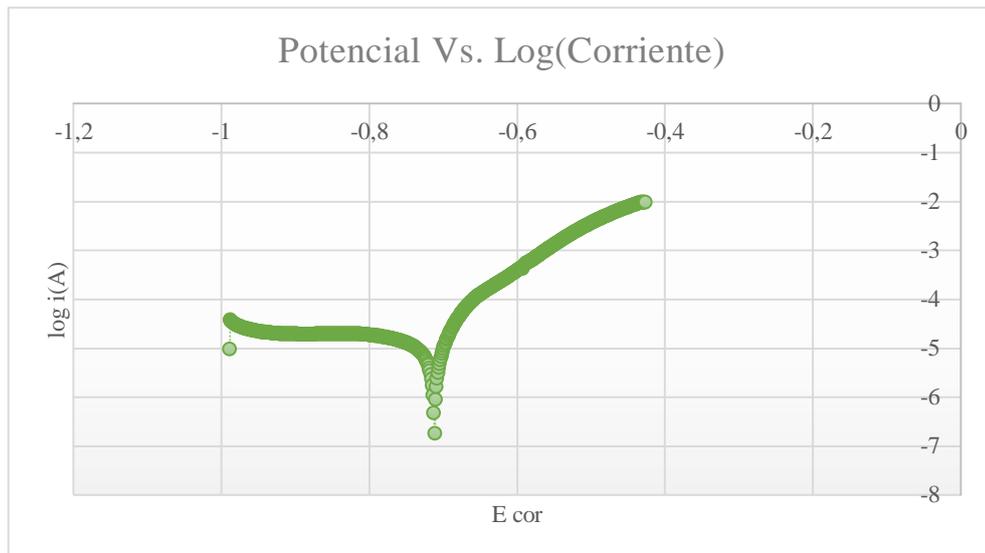


Gráfico 3-3: Curva de polarización de la probeta recocido acero API 5L X42.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

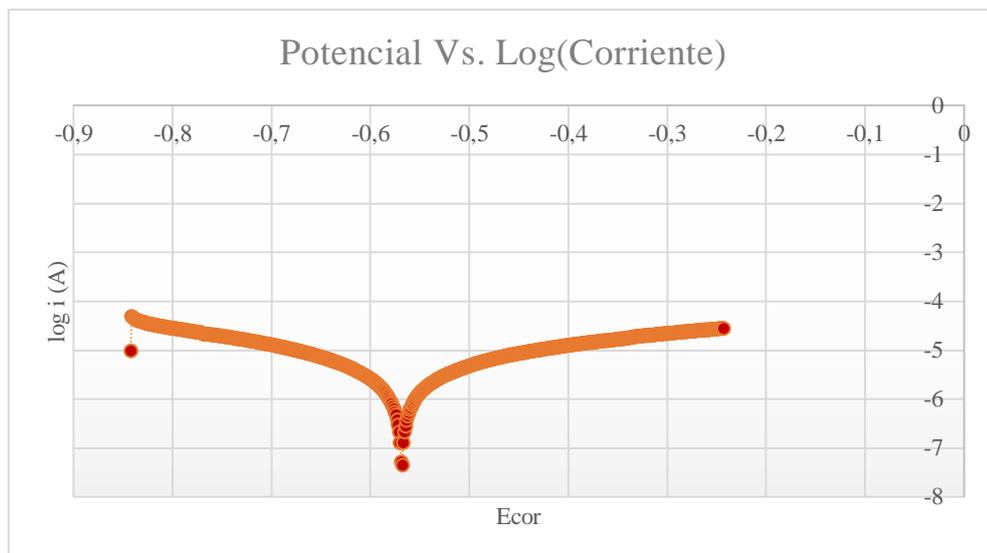


Gráfico 4-3: Curva de polarización de la probeta bonificado acero API 5L X42.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

El ensayo de las probetas de acero API 5L X42, se realiza de acuerdo a los parámetros experimentales, donde es esencial la saturación de CO₂ durante un tiempo de 1 hora, adicional se determina el OCP, en un lapso de 30 minutos, con el fin de verificar que los parámetros se encuentren dentro de los rangos establecidos, cada uno de los factores iniciales se realizó para todos los ensayos de corrosión.

En el Gráfico 1-3, se presenta el proceso de corrosión electroquímica para la probeta suministro, misma que describe un máximo de densidad de corriente en $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, de forma similar sucede, en el Gráfico 2-3, donde el valor de la densidad de corriente alcanza un pico de $-2.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, es decir, en comparación con cada uno de los ensayos realizados mientras mayor sea el potencial del electrodo, mayor será la densidad de corriente expresada, además se puede observar un cambio en el eje de la densidad de corriente, misma que de acuerdo a (Stansbury & Buchanan, 2000), establece que en el instante de obtener un cambio, en nuestra variable mencionada muestra un cambio de proceso, en el cual pasa de obtener carbonatos a existir penetración del material (pitting).

De acuerdo con la Gráfica 3-3, correspondiente al tratamiento térmico de recocido, luego de observar el pico de la curva se deduce un valor de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, valor que se relaciona al obtenido con la probeta de suministro, cabe resaltar la diferencia en su punto de inflexión donde se obtiene un valor de $-6.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, destacando que el proceso de corrosión electroquímica es diferente para cada tratamiento, además de observar su diferencia en la microestructura atacada.

Por lo contrario, en el Gráfico 4-3, luego de verificar los datos se obtiene un pico de $-4.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, y un pequeño cambio en el potencial analizado, claramente se puede apreciar que la curva de polarización anódica se inclina hacia valores entre -2 y $-4.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, es decir mientras más cercano se encuentre de -2 y dependiendo el tratamiento térmico, como nuestro caso en el tratamiento térmico de normalizado, el material se encuentra propenso a la formación de carbonatos hasta el punto de formar pitting en la sección, mismos datos se demuestran en el Gráfico 2-3.

En cada una de las curvas se analiza el cambio de potencial y densidad de corriente con la finalidad de encontrar el comportamiento del metal al momento de pasar de su estado activo a pasivo, es decir en cada una de las gráficas mostradas en el inciso 3.5.1., se observa las curvas de polarización anódica y catódica intersecando en E_{corr} (potencial de corrosión), de forma que se pueda observar un comportamiento claro de Tafel en la curva anódica (pendiente). Permitiendo destacar que, la tasa más alta de corrosión se obtiene a una densidad de corriente máxima. (Ahmad, 2006)

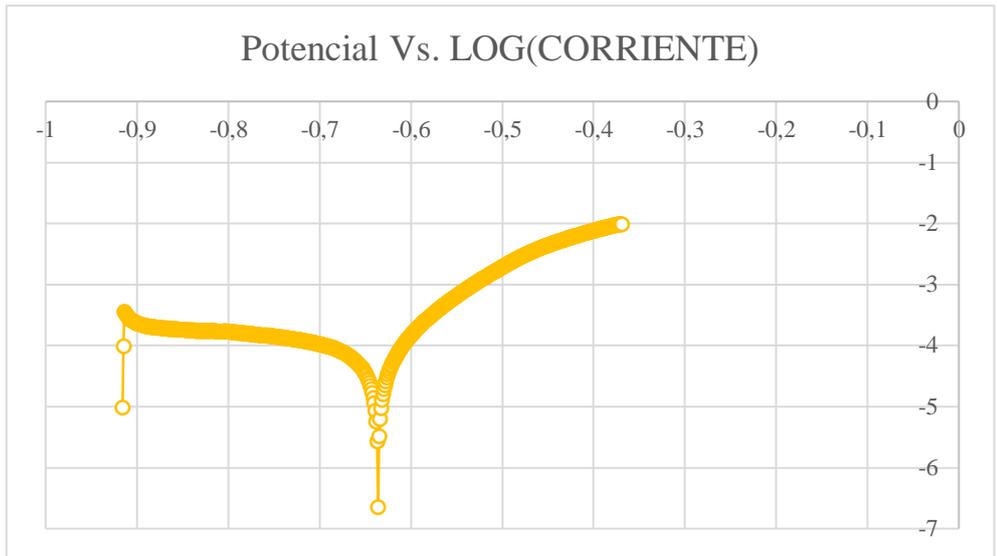


Gráfico 5-3: Curva de polarización de la probeta suministro acero API 5L Grado B.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

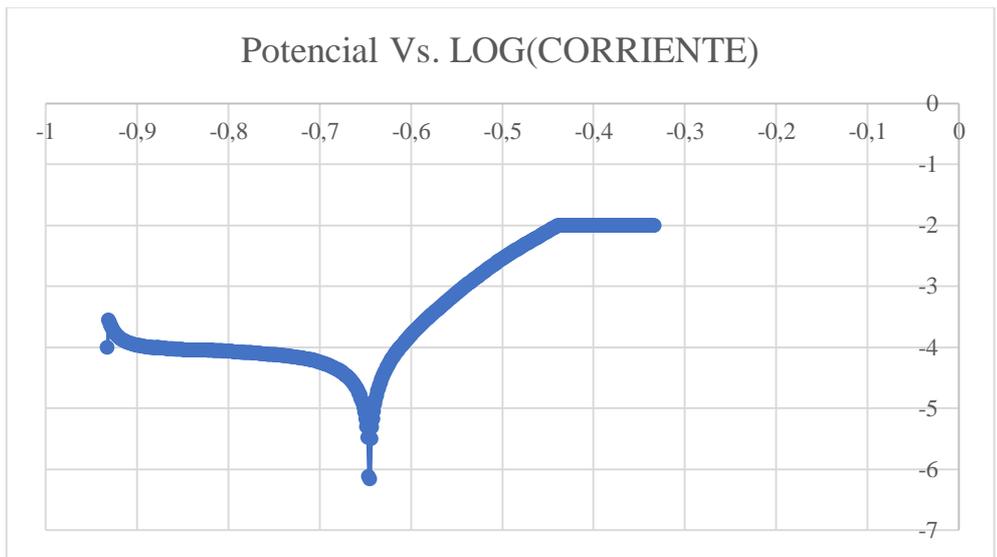


Gráfico 6-3: Curva de polarización de la probeta normalizado acero API 5L Grado B.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

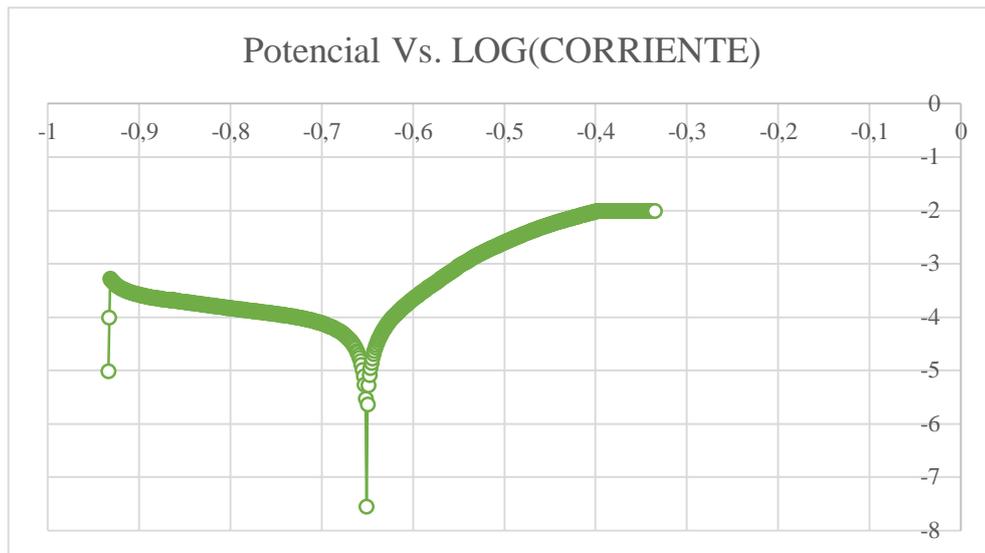


Gráfico 7-3: Curva de polarización de la probeta recocido acero API 5L Grado B.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

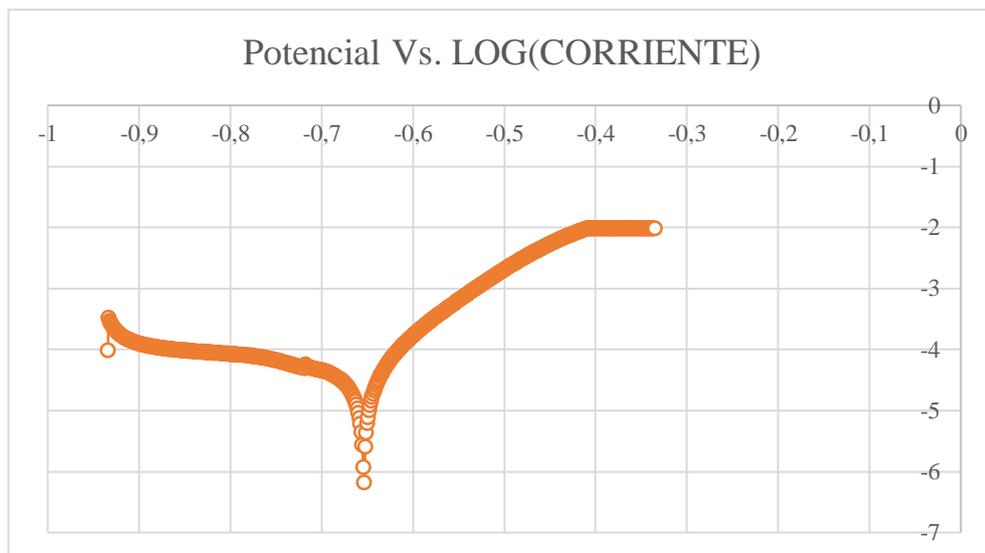


Gráfico 8-3: Curva de polarización de la probeta bonificado acero API 5L Grado B.

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Para el ensayo de las probetas de acero API 5L Grado B, se considera los parámetros establecidos en el inciso 2.8.6., en cada una de las probetas de los tratamientos de normalizado, recocido, bonificado y en estado de suministro.

En el Gráfico 5-3, se evalúa el proceso de corrosión electroquímica para la probeta suministro del acero API 5L Grado B, obteniendo la curva de análisis de la tasa de corrosión, donde se alcanza un máximo de densidad de corriente de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, de igual forma luego de analizar los datos del

Gráfico 6-3, perteneciente a la probeta normalizado, presenta valores máximos de densidad de corriente de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Mientras que para la curva del proceso de corrosión electroquímica del Gráfico 7-3, correspondiente al tratamiento de recocido, resulta valores máximos de densidad de corriente de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, así también para el Gráfico 8-3 del análisis de corrosión del tratamiento de bonificado, se logra diferenciar valores de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Por lo tanto, luego de analizar cada una de las curvas de polarización pertenecientes al proceso de corrosión electroquímica, se determina que el cambio de potencial varía entre -0.7 V y -0.6 V en cada una de las curvas, diferenciándose en i_{corr} , donde depende en gran magnitud del tratamiento térmico al que se encuentra expuesto, demostrando que la tasa de corrosión más alta se encuentra en el tratamiento de normalizado al poseer una densidad de corriente alta.

3.6.2 *Evaluación de la tasa de corrosión.*

Las mediciones de velocidad de corrosión electroquímica a menudo proporcionan resultados en términos de corriente eléctrica (tasa de penetración del material), basados de forma general en la ley de Faraday considerando la valencia del material, es por ello, que mediante la norma ASTM G102-4, se estima la conversión para evaluar la velocidad de corrosión del material analizado.

Para evaluar la velocidad de corrosión en cada una de las probetas analizadas se necesita comparar las curvas, en base a la región de Tafel, conforme a 1 decano de densidad de corriente y 100 mV, los datos mencionados son necesarios para evaluar la tasa de corrosión en referencia a la Ley de Faraday.

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \quad (14)$$

Dónde: i_{corr} , es la densidad de corriente de corrosión, ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), I_{corr} , es la corriente total anódica (μA) y A , es el área expuesta de la muestra, (cm^2), es decir en el ensayo el área del electrodo en análisis es de 1 cm^2 (ASTM, 1994).

$$E_W = \frac{W}{n} \quad (15)$$

$$E_W = \frac{55,845}{2}$$

$$E_W = 27,92 \text{ (Peso equivalente)}$$

Dónde: E_w , es el peso equivalente (depende del sistema que analice), W , es el peso atómico del elemento, n , trata del número de electrones necesarios para oxidar un átomo del elemento en el proceso de corrosión (ASTM, 1994)

$$CR_{corr} = \frac{i_{corr} \times E_w}{d \times F} \quad (16)$$

Dónde: CR_{corr} , representa la tasa de corrosión expresada en milipulgadas por año; E_w , trata el peso equivalente; i_{corr} , representa la densidad de corriente de corrosión expresada en ($\mu A/cm^2$), densidad (d), para nuestro caso el hierro, además, de la constante de Faraday (F).

Además de la ecuación (16), es necesario conocer el intercambio de electrones durante la evolución del proceso de oxidación, tomando al hierro (Fe) como elemento principal, detallando el intercambio de $2 e^{-2}$ y la de densidad de $7,87 \text{ g/cm}^3$, además de ser necesario la constante de Faraday expresada en 96485 C/eq (Ahmad, 2006, pág. 58).

La ecuación (16), se resume a la siguiente ecuación:

$$CR_{corr} = \frac{i_{corr} \times E_w}{d \times F} \quad (17)$$

Cada uno de los cálculos de las tasas de corrosión se encuentran en relación con la ecuación (17).

Tabla 17-3: Tasas de corrosión para tratamiento de suministro del acero API 5L X42.

SUMINISTRO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.68454	0.00010779	107.79	49.32974424
-0.67878	0.00011896	118.96	54.44165855

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 18-3: Tasas de corrosión para tratamiento de normalizado del acero API 5L X42.

NORMALIZADO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.50842	0.000002084	2.084	0.953735848
-0.54541	0.000003692	3.6924	1.689814896

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 19-3: Tasas de corrosión para tratamiento de recocido del acero API 5L X42.

RECOCIDO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.71166	0.000015292	15.292	6.998334252
-0.70874	0.000025402	25.402	11.62514299

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 20-3: Tasas de corrosión para tratamiento de bonificado del acero API 5L X42.

BONIFICADO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.56843	0.000005437	5.437	2.488225433
-0.5224	0.000006121	6.121	2.801255817

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 21-3: Tasas de corrosión para tratamiento de suministro del acero API 5L Grado B.

SUMINISTRO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.63607	0.00017902	179.02	81.92792295
-0.64849	0.00012722	127.22	58.22182079

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 22-3: Tasas de corrosión para tratamiento de normalizado del acero API 5L Grado B.

NORMALIZADO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.64323	0.00022227	203.1	92.94805693
-0.6455	0.00010705	107.05	48.99108564

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 23-3: Tasas de corrosión para tratamiento de recocido del acero API 5L Grado B.

RECOCIDO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.62059	0.00012287	122.87	56.23105738
-0.65093	0.00013384	133.84	61.25144234

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Tabla 24-3: Tasas de corrosión para tratamiento de bonificado del acero API 5L Grado B.

BONIFICADO			
Ecorr, Obs (V)	I corr (A/cm ²)	I corr (μA/cm ²)	mpy
-0.65392	0.000075313	75.313	34.46675042
-0.65101	0.000068817	68.817	31.49387707

Realizado por: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

Al analizar los datos obtenidos luego de los ensayos de corrosión, y verificar cada uno de ellos haciendo uso de la solución con un pH cercano de 7 ± 0.2 , se aprecia la relación directa entre ruido de corriente de corrosión y mpy (milipulgadas por año), además se valora la variación en la medición de voltaje de corrosión, aunque es mínima permite diferenciar el comportamiento cuasi lineal, es decir no se encuentra bajo la región de control de difusión e incluso no cambia el potencial presentado (Stansbury & Buchanan, 2000, pág. 250), misma que admite la toma de datos en el Software Nova 2.1.

En todos los ensayos el comportamiento electroquímico es variable, al igual que los potenciales y corrientes, básicamente comparado con el sustituto de agua de mar a 0,1 M saturada con CO₂, y se alcanza valores de potencial negativos, es decir el sistema tiene tendencia a estar activo (Montes, y otros, 2016).

Para que exista la manifestación de carbonatos se toma en cuenta parámetros de referencia, como no sobrepasar la región de Pitting (picaduras), ya que, por lo general estas picaduras ocurren cuando el potencial de corrosión o el potencial impuesto está por encima de un valor crítico, mismo valor depende del entorno de la aleación.

Las características de un ensayo como potencial, material de análisis y el ambiente, no representan un mecanismo de predicción, es posible predecir el proceso de corrosión, a partir de fallas o fisuras presentes en el metal (Stansbury & Buchanan, 2000, pág. 282).

La presencia de carbonatos se muestra en ambientes corrosivos, mismas que son adaptadas a la experimentación, en muchos de los casos se da por observación visual como (Benamor, Talkhan, Nasser, Hussein, & Okonkwo, 2018), donde los elementos de análisis se encuentran en puntos oscuros y en el menor de los casos se da como capas previo a la pasivación del material.

3.6.3 Evaluación de los productos de corrosión.

La evaluación de los productos de corrosión se realiza en cada una de las muestras de suministro y tratamientos térmicos mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), de la Facultad de Mecánica.

Cada una de las muestras son sometidas a un microanálisis químico denominado EDS (Espectrometría por dispersión de energía de rayos X).

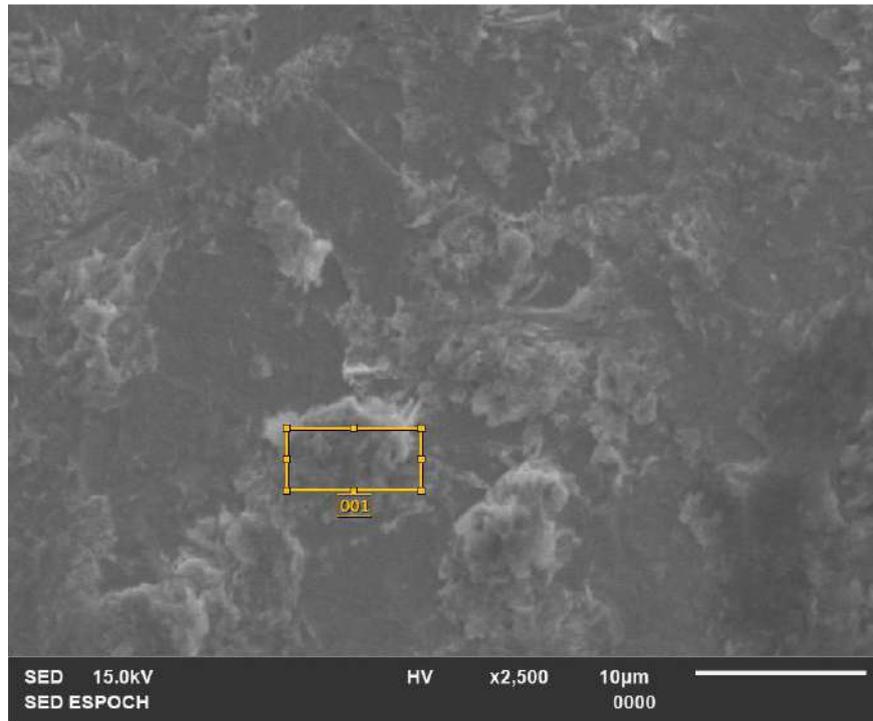


Figura 1-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta suministro API 5L X42.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

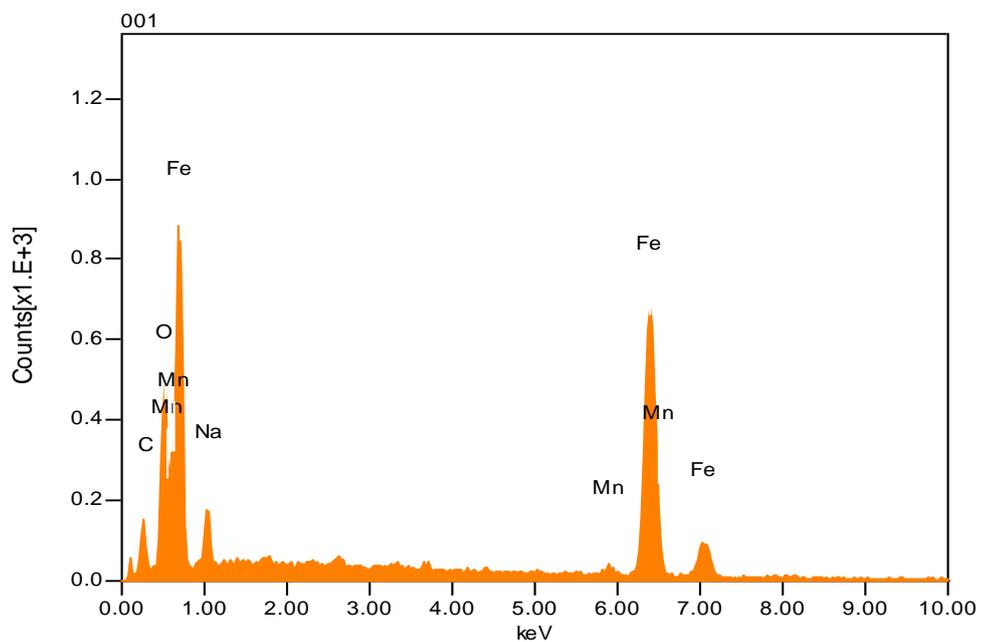


Gráfico 9-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta suministro API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

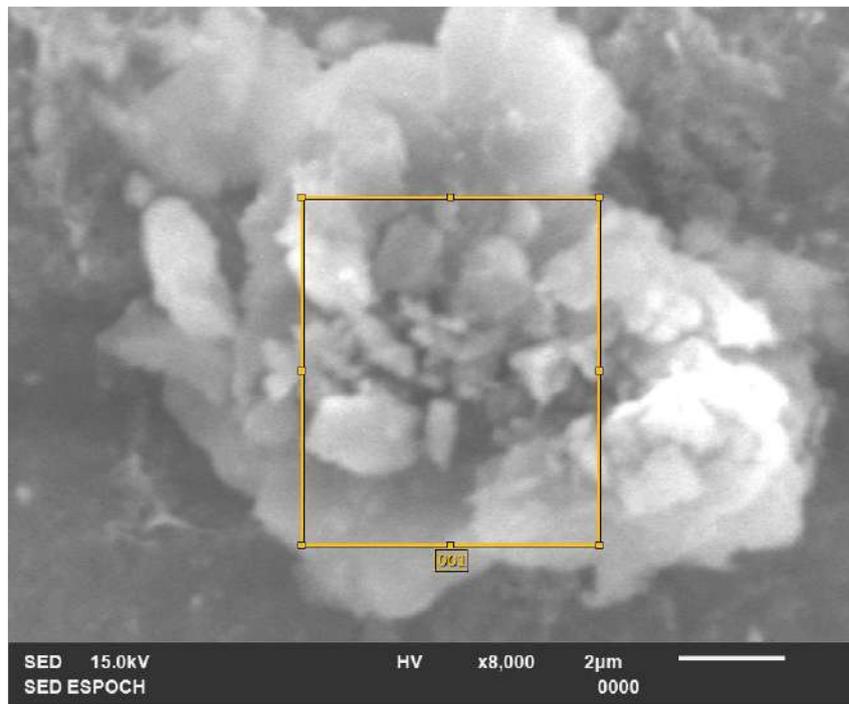


Figura 2-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta normalizado API 5L X42.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

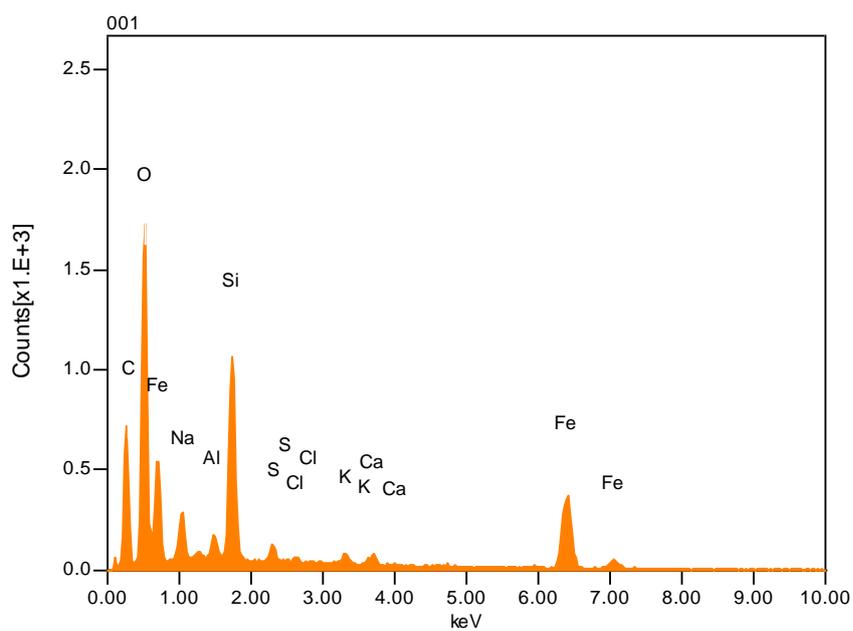


Gráfico 10-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta normalizado API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

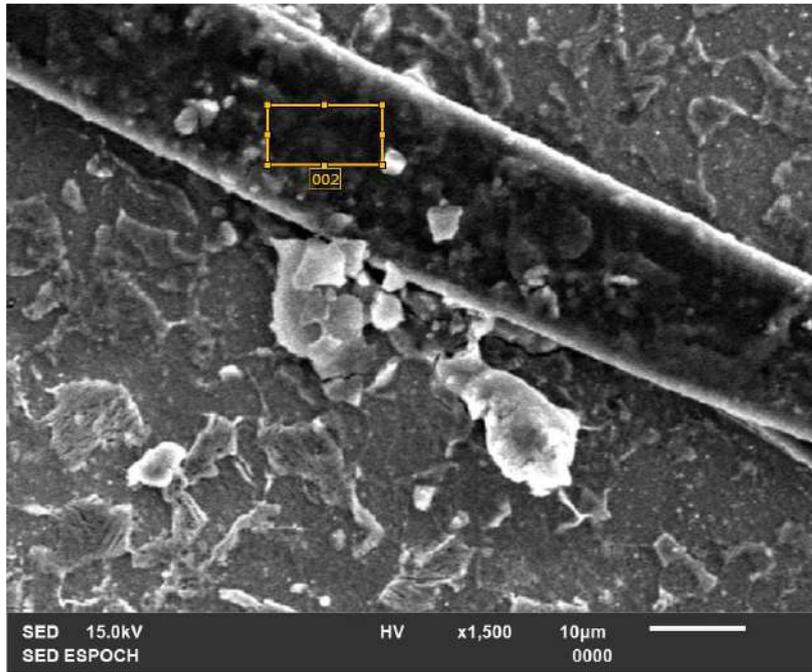


Figura 3-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta recocido API 5L X42.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

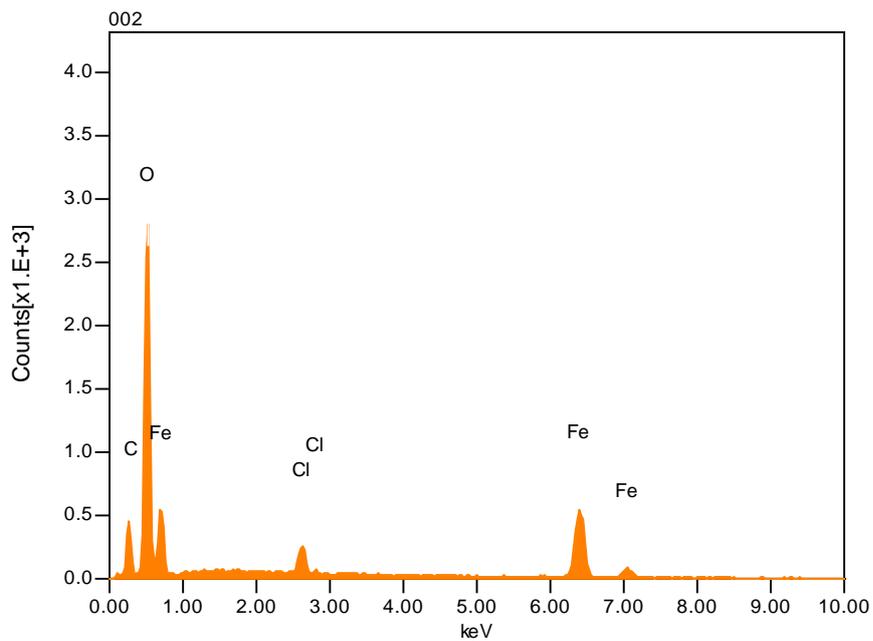


Gráfico 11-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta recocido API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

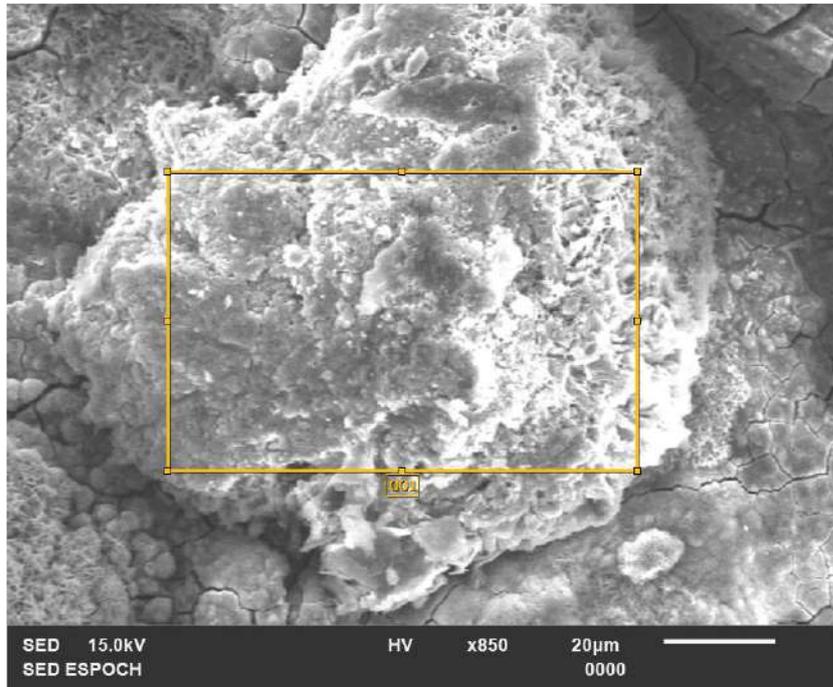


Figura 4-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta bonificado API 5L X42.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

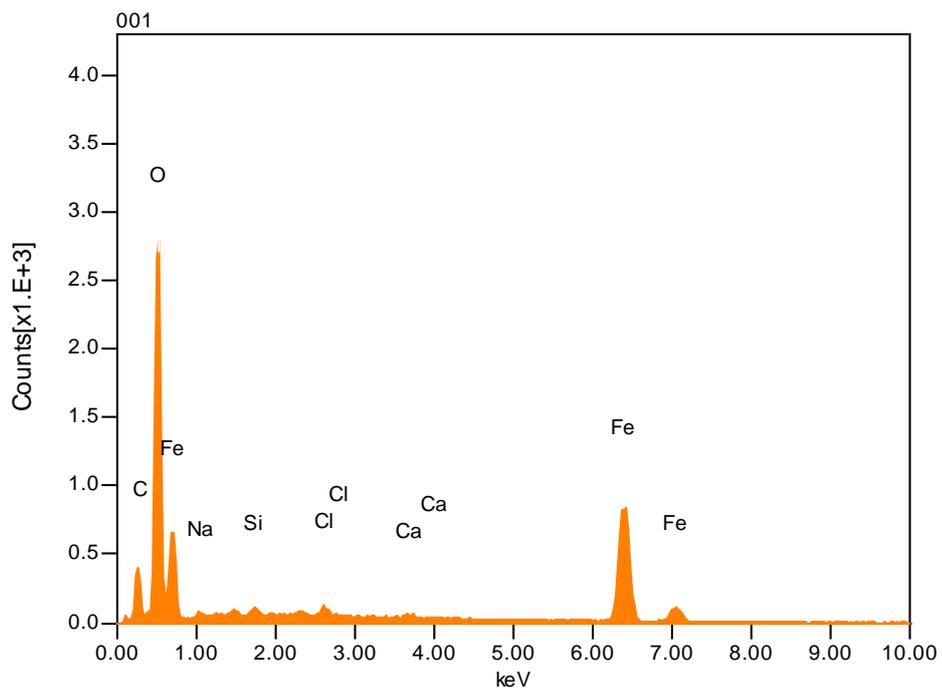


Gráfico 12-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta bonificado API 5L X42, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

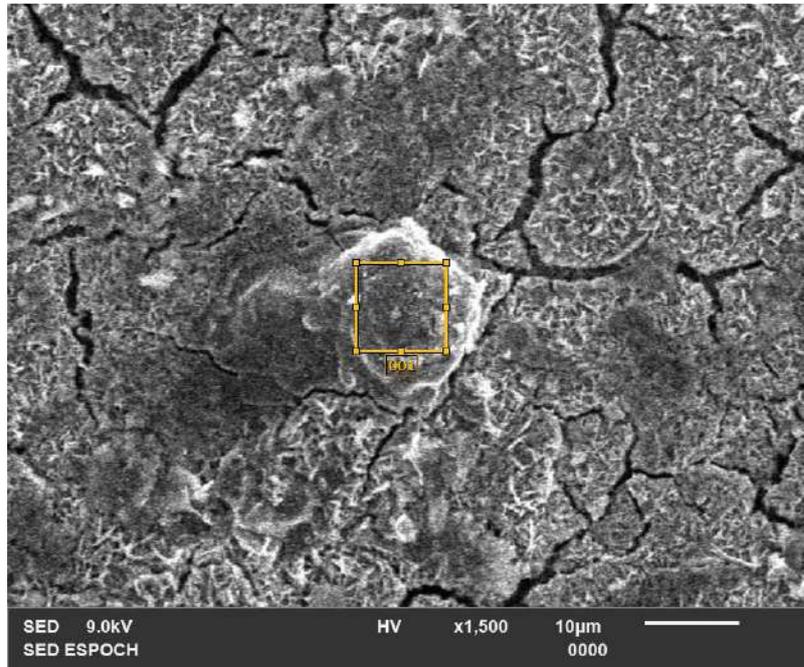


Figura 5-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta suministro API 5L Grado B.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

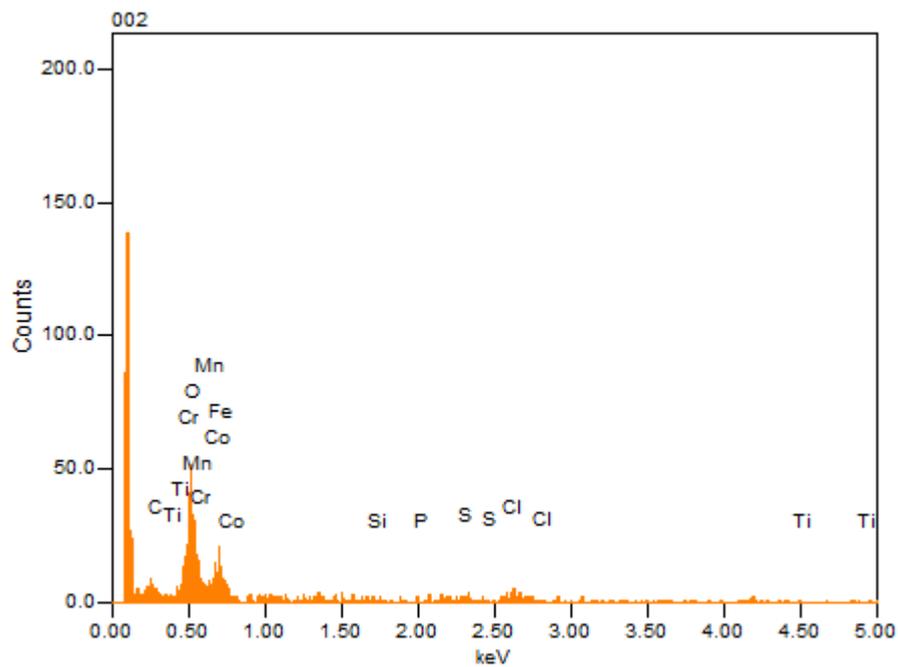


Gráfico 13-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta suministro API 5L XB, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

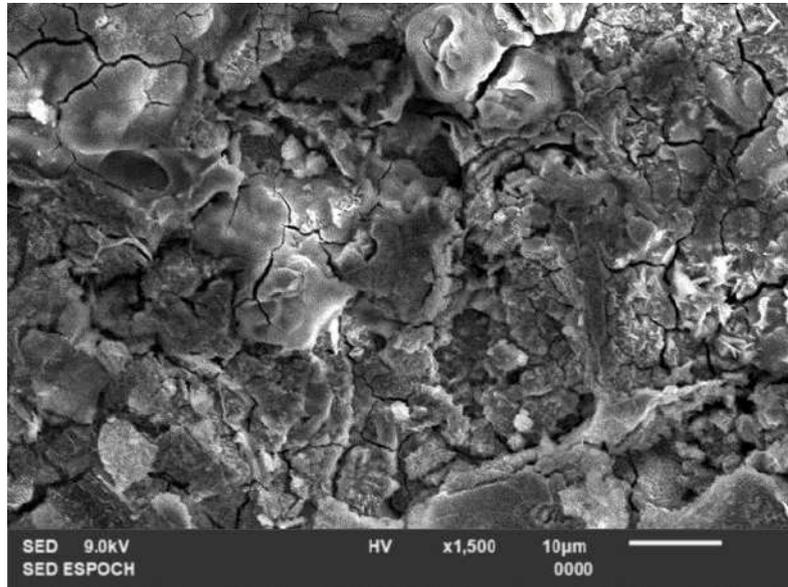


Figura 6-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta normalizado API 5L Grado B.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

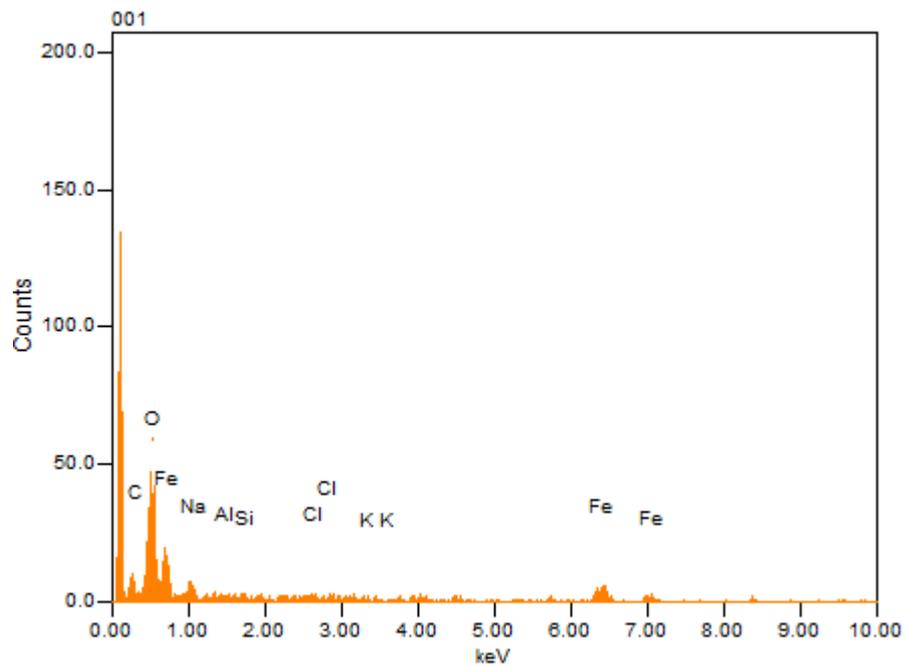


Gráfico 14-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta normalizado API 5L XB, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

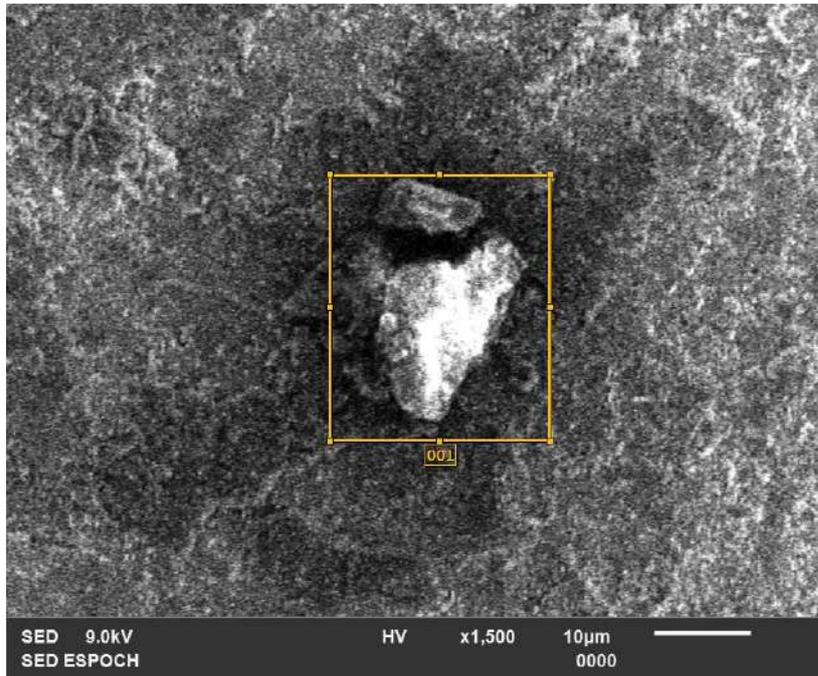


Figura 7-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta recocido API 5L Grado B.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

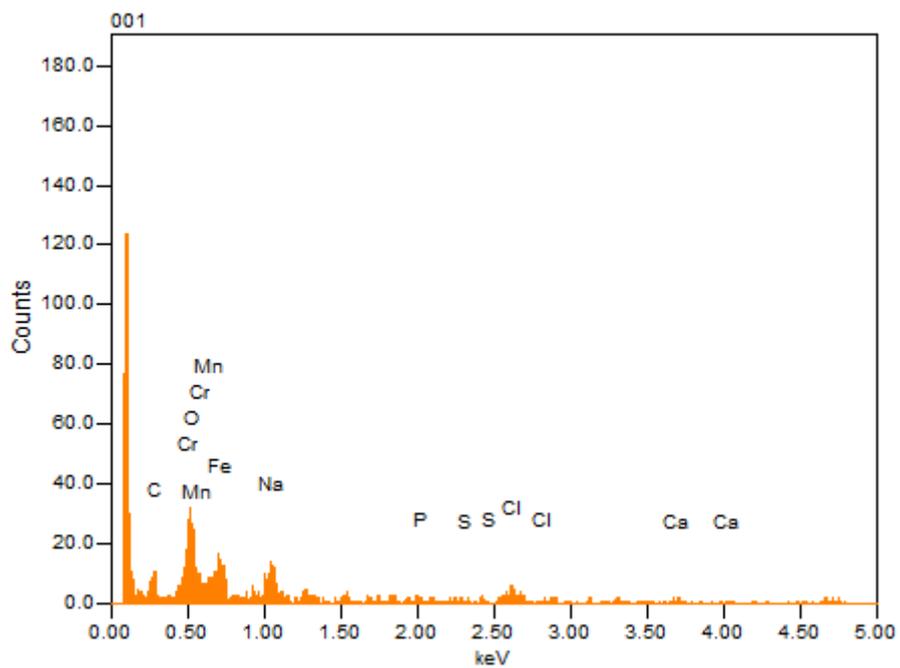


Gráfico 15-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta recocido API 5L XB, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

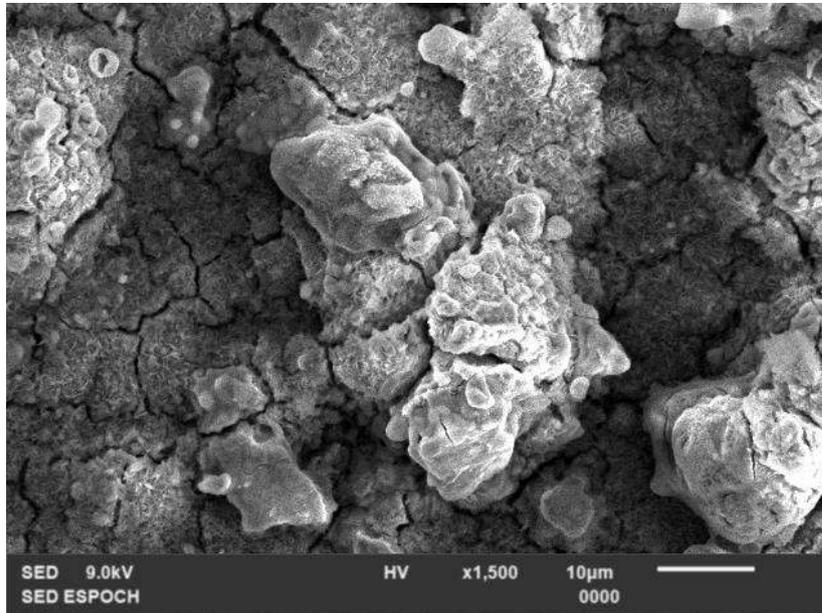


Figura 8-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en la probeta bonificado API 5L Grado B.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

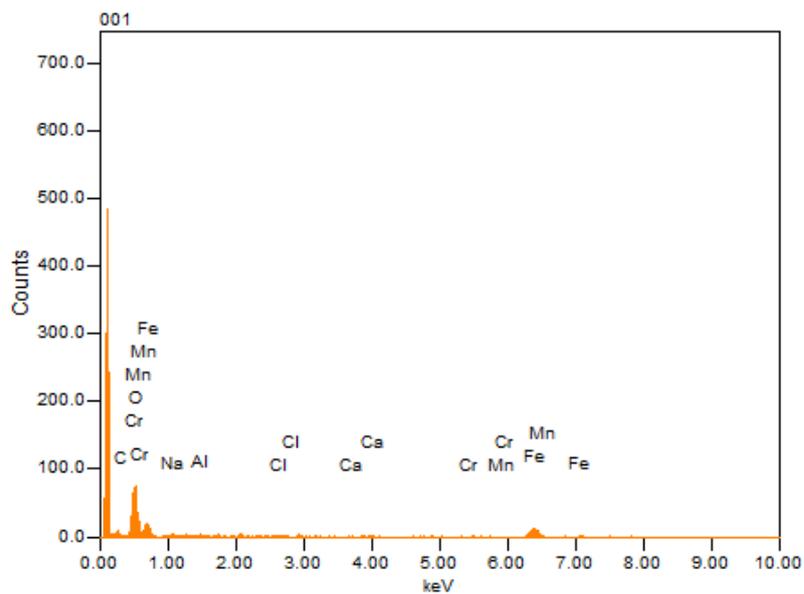


Gráfico 16-3: Resultado de la espectrometría de rayos X, evidenciando los productos de corrosión para la probeta bonificado API 5L XB, formado por un sustituto de agua de mar a 0,1 M con un pH de $7\pm 0,2$.

De acuerdo con la espectrometría realizada de cada probeta para el acero API 5L X42, mediante el proceso de corrosión acelerada, se observa la presencia del ion cloruro, asimismo, iones propios del acero como hierro y carbono.

El análisis de los productos de corrosión se realizó conforme a la observación de la morfología SEM, de la probeta suministrada, misma que de forma visual se puede detallar que las secciones más oscuras representan mayor concentración de carbonatos (FeCO_3), (Benamor, Talkhan, Nasser, Hussein, & Okonkwo, 2018), además de lo ya mencionado puede presentarse agregados como carbonatos de calcio (CaCO_3), en sí depende mucho de los elementos aleantes que lo conforman.

En los datos de obtención de la espectrometría de rayos X, se evidencia la presencia de iones desarrollados en la corrosión electroquímica, entre ellos se puede constatar sodio (Na) y oxígeno (O) al igual que elementos de interés como hierro (Fe) y carbono (C), revelando el comportamiento de activación del proceso de corrosión.

Por otro lado en el desarrollo del proceso de corrosión de la probeta normalizada, los datos de obtención de la espectrometría de rayos X, permite evidenciar la presencia de carbonatos además de otros productos, entre ellos se constata la existencia de elementos como cloro (Cl) y sodio (Na), mismos que tienden a la formación de cloruros de sodio (NaCl), igualmente de elementos aleantes como silicio (Si) y elementos como Aluminio (Al), que se presentan desde las micrografías capturadas antes del proceso siendo parte de inclusiones del material.

En este tipo de acero API 5L X42, es preciso enunciar el detalle sobre las fases encontradas en el material, sobre todo, las fases que posibilitan el proceso de corrosión, es por ello que se destaca que la fase ferrita, se disuelve antes que la fase cementita, facilitando el depósito de una capa fina de productos de corrosión sobre la superficie de las probetas ensayadas, además de ello, permite encontrar una mezcla de carbonato de hierro y cementita no disuelta en el área de análisis (Ochoa, Vega, Pébere, Lacaze, & Brito, 2015).

El mecanismo de deposición del carbonato de hierro está íntimamente relacionado con la morfología de la cementita no disuelta, permitiendo obtener capas protectoras que ayuden a disminuir la tasa de corrosión. (Ochoa, Vega, Pébere, Lacaze, & Brito, 2015)

Posterior al análisis EDS de las probetas del acero API 5L Grado B, se verifica la existencia de láminas de cementita, las mismas que favorecen la formación de capas de siderita o carbonato de hierro, ya que actúan como cátodo, dando resultado la mayor disolución del hierro.

Luego de analizar las gráficas pertenecientes al acero API Grado B, se observa áreas de cementita que aumentan mientras mejor sea la disolución de la ferrita, y por ende, existe mayor producción de carbonatos de hierro, en la Figura 8-3, se puede observar una fina capa de cementita de color blanquecino producto del ensayo corrosivo en el tratamiento de bonificado.

Algunos autores, (Dugstad, Hemmer, & Seiersten, 2001) & (Al-Hassan, Mishra, Olson, & Salama, 1998) consideran que el parámetro microestructural no sólo tiende a cambiar las características y la cinética de la formación de productos de corrosión, sino que también influye en gran magnitud en la acción de los inhibidores de corrosión, al igual que la aparición del carburo de hierro (FeC) provoca una especie de efecto anclaje previo a la formación de capas protectoras de la corrosión (Crolet, Thevenot, & Nesic, 1998).

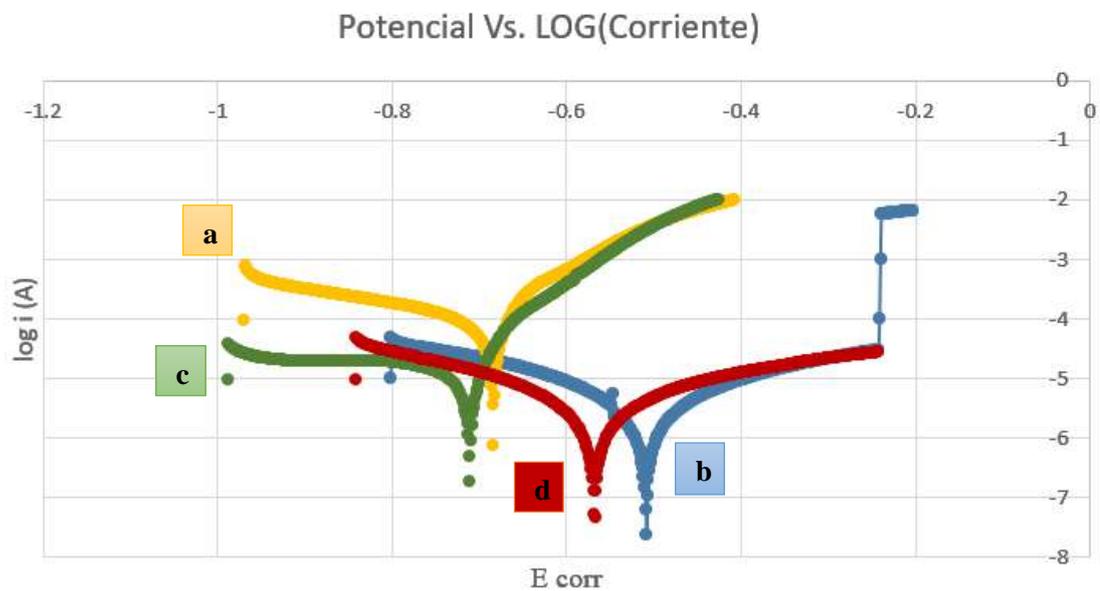


Gráfico 17-3: Curvas de polarización del acero API 5L X42 a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

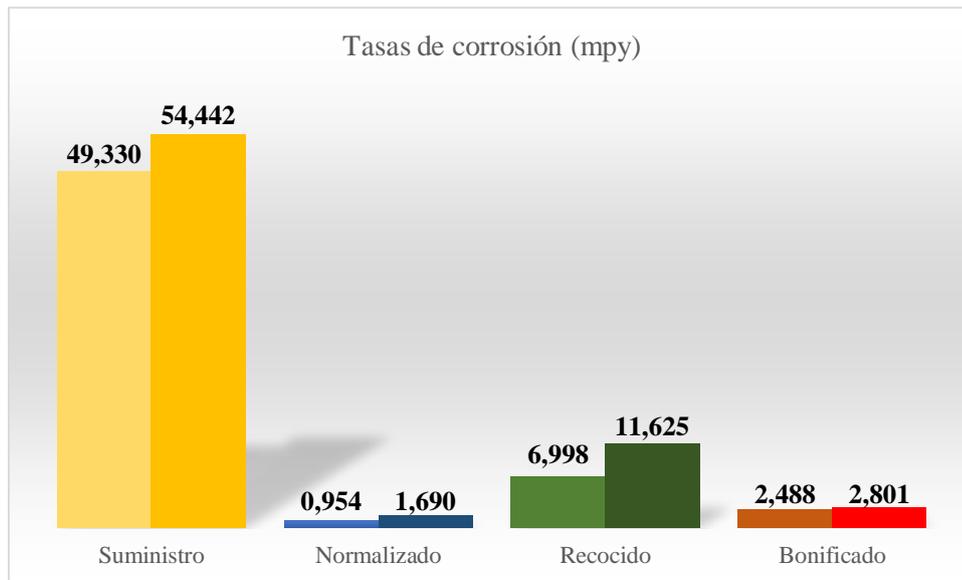


Gráfico 18-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en el acero API 5L X42.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

Luego de evaluar los gráficos 17-3 y 18-3, el análisis de la tasa de corrosión en cada uno de los ensayos, se determina la menor cantidad de mpy en la probeta de normalizado, además del análisis EDS, presenta el mayor contenido de iones carbono, además del hierro. De acuerdo a (Farelas, Galicia, Brown, Nesic, & Castaneda, 2010), los microconstituyentes como la ferrita actúan como ánodo, mientras que la cementita actúa como cátodo.

En cada uno de los ensayos de corrosión acelerada, se entiende que las reacciones químicas son a veces muy rápidas a comparación de otros métodos de análisis, siempre que se mantenga el equilibrio químico en toda la solución, se considera por parte de (Nordsveen, Nesic, Nyborg, & Stangeland, 2003) que, las concentraciones de los iones de Fe^{2+} y CO_3^{2-} , en el instante de sobrepasar el límite de solubilidad, los iones considerados se combinan para formar películas sólidas de carbonato de hierro ($FeCO_3$) acorde a:



De acuerdo con la electroquímica analizada, además de los iones generados, existe la presencia de un flujo limitante de H^+ (ion hidrógeno), mismo que se debe a la presencia de H_2CO_3 , además de provocar el aumento en la velocidad de corrosión.

Las reacciones que anteceden a la presencia de una fina capa protectora inicia en la formación de ácido carbónico, como se indica en la ecuación (19).



El proceso de corrosión se presenta de acuerdo a las siguientes reacciones catódicas (Sevillano, 2016, pág. 12):



La reacción anódica se encuentra dada por la ecuación (23), una vez que se encuentra el hidrógeno libre y se presente el proceso de oxidación del hierro (Sevillano, 2016, pág. 12).



A partir de la siguiente reacción ya se presenta una delgada capa protectora (Sevillano, 2016, pág. 12):



De igual forma (Bokris, D., & Despic, 1961), muestra que el paso de la determinación de la velocidad de corrosión depende del pH, para el análisis de cada uno de los ensayos realizados se utiliza un pH de $7 \pm 0,3$, el mismo procedimiento es el encargado de la formación del precipitado carbonato de hierro (FeCO_3).

De acuerdo con (Yin, Feng, Zhao, Bai, & Lin, 2009), la hidratación de CO_2 , provoca una reacción química lenta, misma en la que se puede dar la disociación de una pequeña fracción de ácido

carbónico, en dos pasos, entre ellas se define la formación de iones de hidrógeno, bicarbonatos y carbonatos, el primer paso se da, mediante la reacción anódica, que es la disolución del hierro, mientras que la reacción catódica incluye la reducción de iones hidrógeno además de carbonatos, y en pocas o escasas ocasiones iones de bicarbonatos, es por ello que, se presenta la formación de carbonatos en el proceso de análisis de la morfología SEM.

Así también (Burkle, 2017, pág. 24), menciona que el FeCO_3 (carbonato de hierro), es estructuralmente similar y se considera la contraparte de la escala de CaCO_3 (calcita), misma que se denota de las gráficas de espectrometría de rayos X, iones de calcio (Ca), siendo ambos solubles en el agua de mar, en sí, el carbonato de hierro dentro de un análisis estructural cristalino ocupa una posición octaédrica, es decir, el átomo de hierro reemplaza al átomo de calcio, de forma que el carbonato de calcio suplanta la calcita, esto se cumple para aceros al carbono en entornos de CO_2 .

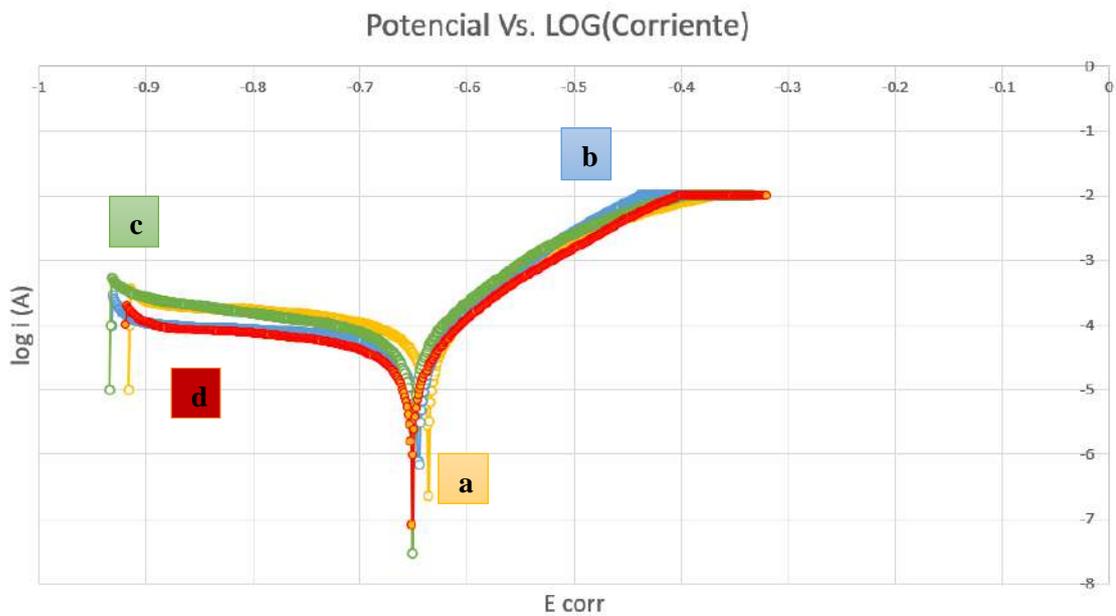


Gráfico 19-3: Curvas de polarización del acero API 5L Grado B a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson, 2020

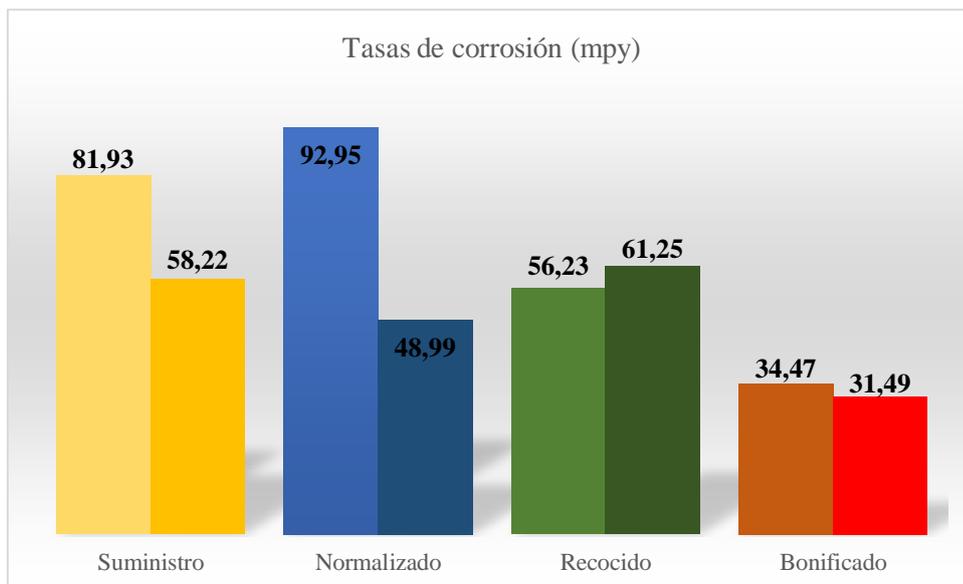


Gráfico 20-3: Análisis EDS para la evaluación de productos de corrosión formados en el acero API 5L Grado B.

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

Considerando el Gráfico 19-3 y el Gráfico 20-3, se determina la tasa de corrosión para cada uno de los tratamientos térmicos analizados del acero API 5L Grado B, datos que cuantifican el proceso en mpy (milipulgadas por año), obteniendo mayor cantidad en las probetas de normalizado (92,95; 48,99) y menor cantidad en las probetas de bonificado (34,47; 31,49).

A partir de la saturación con CO₂, y más aún la saturación de una sal, al momento de reposar sobre la superficie del material, tiende a favorecer la presencia de delgadas capas protectoras como la siderita o capas compuestas por FeCO₃ (Nešić, 2007), misma que se puede observar en la Figura 8-3.

En el Grafico 19-3 correspondiente a curvas de polarización, se observa que la tendencia de la curva de bonificado es menor en relación con las demás, por lo que se predice un menor rango de corrosión para aceros tratados térmicamente mediante el proceso de bonificado.

CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

La forma sintética del agua de mar, es un electrolito que posee mayor semejanza al agua de pozos de perforación y de tubería de transporte. Las concentraciones de sales y aniones OH, caracterizan al electrolito de trabajo como ideal para compararlo con las condiciones in situ de las tuberías analizadas. Los parámetros de pH, temperatura, concentración y saturación de CO₂ se deben controlar por cada experimentación, a fin de que la adquisición de datos sea óptima y presente resultados fiables.

Cada tratamiento térmico presenta una ventaja en las propiedades mecánicas. Al aplicar un tratamiento térmico se modifica su microestructura, por lo tanto, las condiciones y la metodología del tratamiento térmico deben ser controladas. Una metodología no controlada, puede causar cambios desfavorables en el comportamiento mecánico del acero, causando fallas al ser puesto en funcionamiento. En general todo acero debe presentar un tratamiento térmico de bonificado para salir a la comercialización. La microestructura que presentan los tratamientos térmicos de recocido y normalización son ferrita y perlita en diferentes concentraciones, la misma microestructura se observa en la muestra de suministro. El único cambio microestructural considerable es el que se produce en el bonificado del acero API 5L X42 obteniendo una microestructura martensítica en forma de aguja, ésta presenta las mejores propiedades en resistencia a indentación (158 HB) y energía de impacto absorbida (107.7 J).

Respecto al acero API 5L Grado B, donde se obtiene propiedades de resistencia a indentación (163.3 HB) y energía de impacto absorbida (71.1 J) dando como resultado mejores características en su estado inicial.

La velocidad de corrosión disminuye considerablemente al aplicar un tratamiento térmico a las muestras en estado de suministro, debido a que la austenita se transforma en su mayoría en ferrita y perlita, la difusión de los átomos de carbono forma microestructuras con tamaños de grano más refinado y compacto, a excepción del recocido que presenta un tamaño de grano relativamente mayor. Los resultados de la corrosión muestran una mejora considerable en el tratamiento térmico de normalizado con un 2.54% en relación a la tasa corrosiva promedio del tratamiento suministro y 49.99% corrosivo en relación al tratamiento de bonificado, de forma similar sucede en el acero API 5L Grado B, donde el tratamiento con mejores características es el bonificado, con el 46.47% de la tasa de corrosión promedio en relación al tratamiento de normalizado. Esto se debe a una mayor concentración de cementita no disuelta en ferrita y perlita, que permite la formación de una pequeña película protectora de carbonatos de hierro. Este resultado muestra que no existe relación entre la dureza y tasa de corrosión, por lo tanto, no siempre la microestructura con mayor dureza será necesariamente la más resistente a corrosión.

En conclusión, las tuberías API 5L X42 usadas para la extracción y transporte de crudo, deben contar con un tratamiento térmico de normalizado mientras que para los aceros API 5L Grado B, se debe usar aceros tratados mediante bonificado, antes de colocarlas en funcionamiento, evitando daños y prolongando la vida útil de las tuberías, además de prevenir gastos que son producto de fallas o desgaste debido a la corrosión. La presencia de carbonatos evita el proceso corrosivo, sin embargo, la capa precipitada es muy delgada y débil, por lo que no impide completamente la difusión de los electrones, y la formación de cloruro férrico es inevitable, junto con ello la corrosión localizada (pitting).

Además, durante los ensayos electroquímicos se detectó que se debe contar con una buena disolución, ya que en los primeros análisis EDS se halló mayor cantidad de iones Cl, debido al tiempo agitación y reposo de la sustancia, por lo que decidió realizar la preparación del electrolito con 24 horas de anticipación al ensayo, adicional a ello, se detectó la formación de precipitados de carbonato de calcio, mismos que son producto de una máxima solubilidad al dióxido de carbono en un pH de 6.

RECOMENDACIONES

En cada uno de los ensayos realizados es necesario utilizar un regulador de voltaje, ya que su variación produce cambios en el análisis del OCP (*Open Circuit Potencial*) en las curvas de polarización.

Detectar las inclusiones presentes en las probetas tratadas térmicamente, previo al ensayo de corrosión electroquímica, ya que las capas protectoras como carbonatos (FeCO_3), pueden verse afectadas directamente en la propagación de productos de corrosión o inicio de grietas que favorezca el fallo del material, datos que se recomienda analizar mediante EDS.

El tiempo de homogenización de la solución de agua de mar sintética, es clave para obtener una mejor disolución de las sales presentes en el electrolito.

Para futuras investigaciones se puede utilizar un electrolito diferente, considerando una solución base, con ello obtener mayor cantidad de precipitados y verificar la presencia de pitting mediante un análisis de difracción de rayos X (XRD), corroborando los resultados a través del cálculo de la tasa de saturación de los productos asociados a los carbonatos afectados por inhibidores de corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

- Abd, A. A., Naji, Z. S., & Hashim, A. S. (2019). Failure analysis of carbon dioxide corrosion through wet natural gas gathering pipelines. *Engineering Failure Analysis*(105), 638-646.
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering And Corrosion Control*. Boston: El Sevier.
- Al-Hassan, S., Mishra, B., Olson, D., & Salama, M. (1998). Effect of Microstructure on Corrosion of Steels in Aqueous Solutions Containing Carbon Dioxide. *Corrosion*, 54(6).
- Alva, F. (Mayo de 2014). Aleaciones Para Ingenieria 2. Lima. Recuperado el 2 de Febrero de 2020, de <https://es.slideshare.net/rc8/clase-10-aleaciones-para-ingeniera-2>
- American Petroleum Institue. (2004). *Specification for line pipe*. American Petroleum Institue, Standards department. Washington: API Publishing Services.
- API, I. A. (2001). *Manual de fluidos de perforacion*. Dalas: API.
- Askari, M., Aliofkhaezai, M., Ghaffari, S., & Hajizadeh, A. (2018). Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines - A technical review. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 58, 92-114.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingenieria de los materiales*. Mexico: Thomson, International editors.
- ASM International Committee. (1990). ASM Handbook properties and selection: irons, steels, and high performance alloys. *ASM Handbook Commite*, 1-2, 262-962.
- ASTM, A. S. (1994). *ASTM G102-4, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements* .
- Avner, S. H. (1977). *Introducción a la metalurgia física*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Bahadori, A. (2014). *Corrosion and Materials Selection*. Chichester: John Wiley.
- Benamor, A., Talkhan, G., Nasser, M., Hussein, I., & Okonkwo, P. (2018). Effect of temperature and fluid speed on the corrosion behavior of carbon steel pipeline in Qatari oilfield produced water. *Electroanalytical Chemistry*(808), 218-227.
- Bokris, J., D., D., & Despic, A. (1961). The electrode kinetics of the deposition and dissolution of iron. *Electrochim*, 4(4), 325-361.

- Brunner, E. W. (1980). Solubility of Sulfur in Hydrogen Sulfide and Sour Gases. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 20(5), 377-384. doi:10.2118/8778-PA
- Burkle, D. (Abril de 2017). *Understanding the Formation of Protective FeCO₃ on to Carbon Steel Pipelines during CO₂ Corrosion*. Recuperado el 2020, de <https://core.ac.uk/download/pdf/83935057.pdf>
- Callister, W. D. (2010). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Septima ed., Vol. 1). Mexico: Reverte, S.A.
- Cargua, C. (2019). *Optimización de la Resistencia a la Corrosión de un Bronce al Aluminio en un Ambiente Corrosivo Controlado*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13538/1/15T00723.pdf>
- Chang, R., & College, W. (2002). *Química* (Séptima ed.). D.F, México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Chevrot, B. K. (2012). *Recommended practice for corrosion management of pipelines in oil and gas production and transportation (EFC 64)*. London: Institute of Materials.
- Crolet, J., Thevenot, N., & Nescic, S. (1998). Role of Conductive Corrosion Products in the Protectiveness of Corrosion Layers. *Corrosion*, 54(3).
- D1141-98, A. (2013). Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water.
- Dugstad, A., Hemmer, H., & Seiersten, M. (2001). Effect of steel microstructure on corrosion rate and protective iron carbonate film formation. *Corrosion*, 57.
- ECIJG. (2011). *Metalografía, Curso de materiales*. Recuperado el 2020, de https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf
- Escudero, M. E. (2016). Introducción a las Técnicas de Análisis por Chispa-OES y XRF. *Seminario PARALAB-CENIN (CSIC)* (pág. 36). Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. .
- Farelas, F., Galicia, M., Brown, B., Nescic, S., & Castaneda, H. (2010). Evolution of dissolution processes at the interface of carbon steel corroding in a CO₂ environment studied by EIS. *Corrosion Science*, 52(2), 509-517.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering* (Tercera ed.). McGraw Hill Book Company.
- Genescá, J. (2002). *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión* (1 ed.). Mexico: UNAM.

- Handa, T., Lim, C., Takase, Y., Miyanaga, K., Tomoe, Y., & Tanji, Y. (2010). Microbial and Chemical Characterizations of Oil Field Water through Artificial Souring Experiment. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 43(9), 792-797.
- Hernandez, J., Muñoz, A., & Genesca, J. (2012). *Formation of iron-carbonate scale-layer and corrosion mechanism of API X70 pipeline steel in carbon dioxide-saturated 3% sodium chloride*. Recuperado el 2020, de <https://core.ac.uk/download/pdf/39152162.pdf>
- Hooman, K. A., & Mehdi, J. (2019). Assessment and influence of temperature, NaCl and H₂S on CO₂ corrosion behavior of different microstructures of API 5L X52 carbon steel in aqueous environments. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 93-107.
- Kerani, B. M., & Morshed, A. (1997). *CO₂ Corrosion Control in Oil and Gas Production-Design Considerations*. London: Institute Of Materials.
- Kvarekval, J., & Dugstad, A. (2006). Corrosion Mitigation with pH Stabilization in Slightly Sour Gas/Condensate Pipelines. San Diego: NACE International.
- López, D., Schreiner, W., De Sánchez, S., & Simison, S. (2003). The influence of carbon steel microstructure on corrosion layers An XPS and SEM characterization. *Applied Surface Science*, 207(1-4), 69-85.
- Lvovich, V. (25 de Septiembre de 2014). *Aplicaciones de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) a sensores y diagnósticos*. Recuperado el Diciembre de 2020, de https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_67
- Macdonald, D. D., Urduqui-Macdonald, M., & Rocha-Filho, R. (1991). Determination of the polarization resistance of rebar in reinforced concrete. *Corrosion*, 5(47), 330-335.
- McCaferty, E. (2010). *Introduction to Corrosion Science*. New York: Springer. doi:DOI 10.1007/978-1-4419-0455-3
- Melo, C. (2017). Key Performance Indicators (KPIs) for Evaluation of Corrosion Control Status in the Gathering Pipelines of an Oil Production Field of the Amazon Basin in Ecuador. *STEM Corros*.
- Montes, O., Garcés, R., Reyes, F., Zambrano, P., Estupiñan, F., & Almeraya, F. (2016). Comportamiento a la corrosión del acero API X70 soldado por el proceso de doble arco sumergido inmerso en diferentes medios corrosivos. *Soldagem & Inspeção*.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed.). D.F, México: Limusa.

- Nešić, S. (2007). Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – A review. *Corrosion Science*, 49(12), 4308-4338.
- Nesic, S., Nordsveen, M., Maxwell, N., & Vrhovac, M. (2001). Probabilistic modelling of CO₂ corrosion laboratory data using neural networks. *Corrosion Science*, 43(7), 1373-1392.
- Nordsveen, M., Nesic, S., Nyborg, R., & Stangeland, A. (2003). A Mechanistic Model for Carbon Dioxide Corrosion of Mild Steel in the Presence of Protective Iron Carbonate Films Part 1: Theory and Verification. *Corrosion*, 59, 443-456.
- Ochoa, N., Vega, C., Pébere, N., Lacaze, J., & Brito, J. (2015). CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes. *Materials Chemistry and Physics*, 198-205.
- Olvera, E., Genesca, j., & Flores, J. (2015). CO₂ corrosion control in steel pipelines. Influence of turbulent flow on the performance of corrosion inhibitors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 19-28. doi:10.1016/j.jlp.2015.03.006
- Parra, K. M. (2013). Analisis de tecnico para determinar los etodos d control en los tanques de alacenamiento de crudo del capo Eden-Yuturi. Quito: Universidad Tecnologica Equinoccial.
- Popov, B. N. (2015). *Corrosion Engineiering Principles and Solved Problem*. Oxford: Elsevier.
- Rodney, L. L. (1973). The range of validity of de linear polarization method for measurement of corrosion rates. *Corrosion-NACE*, 29(7), 272-275.
- Schofield, M. J. (2002). Corrosión. *Science Direct*, 33.
- Sevillano, G. (2016). *Estudio del uso de tubería especial de producción para mitigar la corrosión en el campo Palo Azul, Reservorio Hollin*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16918/1/CD-7499.pdf>
- Shackelford, J. F. (1998). *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Madrid: Pearson Educacion, S.A.
- Stansbury, E. E., & Buchanan, R. A. (2000). *Fundaments of Electrochemical Corrosion*. Tennessee: ASM International.
- Universidad de Santiago de Chile. (2003). *Introduccion a la Metalurgia*. (B. S. E, Ed.) Santiago de Chile: Facultad de Ingenieria.
- Villavicencio, J., Ulloa, N., Lozada, L., Moreno, M., & Castro, L. (2020). The role of non-metallic Al₂O₃ inclusions, heat treatments and microstructure on the corrosion resistance of an API 5L X42 steel. *Journal of Materials Research and Technology*(18).

- Volkan, C. (2014). *Corrosion Engineering*. New Jersey: Scrivener Publishing LLC.
- Volkan, C. (2017). *Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook* (1 ed.). (J. Wiley, Ed.) Hoboken: Scrivener Publishing LLC.
- Volkan, C., & Al-Numan, B. (2011). *Corrosion Chemistry* (10 ed.). New Jersey: Jhon Wiley.
- Yin, Z., Feng, Y., Zhao, W., Bai, Z., & Lin, G. (2009). Effect of temperature on CO₂ corrosion of carbon steel. *Surface and Interface Analysis*, 41(6), 517-523.
- Zhang, Z. a. (2018). Molecule Absorption and Corrosion Mechanism Of Steel Under Protection of Inhibitor In a Simulated Concrete Solution With 3,5% NaCl. *RSC Advances*, 8, 20648-20654.

ANEXOS

ANEXO A: ENSAYOS DE DUREZA BRINELL ACERO API 5L X42.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	NORMALIZADO			
MEDICIÓN 1		21.3	52.4	149
MEDICIÓN 2				151
MEDICIÓN 3				145
MEDICIÓN 4				147
MEDICIÓN 5				145
			Promedio:	147.4

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	SUMINISTRO			
MEDICIÓN 1		21.6	52.2	145
MEDICIÓN 2				147
MEDICIÓN 3				147
MEDICIÓN 4				146
MEDICIÓN 5				145
			Promedio:	146

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	BONIFICADO			
MEDICIÓN 1		21.3	52.6	155
MEDICIÓN 2				162
MEDICIÓN 3				155
MEDICIÓN 4				158
MEDICIÓN 5				160
			Promedio:	158

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	RECOCIDO			
MEDICIÓN 1		21.4	52.4	129
MEDICIÓN 2				128
MEDICIÓN 3				130
MEDICIÓN 4				132
MEDICIÓN 5				129
			Promedio:	129.6

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

ANEXO B: ENSAYOS DE DUREZA BRINELL ACERO API 5L GRADO B.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	NORMALIZADO			
MEDICIÓN 1		21.2	54.2	139
MEDICIÓN 2				140
MEDICIÓN 3				143
MEDICIÓN 4				135
MEDICIÓN 5				139
		Promedio:		139.2

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	SUMINISTRO			
MEDICIÓN 1		21	54.4	164
MEDICIÓN 2				162
MEDICIÓN 3				165
MEDICIÓN 4				162
MEDICIÓN 5				163
		Promedio:		163.2

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	BONIFICADO			
MEDICIÓN 1		21.2	54.1	139
MEDICIÓN 2				142
MEDICIÓN 3				141
MEDICIÓN 4				143
MEDICIÓN 5				146
		Promedio:		142.2

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	RECOCIDO			
MEDICIÓN 1		21.1	54.2	119
MEDICIÓN 2				120
MEDICIÓN 3				117
MEDICIÓN 4				120
MEDICIÓN 5				121
		Promedio:		119.4

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

ANEXO C: ENSAYOS DE DUREZA VICKERS ACERO API 5L X42.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Vickers
TRATAMIENTO	NORMALIZADO					
MEDICIÓN 1		21	56.9	110.54	111.01	151.1
MEDICIÓN 2				111.22	111.69	149.3
MEDICIÓN 3				112.39	113.01	146
MEDICIÓN 4				111.74	112.48	147.5
MEDICIÓN 5				112.3	111.3	148.4
Promedio:						148.46

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	SUMINISTRO					
MEDICIÓN 1		19.5	64.4	112.33	113.51	146.7
MEDICIÓN 2				112.24	111.62	148
MEDICIÓN 3				111.39	111.65	149.1
MEDICIÓN 4				112.22	111.58	148.1
MEDICIÓN 5				112.89	113.04	145.3
Promedio:						147.44

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	BONIFICADO					
MEDICIÓN 1		20.5	58.5	102.72	103.33	174.7
MEDICIÓN 2				103.39	103.98	172.5
MEDICIÓN 3				103.26	103.68	173.2
MEDICIÓN 4				103.72	103.2	173.1
MEDICIÓN 5				103.13	102.74	175
Promedio:						173.7

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	RECOCIDO					
MEDICIÓN 1		20.4	58.6	115.43	115.72	138.8
MEDICIÓN 2				115.14	115.47	139.5
MEDICIÓN 3				113.79	114.34	142.5
MEDICIÓN 4				114.68	113.55	142.4
MEDICIÓN 5				114.36	113.75	142.6
Promedio:						141.16

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

ANEXO D: ENSAYOS DE DUREZA VICKERS ACERO API 5L GRADO B.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Vickers
TRATAMIENTO	NORMALIZADO					
MEDICIÓN 1		21.7	49.9	116.19	116.7	136.8
MEDICIÓN 2				114.91	115.05	140.3
MEDICIÓN 3				115.57	115.62	138.8
MEDICIÓN 4				114.4	115.14	140.8
MEDICIÓN 5				116.73	115.97	137
Promedio:						138.74

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	SUMINISTRO					
MEDICIÓN 1		20.3	55.5	104.86	105.57	167.5
MEDICIÓN 2				106	105.16	166.4
MEDICIÓN 3				107.84	106.61	161.3
MEDICIÓN 4				107.74	105.87	162.6
MEDICIÓN 5				106.6	106.6	163.2
Promedio:						164.2

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	BONIFICADO					
MEDICIÓN 1		21.8	49.9	109.97	109.25	154.3
MEDICIÓN 2				109.41	110.58	153.3
MEDICIÓN 3				108.96	109.23	155.8
MEDICIÓN 4				112.72	111.97	148.2
MEDICIÓN 5				112.67	111.28	147.9
Promedio:						151.9

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

		Temperatura °C	Humedad %	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza Brinell
TRATAMIENTO	RECOCIDO					
MEDICIÓN 1		21.8	49.7	126.55	125.19	117
MEDICIÓN 2				125.59	126.06	117.1
MEDICIÓN 3				126.92	125.9	116
MEDICIÓN 4				126.07	126.41	116.4
MEDICIÓN 5				126.71	125.75	116.4
Promedio:						116.58

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

ANEXO E: ENSAYOS DE IMPACTO ACERO API 5L X42.

		Temperatura °C	Humedad %	Energía absorv. (J)
TRATAMIENTO	NORMALIZADO			
PROBETA 1		23.8	48.8	86.93
PROBETA 2				93.2
PROBETA 3				97.44
Promedio:				92.52

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	SUMINISTRO			
PROBETA 1		23.8	47.9	74.73
PROBETA 2				87.97
PROBETA 3				91.1
Promedio:				84.60

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	BONIFICADO			
PROBETA 1		23.9	47.8	106.6
PROBETA 2				117.6
PROBETA 3				99.04
Promedio:				107.75

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	RECOCIDO			
PROBETA 1		24.2	47.3	68.81
PROBETA 2				68.32
PROBETA 3				60.64
Promedio:				65.92

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

ANEXO F: ENSAYOS DE IMPACTO ACERO API 5L GRADO B.

		Temperatura °C	Humedad %	Energía absorv. (J)
TRATAMIENTO	NORMALIZADO			
PROBETA 1		23.8	48.8	51.39
PROBETA 2				50.03
PROBETA 3				53.21
Promedio:				51.54

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	SUMINISTRO			
PROBETA 1		23.8	47.9	76.73
PROBETA 2				72.58
PROBETA 3				63.97
Promedio:				71.09

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	BONIFICADO			
PROBETA 1		23.9	47.8	67.83
PROBETA 2				63.33
PROBETA 3				62.54
Promedio:				64.57

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.

TRATAMIENTO	RECOCIDO			
PROBETA 1		24.2	47.3	42.1
PROBETA 2				47.35
PROBETA 3				48.24
Promedio:				45.90

Fuente: Chulco, Jaime; Tacuri, Jefferson; 2020.



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

FECHA DE ENTREGA: 09 / 04 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

NOMBRES – APELLIDOS: JAIME ENRIQUE CHULCO YANCHA
JEFFERSON MIGUEL TACURI TROYA

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

FACULTAD: MECÁNICA

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO A OPTAR: INGENIERO MECÁNICO

F. ANALISTA DE BIBLIOTECA RESPONSABLE:

ING. CPA. JHONATAN RODRIGO PARREÑO UQUILLAS. MBA.



09-04-2021

0847-DBRAI-UTP-2021