



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL
ACERO API 5L X42 BAJO DOS AMBIENTES ELECTROLÍTICOS
DIFERENTES”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTOR:

ALEX VINICIO ILBIS PACA

Riobamba-Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

“COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ACERO API 5L X42 BAJO DOS AMBIENTES ELECTROLÍTICOS DIFERENTES”

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTOR: ALEX VINICIO ILBIS PACA

DIRECTORA: Ing. DANIELA CARINA VÁSCONEZ NÚÑEZ Ph.D.

Riobamba-Ecuador

2022

©2022, Alex Vinicio Ilbis Paca

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimientos, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Ilbis Paca Alex Vinicio, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi 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 autor asumo 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, 14 de marzo del 2022

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a blue oval. The signature is stylized and appears to read 'Ilbis Paca Alex Vinicio'.

Ilbis Paca Alex Vinicio

175490683-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, **COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ACERO API 5L X42 BAJO DOS AMBIENTES ELECTROLÍTICOS DIFERENTES** realizado por el señor: **ALEX VINICIO ILBIS PACA**, 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. Marcelo Esteban Calispa Aguilar MsC. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	<hr/>	2022-03-14
Ing. Daniela Carina Vásquez Núñez Ph.D DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	<hr/>	2022-03-14
Ing. Fernando Mauricio Tello Oquendo Ph.D MIEMBRO DEL TRIBUNAL	<hr/>	2022-03-14

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación quiero dedicar en primer lugar a mi familia quienes fueron el motor y el apoyo para cumplir con esta meta tan anhelada, con amor para Pedro Manuel Ilbis Guamán, María Rosa Paca Sango y Jessica Beatriz Ilbis Paca. Y de la misma manera para todos aquellos quienes estuvieron desde el principio hasta el fin, este trabajo es para ustedes.

Alex

AGRADECIMIENTO

De manera especial y desde el fondo de mi corazón agradezco a Dios quien me llevo hasta ahí y lo hizo todo posible, a mi Padre, mi madre y mi hermana que en todos los días estuvieron para darme fuerza y seguir adelante; así también a todos mis amigos. Gracias, sin ustedes este objetivo no se hubiera completado, les debo mucho, desde el fondo de mi corazón quedo muy agradecido.

Alex

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xix
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN	1
SUMMARY	1
INTRODUCCIÓN	3

CAPITULO 1

1. MARCO TEORICO REFERENCIAL	5
1.1 Problematización.....	5
1.2 Justificación.....	5
1.3 Alcance.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5 Marco teórico	7
1.5.1 <i>Aleación</i>	7
1.5.2 <i>Fases</i>	8

1.5.3	<i>Diagrama de equilibrio</i>	9
1.6	Acero	10
1.6.1	<i>Clasificación del acero</i>	12
1.6.1.1	<i>Acero Hipoeutectoide</i>	12
1.6.1.2	<i>Acero hipereutectoide</i>	13
1.6.2	<i>Aceros al carbono</i>	14
1.6.3	<i>Aceros aleados</i>	14
1.6.4	<i>API 5L</i>	15
1.6.5	<i>Tratamiento térmico de los aceros</i>	16
1.6.5.4	<i>Revenido</i>	21
1.7	Corrosión	22
1.7.1	<i>Corrosión Química</i>	23
1.7.2	<i>Corrosión electroquímica</i>	24
1.7.3	<i>Tipos de Corrosión</i>	26
1.7.4	<i>Corrosión por agua de mar</i>	28
1.7.5	<i>Causas principales de la corrosión interna en las tuberías</i>	28
1.7.6	<i>Causas principales de la corrosión externa en las tuberías</i>	29
1.8	Proceso de electrolisis	29
1.8.1	<i>Leyes de Faraday que determinan la tasa de corrosión</i>	29
1.9	Aplicación de la primera ley y segunda ley de Faraday – Tasa de corrosión	32
1.10	Evaluación de la corrosión por técnicas electroquímicas	32
1.10.1	<i>Curvas de polarización lineal</i>	32
1.10.2	<i>Curvas potencio dinámicas: ajuste por Tafel</i>	36

<i>1.10.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica</i>	36
<i>1.10.4 Ruido electroquímico</i>	36
1.11 Técnicas de caracterización de materiales	37
<i>1.11.1 Espectrometría de emisión óptica</i>	37
<i>1.11.2 Microscopía</i>	37
<i>1.11.3 Dureza</i>	37

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO	40
2.1 Tipo y nivel de investigación	40
2.2 Descripción de la investigación	40
<i>2.2.1 Metodología</i>	41
<i>2.2.2 Descripción de la metodología</i>	42
2.3 Población y muestra	43
2.4 Materiales	45
2.5 Procesos de Tratamientos térmicos	51
<i>2.5.1 Recocido</i>	52
<i>2.5.2 Normalizado</i>	52
<i>2.5.3 Bonificado</i>	52
2.6 Preparación de las soluciones	53
<i>2.6.1 Elaboración de agua de mar sintética</i>	53
<i>2.6.2 Elaboración de una solución de neutralización</i>	54

2.7	Caracterización de los aceros API 5L X42	55
2.7.1	<i>Análisis metalográfico de los aceros API 5L X42</i>	56
2.7.1.1	<i>Caracterización de los aceros API 5L X42, mediante espectrometría</i>	56
2.7.1.2	<i>Microscopia óptica y análisis SEM</i>	56
2.7.2	<i>Ensayos de Dureza (resistencia a la indentación)</i>	57
2.7.2.1	<i>Dureza Vickers</i>	57
2.7.2.2	<i>Dureza Brinell</i>	57
2.7.3	<i>Ensayo de impacto</i>	57
2.7.4	<i>Ensayos electroquímicos en el acero API 5L X42</i>	57
2.7.5	<i>Celda de corrosión</i>	58
2.7.6	<i>Parámetros experimentales utilizados en los ensayos de corrosión</i>	58
2.7.7	<i>Temperatura ambiente</i>	59
2.7.8	<i>API 5L X42 factor de la medición electroquímica del acero</i>	60
2.8	Evaluación de la corrosión	60
2.9	Comparación de resultados ¡Error! Marcador no definido.	
2.9.1	<i>Comparación de resultados</i>	61

Capítulo III

3.	Resultados y discusión de resultados	62
3.1	Acero API 5L X42 observado a través de microscopia óptica (acero sometido al medio electrolítico agua de mar)	62
3.1.1	<i>Proceso del ensayo</i>	64

3.2	Acero API 5L X42 observado por microscopia óptica, sometido al medio electrolítico KCl a 0,1M.....	68
3.3	Ensayo de dureza	71
3.3.1	<i>Ensayo de dureza Vickers</i>	<i>71</i>
3.3.2	<i>Ensayo de dureza Brinell.....</i>	<i>72</i>
3.4	Ensayos de Impacto	72
3.5	Ensayo de corrosión.....	73
3.5.1	<i>Voltamperometría de barrido lineal.....</i>	<i>73</i>
3.5.2	<i>Evaluación de la tasa de corrosión.....</i>	<i>80</i>
3.5.3	<i>Evaluación de los productos de corrosión.....</i>	<i>84</i>
3.6	Resultados generales en conjunto de los resultados de las probetas API 5L X42 sometidas al electrolito de agua de mar.....	92
3.7	Resultados generales en conjunto de los resultados de las probetas API 5L X42 sometidas al electrolito KCl a 0,1M.	95
3.8	Resumen comparativo de los resultados finales obtenidos de la probeta API 5L X42 sometidos a dos electrolitos (agua de mar y cloruro de potasio).....	99
3.8.1	<i>Comparación del acero API 5L X42 bajo dos ambientes electrolíticos en función de la tasa de corrosión.</i>	<i>101</i>
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Aleaciones más comunes.	7
Tabla 2-1: Designación europea y composición de diferentes aceros al carbono.	14
Tabla 3-1: Aleaciones más comunes.	15
Tabla 4-1: API 5L grado B PSL 1 – Línea de tuberías composición química.	16
Tabla 5-1: API 5L Línea de tuberías. Propiedades mecánicas.	16
Tabla 6-1: Propiedades mecánicas de aceros normalizados y recocidos ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7-1: Microestructuras optimas con diferentes contenidos de carbono.	19
Tabla. 1-2: Promedio de dureza aplicada en cada tratamiento térmico.	43
Tabla 2-2: Procedimiento según los grados de libertad de la muestra.	44
Tabla 3-2: Reactivos y compuestos químicos.	46
Tabla 4-2: Equipos para el análisis del proceso y desarrollo del ensayo corrosivo.	49
Tabla 5-2: Descripción de los instrumentos del laboratorio.	51
Tabla 6-2: Parámetros y composición deriva del líquido (agua) del campo petrolífero.	53
Tabla. 7-2: Componentes del agua del mar sintético (g/L).	54
Tabla 1-3: PROBETA TIPO: SUMINISTRO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.	64
Tabla 2-3: PROBETA TIPO: RECOCIDO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.	65
Tabla 3-3: PROBETA TIPO: NORMALIZADO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.	66

Tabla 4-3: PROBETA TIPO: BONIFICADO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.....	67
Tabla 5-3: Detalles de los resultados obtenidos de la dureza Vickers en la probeta API 5L X42	71
Tabla 6-3: Detalles de los resultados obtenidos en la dureza Brinell en la probeta API 5L X42	72
Tabla 7-3: Detalles de los resultados obtenidos en los ensayos de impacto a la probeta API 5L X42	73
Tabla 8-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Suministro, Solución: Agua de Mar a 0,1M	81
Tabla 9-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Normalizado, Solución: Agua de Mar a 0,1M .	81
Tabla 10-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Recocido, Solución: Agua de Mar a 0,1M.....	82
Tabla 11-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Bonificado, Solución: Agua de Mar a 0,1M ..	82
Tabla 12-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Suministro, Solución: KCl a 0,1M	82
Tabla 13-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Normalizado, Solución: KCl a 0,1M.....	82
Tabla 14-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Recocido, Solución: KCl a 0,1M	83
Tabla 15-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Bonificado, Solución: KCl a 0,1M.....	83
Tabla 16-3: Resultados del potencial y tasa de corrosión sometido a electrolisis.....	99
Tabla 17-3: Comparación de la tasa de corrosión obtenida de los ambientes electrolíticos.....	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2: Curvas para la evaluación del análisis de varianza	45
Gráfico 1-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Suministro.....	74
Gráfico 2-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Normalizado.....	74
Gráfico 3-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Recocido.	75
Gráfico 4-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Recocido.	76
Gráfico 5-3: Grafico comparativo de la tasa de corrosión bajo dos ambientes electrolíticos...102	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Diagrama de fase isomórfico binario para aleaciones de cobre-níquel.	8
Figura 2-1: Diagrama sistema isomórfico.	9
Figura 3-1: Diagrama de equilibrio. Fases cobre & plata.	10
Figura 4-1: Diagrama de fase hierro – carbono.	11
Figura 5-1: Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide. .	12
Figura 6-1: Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide.	13
Figura 7-1: Proporción de los constituyentes presentes en la microestructura de aceros recocidos.	17
Figura 8-1: Composición (% en peso C).	19
Figura 9-1: Intervalo de temperatura para el temple o endurecimiento de los aceros.	20
Figura 10-1: Diagrama de Revenido	22
Figura 11-1: Representación de una celda electroquímica.	23
Figura 12-1: Reacción Clorhídrico con zinc para producir gas hidrogeno.	25
Figura 13-1: Gráfico hipotético de resistencia a la polarización	34
Figura 1-2: Diagrama de metodología del proyecto	41
Figura 1-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo suministro.	68
Figura 2-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo recocido.	69
Figura 3-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo normalizado.	70
Figura 4-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo bonificado.	70
Figura 5-3: Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo suministro tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h.	77

Figura 6-3: Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo recocido tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h	78
Figura 7-3: Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo normalizado tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h	78
Figura 8-3: Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo bonificado tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h	79
Figura 9-3: Probeta API 5L X42, tipo Suministro sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.	85
Figura 10-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo suministro. Ensayo de espectrometría de rayos X.....	85
Figura 11-3: Probeta API 5L X42, tipo normalizado sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.	85
Figura 12-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo normalizado. Ensayo de espectrometría de rayos X.....	85
Figura 13-3: Probeta API 5L X42, tipo recocido sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.	86
Figura 14-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo recocido. Ensayo de espectrometría de rayos X.....	86
Figura 15-3: Probeta API 5L X42, tipo bonificado sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.	86
Figura 16-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo bonificado. Ensayo de espectrometría de rayos X.....	86
Figura 17-3: Probeta API 5L X42, tipo suministro sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.....	88

Figura 18-3: Probeta API 5L X42, tipo recocido sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.	88
Figura 19-3: Probeta API 5L X42, tipo normalizado sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.	89
Figura 20-3: Probeta API 5L X42, tipo suministro sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.	89
Figura 21-3: Resultados de la curva de polarización, sometidos a medio electrolítico agua de mar, a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado	92
Figura 22-3: Resultados del análisis EDS, evaluación de las tasas de corrosión de las probetas sometidas al medio electrolítico agua de mar.	93
Figura 23-3: Gráficas de Tafel que comprenden los resultados de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.	95
Figura 24-3: Resultados de las inclusiones halladas en porcentaje ya tasa de corrosión de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.	96
Figura 25-3: Tasas de corrosión según la dureza obtenida después del tratamiento térmico de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.	97

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
SEM	Microscopio Electrónico de Barrido
EDS	Espectroscopia de Rayos X con Dispersión de Energía
KCl	Cloruro de potasio
XDR	Difracción de rayos X
MM/Y	Milímetros por año
MPY	Mili pulgadas por año
OCP	Potencial de circuito abierto
AR	As Received (Suministro)
A	Annealing (Recocido)
N	Normalized (Normalizado)
Q&T	Quenched & Tempered (Bonificado)

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS EDS DE PRODUCTOS QUÍMICOS

ANEXO B: ENSAYO DE IMPACTO ACERO API 5L X 42

ANEXO C: ENSAYO DE DUREZA BRINELL API 5L X 42

ANEXO D: ENSAYO DE DUREZA VICKERS API 5L X 42

ANEXO E: MECANISMO DE CORROSIÓN POR PICADURAS

RESUMEN

Durante décadas el transporte de crudo se ha realizado mediante tuberías del tipo API 5L, cuyas propiedades mecánicas y químicas cumplen con las especificaciones técnicas para tal fin, sin embargo, la corrosión de los metales sigue siendo un problema y más aún en el campo petrolero. Por tal motivo, en esta investigación se comparó y analizó el comportamiento del acero API 5L X42 sometido a dos ambientes electrolíticos diferentes (Agua de mar y KCl (cloruro de Potasio)). Varias probetas fueron preparadas para la aplicación de 3 tratamientos térmicos, los cuales son: recocido, normalizado y bonificado, estas a su vez fueron comparadas con la probeta de tipo suministro; para la obtención de los resultados se examinó el papel de los tratamientos térmicos, las inclusiones no metálicas, la microestructura mecánica y química con una comparación entre los aceros según la norma (UNE EN 10020;2001); por medio del SEM (Scanning Electron Microscopy) utilizando la norma NTE INEN ISO 6507, análisis metalográfico que describió la relación entre la microestructura con la dureza de la probeta y la tasa de corrosión. Finalmente se realizó una comparación de los resultados de las probetas con el fin de presentar el tratamiento térmico que ayuda a mejorar las propiedades mecánicas y químicas del acero disminuyendo la tasa de corrosión en el acero API 5L X42. Los resultados en ambos medios electrolíticos muestran que la probeta de tipo recocido es quien tiene mayor resistencia con una tasa a la corrosión por debajo del 0.07 mm/year de avance, a comparación del tipo suministro que tiene una tasa de corrosión de 0.32 mm/year. En conclusión, el tratamiento térmico de bonificado presentó mayor resistencia a la indentación con 158 HB y energía de impacto de 107,7 J. Se recomienda que cada uno de los ensayos puedan realizarse bajo supervisión controlada.

Palabras clave: <ANÁLISIS METALOGRAFICO>, <ACERO>, <ELECTRÓLISIS>, <ACERO DE BAJO CARBONO>, <CORROSIÓN>, <EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL>.

2135-DBRA-UTP-2022

ESPOCH - DBRAI
PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS
BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL
**15 NOV 2022**
REVISIÓN DE RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA
Por: Rana Hora: 15:32

SUMMARY

For decades, crude oil has been transported by API 5L type pipes, whose mechanical and chemical properties meet technical specifications. However, metal corrosion is still a problem, especially in the oil field. For this reason, this research compared and analyzed the behavior of API 5L X42 steel subjected to two different electrolytic settings (Seawater and KCl (Potassium Chloride)). Several test tubes were prepared for the application of 3 thermal treatments, which are: annealed, normalized and hardened, these in turn were compared with the supply type test tube. In order to obtain the results, the role of thermal treatments, non-metallic inclusions, mechanical and chemical microstructure was examined with a comparison between steels according to the standard (UNE EN 10020;2001); by means of SEM (Scanning Electron Microscopy) using the NTE standard INEN ISO 6507, a metallographic analysis that described the relationship between microstructure and the hardness of the test tube and the rate of corrosion. Finally, a comparison of the results of the test tubes was made in order to present the heat treatment that helps to improve the mechanical and chemical properties of the steel by reducing the rate of corrosion in the API 5L X42 steel. Results on both electrolytic media show that the annealed type cylinder has the highest resistance with a corrosion rate below 0.07 mm/year advance, compared to the supply type which has a corrosion rate of 0.32 mm/year. In conclusion, the annealing heat treatment showed higher resistance to indentation with 158 HB and impact energy of 107.7 J. It is recommended that each of the tests can be carried out under controlled supervision.

Keywords: < METALLOGRAPHIC ANALYSIS >, <STEEL>, <ELECTROLYSIS>, <LOW CARBON STEEL>, <CORROSION>, <EXTRAPOLATION TAFEL>



Lic. Angela Cecibel Moreno Novillo
062603938

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el acero es uno de los materiales más utilizados en el mundo debido a sus propiedades mecánicas desde la fabricación de herramientas, fabricación de maquinarias industriales, transporte de crudo, entre otras aplicaciones. Básicamente todos los aceros están compuestos por una aleación de hierro y carbono, de este último, se cuenta con un porcentaje mayor a 0,08% y menores a 2,1%, la caracterización principal del mismo es su resistencia relativa de dureza y tenacidad propia del hierro en su estado de suministro.

A lo largo de la historia, la corrosión es una de las mayores desventajas que producen millones de dólares en pérdidas anuales por parte de las empresas de transporte de crudo y en otras áreas de la industria; ya que el hierro se oxida bajo diversos ambientes electrolíticos donde se localiza su uso, al realizar una protección al acero mediante tratamientos superficiales se interviene en el tiempo acelerado de la corrosión dándole una mayor durabilidad de los materiales. También podemos mencionar la existencia de aleaciones resistentes a la corrosión aptos para lugares abiertos o semejantes a los aceros inoxidable.

Según el artículo *“Evaluación de la susceptibilidad a la corrosión por picado del acero API 5L X42 expuesto a un ambiente con cloruros y CO₂ mediante la técnica de ruido electroquímico.”* Los resultados indican que la formación de una capa protectora, constituida principalmente por FeCO₃, depende de la presión parcial de CO₂ del sistema. No obstante, la estabilidad de dicha capa es afectada significativamente por el aumento de la concentración de iones cloruro, que producen fenómenos de corrosión localizada en algunas áreas de la superficie del acero API 5L X42, los cuales fueron detectados por la técnica de ruido electroquímico. (D. Peña-Ballesteros, 2011)

De la misma manera el artículo *“Comportamiento a la corrosión del acero API-5L-X42 para tuberías de petróleo / gas natural en las aguas del Mar del Sur de China y el Estrecho de Melaka”* nos dice que, en este experimento, la tubería de acero al carbono API 5L X42 se utilizó como muestra y las aguas marinas se tomaron de varios lugares de Malasia peninsular. Se encontró que la tasa de corrosión del acero al carbono es relativamente más alta en las aguas del Estrecho de Melaka que en las aguas del Mar de China Meridional. Los resultados de la velocidad de corrosión variaron de 0,01 a 0,024 mm / año. Se llevaron a cabo pruebas de inmersión para examinar el producto de corrosión formado en la superficie de la tubería y, a partir del resultado, se produjo corrosión localizada (picaduras) y corrosión uniforme en la superficie de forma severa para ambos electrolitos de agua de mar. (Asyadi Azam, 2020)

En otra investigación *“Efectos del carbonato y bicarbonato en la resistencia a la corrosión en aceros api 5l con tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado.”* 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 bonificado mejora en un 46.47% con respecto a la probeta de tipo 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, comprobado por medio de la experimentación EDS, estos carbonatos forman una fina capa sobre la superficie de los materiales que lo protegen de la corrosión. (Yancha, y otros, 2021)

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es comparar los efectos causados por dos medios electrolíticos, agua de mar y KCl (Cloruro de potasio) en el acero API 5L X42, en función de la corrosión presentada; para lo cual las investigaciones realizadas en la tesis (Yancha, y otros, 2021) que presenta los datos del análisis en agua de mar que será comparada con los resultados encontrados en el artículo científico de los autores (Villavicencio, y otros, 2020) que presentan los datos de las probetas sometidas al medio de cloruro de potasio (KCl), conjuntamente con los documentos principales a analizar se ha tomado en cuenta las diversas bibliografías científicas que hacen referencia directa con la investigación de este tema. Por lo tanto se han llegado a realizar diferentes tratamientos térmicos como recocido, normalizado y bonificado al material en cuestión en su fase de suministro para evaluar sus propiedades mecánicas y metalográficas lo que nos permitió establecer el mejor tratamiento térmico para mejorar la resistencia a la corrosión de las probetas evaluadas; es tan complejo la prevención de la corrosión de manera significativa en los aceros que solo en Colombia un estudio avalado por (Universia, 2013) demostró que se tiene una pérdida superior a 26 mil millones de pesos mientras que en estados unidos las perdidas superan los 276 billones de dólares que equivalen al 8% del PIB en pérdida por corrosión, el estudio también demostró que, de la producción anual del acero, cercana a los 1500 millones de toneladas alrededor de 300 millones de toneladas (25%) es la cantidad que se corroe anualmente. Todo gira en torno a la dependencia del país que tenga sobre el acero que es proporcional a la corrosión. Por lo expuesto podemos afirmar que la investigación proporcionará datos de suma importancia para la disminución del proceso de corrosión y por ende las pérdidas originadas en correlación con la integridad de la tubería evaluando el mejor tratamiento para una mayor durabilidad.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEORICO REFERENCIAL

1.1 Problematización

Las tuberías de crudo están sometidas a ambientes corrosivos como (KCI (Cloruro de potasio) y Agua de mar), por lo que se necesita conocer el comportamiento del acero tratado térmicamente (API 5L X42) e identificar su influencia en la resistencia a la corrosión en estos medios electrolíticos.

1.2 Justificación

La investigación sostendrá un aporte efectivo de conocimientos e información relevante sobre los procesos de corrosión en el acero API 5L X42 en los medios electrolíticos como son: (KCI (cloruro de potasio) y Agua de mar). El acero estará bajo la aplicación de tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado, donde se utilizarán métodos experimentales, los cuales permitirán encontrar las mejores propiedades en cuanto a su durabilidad en función del tiempo contra la corrosión de acuerdo a los resultados de los tratamientos térmicos empleados.

Con la finalidad de conocer el comportamiento del acero sometido a ambientes corrosivos como son el Cloruro de potasio (KCI) y Agua de mar es necesario recrear las condiciones ambientes semejantes para las condiciones de trabajo, por lo tanto, las probetas API 5L X42 en su estado de suministro serán sometidas a una serie de tratamientos térmicos, donde se aplicaran procedimientos experimentales y cuantitativos, que generaran resultados que sirven como fundamento práctico de trabajos contiguos o similares que busquen crear opciones de mejoramiento al acero para la industria de transporte de crudo y gases.

Por lo cual, esta investigación proveerá de datos de suma importancia acerca del mejor tratamiento térmico que se debe aplicar al acero mejorando sus propiedades mecánicas y químicas ante la corrosión en los dos ambientes presentados (KCI (cloruro de potasio) y Agua de mar) para brindar a la industria petrolera o afines la posibilidad de disminuir significativamente la corrosión en las tuberías causando un impacto positivo a la economía y el avance de futuras investigaciones.

1.3 Alcance

A fin de identificar la influencia en la resistencia a la corrosión por el acero API 5L X42 tratado térmicamente ante la corrosión en estos medios electrolíticos para proporcionar resultados óptimos obteniendo la mejor combinación para una baja tasa de corrosión en el acero.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General*

- Realizar una comparación de la resistencia a la corrosión del acero API 5L X42 bajo dos ambientes electrolíticos diferentes, en términos de la tasa de corrosión y propiedades mecánicas.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los aceros al carbono, tratamientos térmicos y corrosión
- Comparar las propiedades mecánicas, dureza y resistencia al impacto de 5 probetas de acero API 5L X42
- Comparar la resistencia a la corrosión de las 5 probetas de acero API 5L X42 con dos electrolitos en términos de tasas de corrosión
- Interpretar los resultados para la aplicación en la industrial

1.5 Marco teórico

1.5.1 Aleación

Se describe como una combinación homogénea de uno o varios elementos que se constituyen para la formación de un nuevo elemento en la mezcla, de lo cual al menos uno de los elementos es un metal. Para realizar una aleación, se debe proporcionar los ingredientes necesarios al seleccionar la composición de la aleación como también las condiciones de trabajo del proceso. Estos procesos de mezcla constituyen una aleación, que forma nuevos materiales con propiedades que suplen las necesidades en las industrias, que se logran a partir de metales puros. (Newell, 2011: p. 110)

Tabla 1-1. Aleaciones más comunes.

Tabla Aleaciones metálicas comunes	
Nombre	Composición %
Aleación de aluminio 3S	98 Al, 1.25 Mn
Bronce de aluminio	90 Cu, 10 Al
Oro 8 quilates	47 Cu, 33 Au, 20 Ag
Oro paladio	40 Cu, 31 Au, 19 Ag, 10 Pd
Bronce manganeso	95 Cu, 5 Mn
Bronce, metal brillante	67 Cu, 33 Sn
Latón rojo	85 Cu, 15 Zn
Oro 14 quilates	58 Au, 14-28 Cu, 4-28 Ag
Oro platino, blanco	60 Au, 40 Pt
Acero	99 Fe, 1 C
Acero inoxidable 316	63-71 Fe, 16-18 Cr, 10-14 Ni, 2-3 Mo, 0.4 Mn, 0.03 C
Papel de estaño	88 Sn, 8 Pb, 4 Cu, 0.5 Sb

Fuente: Calister, 2010

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

1.5.2 Fases

Es una proporción homogénea dentro de un sistema que cuenta con características físicas y químicas uniformes por sus fases circundantes, por lo que podemos decir que un sólido, un líquido o una disolución gaseosa se les nombra fases. Cuando existen más de una fase dentro de un sistema cada una de ellas contara son sus propias características que los diferenciara de la una y la otra además de poseer un límite, este límite aparece límite como un cambio intermitente y abrupto en las características física – químicas que se presentan, estas fases pueden variar de acuerdo con su composición y temperatura dentro de los metales en equilibrio. (Newell, 2011: p. 111)

Cuando existen sistemas monofásicos aquellos reciben el nombre de “homogéneo”, los sistemas que poseen dos o más fases tienen la denominación de “mezclas” o “sistemas heterogéneos”. La Mayoría de las aleaciones son sistemas heterogéneos por ellos las fases interactúan de modo que la combinación dentro del sistema multifase se considera diferente en cuestión de las propiedades químicas de cualquier fase individual. (Pinzón et al, 2017: p. 24)

Un sistema isomórfico binario se constituye como un sistema simple debido a la presencia de dos elementos que están presentes en la aleación y se le conoce como isomórfico por la presencia de una sola fase líquida y una sólida (Gordo et al, 2012 p. 138). En la figura 1-1 y 2-1 se observa el diagrama de fase isomórfico binario para aleaciones de cobre-níquel y el diagrama sistema isomórfico respectivamente.

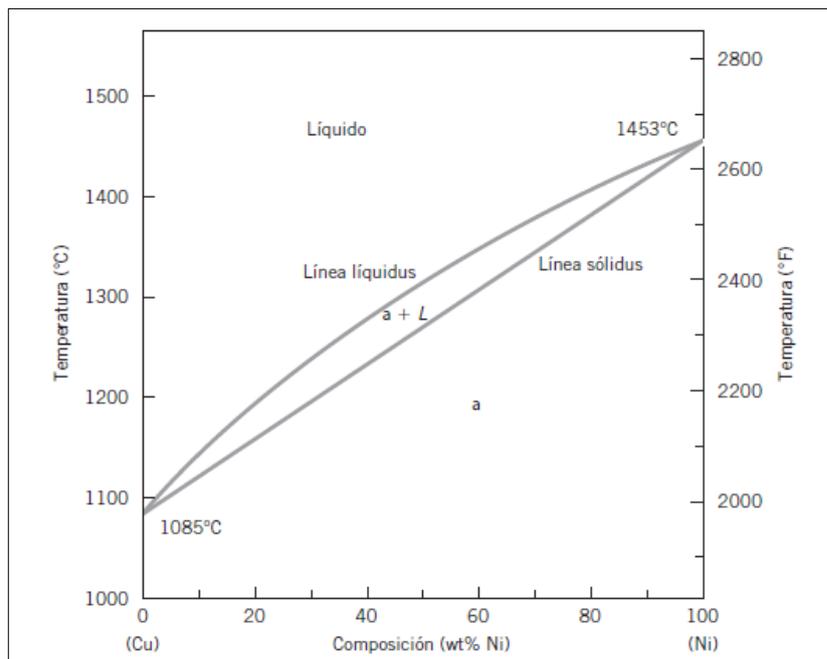


Figura 1-1. Diagrama de fase isomórfico binario para aleaciones de cobre-níquel.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: Callister, 2016

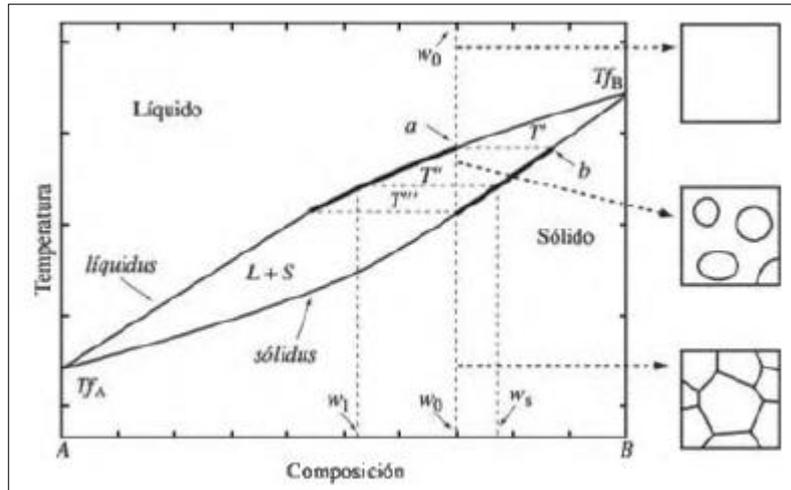


Figura 2-1. Diagrama sistema isomórfico.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Askeland, 2012)

1.5.3 Diagrama de equilibrio

También conocido como diagrama de fase, presenta detalles acerca de las fases que interactúan entre sí, aquellos se clasifican de acuerdo con el número de materiales y el equilibrio en la interacción.

La figura 3-1 presenta el diagrama de equilibrio de la aleación hierro – carbono, es uno de los ejemplos de un diagrama de fase que bajo distintos parámetros proporcionan información relevante, entre ellos la temperatura que es el factor principal que al modificarse llega a originar los diferentes cambios de las microestructuras, en un proceso implícito de la transformación de una fase a la otra o a su vez la aparición o desaparición de una fase. Su utilidad radica en la posibilidad de predecir la transformación y su microestructura resultante. Por lo tanto, su representación consiste en la relación entre la estructura, cantidad de fases en equilibrio, y composición. (Callister, 2016: p. 281)

especifica que un acero 10120 pertenece al grupo de bajo carbono que contiene 1,20% de C. (Askeland et al, 2012: p. 323)

En la figura 4-1 se observa cada una de las fases que se encuentran en el diagrama hierro carbono, además las interacciones que se forman en función de la temperatura y la cantidad de carbono. Se presentan las fases a la que se encuentran, donde se observa, que a una temperatura de 1539°C se encuentra en una fase Líquida (L) y a medida que su temperatura desciende pasamos la línea de división donde se encuentra en la fase conocida como austenita, desde ese punto inicia la austenización hasta descender a una temperatura entre 1100°C y 1200°C donde tenemos una austenización completa lo que nos lleva a la siguiente etapa en la línea de enfriamiento el cual está a una temperatura menor de 800°C en la que observamos la formación de fase Perlítica en el acero.

De la misma manera si nos mantenemos en una temperatura entre 600°C y 700°C, y nos dirigimos a lo largo de una línea horizontal se origina la formación de cementita en medio de la perlita, esto se debe principalmente al aumento de la cantidad de carbono en la mezcla. Hasta que a 6.67% de C tendremos un equivalente del 100% del cementita.

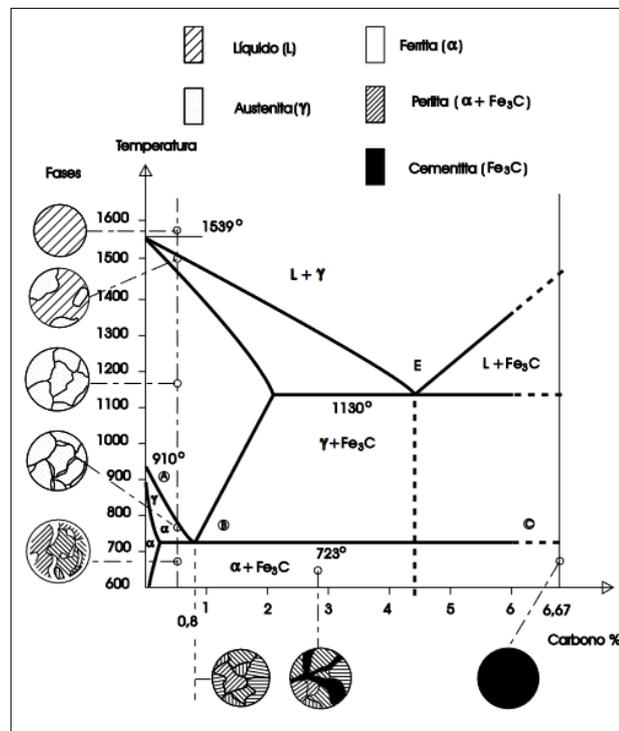


Figura 4-1. Diagrama de fase hierro – carbono

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Callister, 2016)

1.6.1 Clasificación del acero

El acero se clasifica en:

1.6.1.1 Acero Hipoeutectoide

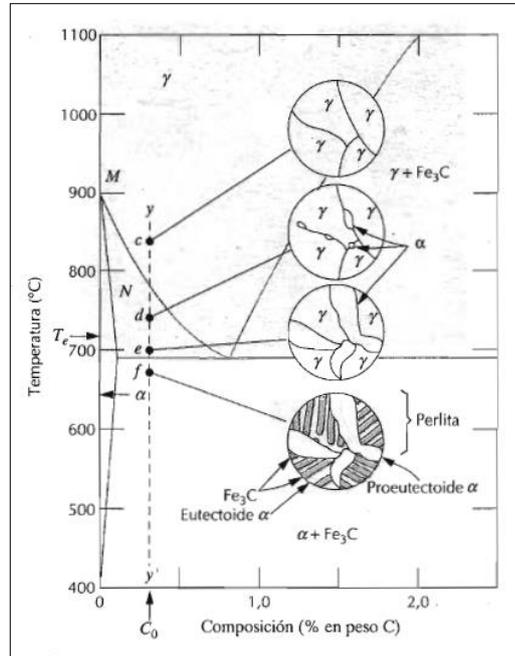


Figura 5-1. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Callister, 2016)

Se denominan aceros hipoeutectoides a la aleación que se compone entre 0,022 y 0,77% C, en la figura 5-1 se puede observar el punto C_0 , como un indicador del punto eutectoide y su proceso en el diagrama por lo que su rango se ubica a la izquierda del gráfico, la línea de enfriamiento de la aleación se encuentra designado por y y y' , de la figura 6-1. En el punto C se detalla una composición enteramente de fase γ (austenítica) a una temperatura de 875 °C, se presenta una región bifásica α - γ (alfa y gamma γ) que se encuentra a 775 °C, observamos su coexistencia según el diagrama microestructural donde se generan la mayoría de las partículas α en los límites de los granos γ originales, en la región de enfriamiento α - γ dentro del límite MN de temperatura la composición de ferrita varia y se enriquece ligeramente en carbono y a su vez la austenita cambia de modo.

Desde los puntos d al e se puede apreciar el aumento de fase α en la microestructura, al descender al punto f , la composición sufre una transformación al estado perlítico, en la temperatura T_e , esto sucede por debajo del límite del punto eutectoide, por lo que no cambia su fase al cruzar la temperatura eutectoide, podemos notar en el grafico del punto f la existencia de dos

microconstituyentes como ferrita pro eutectoide y perlita, los cuales se encuentran en todos los aceros hipoeutectoides. (Callister, 2016: p. 287-288)

1.6.1.2 Acero hipereutectoide

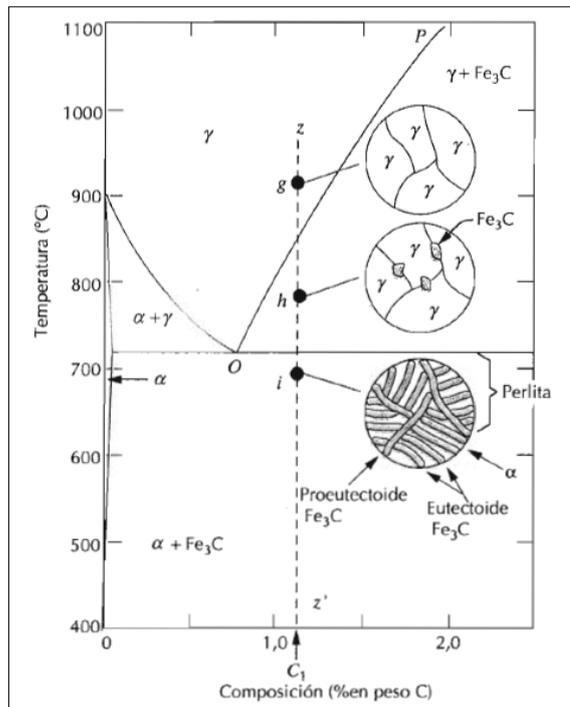


Figura 6-1. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Askeland et al, 2012: p. 290)

Se denomina aceros hipereutectoide al rango comprendido entre 0,77 y 2,11% C en peso de carbono por lo que como se indica en la figura 6-1 la transformación de enfriamiento C_1 por la línea $z z'$. Encontramos en el punto g únicamente componentes, al continuar con la línea de enfriamiento continuamos con el punto h de fase $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$, por lo tanto, la fase de cementita tiene un crecimiento de los límites iniciales entre los granos de γ , al formarse antes de la reacción eutectoide se le conoce como cementita pro eutectoide, de la misma manera a los 6,7% C la austenita permanece constante cuando varía su temperatura. De la misma manera podemos observar en el gráfico que la austenita se desplaza al largo del rango PO, al traspasar el punto eutéctico toda la composición se transforma en perlita y cementita pro eutectoide, estos elementos son los microconstituyentes resultantes. (Callister, 2016: p. 289-290)

1.6.2 Aceros al carbono

Este tipo de aceros cuentan únicamente con el carbono como material de mezcla para conseguir propiedades específicas como son la formación mayor de perlita, proporcional a la cantidad de carbono incluida, por lo tanto se obtiene una mayor dureza en el acero como también el límite elástico y la resistencia a la tracción, en cambio se disminuye la plasticidad y tenacidad, este tipo de aceros se utilizan mayoritariamente a nivel mundial con estructuras ferrito-perlíticas, que se obtiene mediante el recocido o normalizado. Las ventajas de este tipo de aceros se considera en la forma de enfriarlos en medioambientes muy severos, esto ocurre para piezas delgadas mientras que para piezas gruesas se debe templar únicamente la zona más superficial. En la tabla 2-1 se muestra las designaciones y su composición química que poseen los aceros al carbono.

Tabla 2-1. Designación europea y composición de diferentes aceros al carbono.

Designación	%C	% Si máx.	% Mn	% P máx.	%S máx.
C35	0,32-0,39	0,40	0,50-0,80	0,045	0,045
C40	0,37-0,44	0,40	0,50-0,80	0,045	0,045
C45	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,045	0,045
C55	0,52-0,60	0,40	0,60-0,90	0,045	0,045
C60	0,57-0,65	0,40	0,60-0,90	0,045	0,045

Fuente: (Gordo et al, 2012: p. 330)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

1.6.3 Aceros aleados

Los aceros aleados son caracterizados por poseer cantidades menores de otros elementos como son: níquel, cromo, manganeso, vanadio, silicio, molibdeno y boro. Al incluir estos elementos en cantidades pequeñas obtenemos como resultado una diferencia en las propiedades mecánicas iniciales. Tales aceros de baja aleación se agrupan según su función como aceros para máquinas y automotores, aceros de para servicio de alta y baja temperatura, aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación. En la tabla 3-1 se muestra las aleaciones más comunes de aceros aleados. Por sus propiedades de resistencia a la corrosión son ampliamente utilizadas en áreas de la industria del gas y petróleo. (Ospina et al, 2007)

Tabla 3-1. Aleaciones más comunes.

Serie o designación	Tipos y clases
10XX	Aceros al carbón no Re sulfurizados
11XX	Aceros al carbón Re sulfurizados
13XX	Aceros al manganeso 1.75%
23XX	Aceros al níquel 3.5%
33XX	Níquel 3.5% cromo 1.55%
40XX	Acero al molibdeno 0.25%
46XX	Níquel 1.55% a 1.8% Molibdeno 0.20% a 0.25%
50XX	Cromo de 0.28% a 0.40%
87XX	Níquel 0.55%, cromo 0.50%, molibdeno 0.25%
98XX	Níquel 1.00%, cromo 0.80%, molibdeno 0.25%

Fuente: (Ospina et al, 2007)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

1.6.4 *API 5L*

Las normas API (Industria de petróleo y gas natural) son especificaciones utilizadas en tubos de acero para el sistema de transporte de tuberías para oleoductos y gasoductos. De esta norma se derivan varios tipos de especificaciones entre las que tenemos API 5B, API 5CT, 5D, API 5 L del API y de esta forma continuamente. La línea de acero de la norma API 5L son tuberías con especificaciones ideales cuyo objetivo principal es el transporte de gas, agua, y aceite en las industrias de petróleo y gas natural los cuales están proporcionadas con cubiertas inconsútil de las que se deriva la clasificación A25, A, B (y los siguientes "X" grados), X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, la Tabla 4-1 muestra la composición química de diferentes aceros. El par de números consigo de la letra X relacionan la resistencia mínima al rendimiento de la tubería.

API 5L X42 es una tubería sin costura y soldada de las cuales se derivan las especificaciones PSL 1 y PSL 2, los cuales indican su composición química, procesos de fabricación, resistencia mecánica, tratamiento térmico, registros de prueba, trazabilidad, etc. Por tanto, X42 denotan la resistencia mínima a la fluencia del acero de la tubería. X42 tiene el límite elástico mínimo de 42 kilopound / square inch (ksi) (Petróleo, 2000). La Tabla 5- 1 muestra las propiedades mecánicas del acero API 5L (Línea de tuberías)

Tabla 4-1. API 5L grado B PSL 1 – Línea de tuberías composición química.

Grado	PSL1				PSL2			
	C (Max.)	Mn (Max.)	P(Max.)	S(Max.)	C (Max.)	Mn (Max.)	P(Max.)	S(Max.)
A	0.22	0.9	0.03	0.03	0.22	1.2	0.025	0.015
B	0.26	1.2	0.03	0.03	0.22	1.3	0.025	0.015
X42	0.26	1.3	0.03	0.03	0.22	1.4	0.025	0.015
X46	0.26	1.4	0.03	0.03	0.22	1.4	0.025	0.015
X52	0.26	1.4	0.03	0.03	0.22	1.4	0.025	0.015
X56	0.26	1.4	0.03	0.03	0.22	1.4	0.025	0.015
X60	0.26	1.4	0.03	0.03	0.22	1.45	0.025	0.015
X65	0.26	1.45	0.03	0.03	0.22	1.65	0.025	0.015
X70	0.26	1.65	0.03	0.03	0.22	1.85	0.025	0.015

Fuente: (Castrillón et al, 2017)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 5-1. API 5L Línea de tuberías. Propiedades mecánicas.

Propiedades mecánicas PSL 1					
Grado	Fuerza de producción (Min.)		Resistencia a la tracción (mín.)		Alargamiento
	Ksi	MPa	Ksi	MPa	
B	35	241	60	414	E=1944 A 0.2 /U 0.9
X42	42	290	60	414	
X46	46	317	63	434	
X52	52	359	66	455	
X56	56	386	60	414	
X60	60	414	63	434	
X65	65	448	66	455	

Fuente: (Castrillón et al, 2017)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

1.6.5 Tratamiento térmico de los aceros

Son operaciones que se encargan de tratar al material bajo un proceso de calentamiento y enfriamiento, en varios tiempos controlados que generalmente se aplican a un metal o una aleación para que de esta forma se pueda mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, de

los más comunes la dureza, la elasticidad y la resistencia, se le conoce como tratamiento térmico de los aceros. Dentro del procedimiento térmico para el acero tenemos la transformación de la austenita, por lo que la apariencia y su naturaleza que se encuentran en cambios de fases finalmente determinaran las propiedades físicas y por lo tanto mecánicas del acero. (Avner, 1988) Los tratamientos térmicos utilizados en la industria son:

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

1.6.5.1 Recocido

Es un proceso para lograr que el acero tratado pueda ser más manejable en su capacidad para deformar o maquinarse, antes de aquello es pertinente según (Flores, 1996) este proceso debe tener 2 estados de templado y revenido lo que diseña un acero alto en resistencia a choques y deformaciones, por este último caso es necesario que el acero tenga un proceso de recocido. En la figura 7-1 se observa el proceso de recocido.

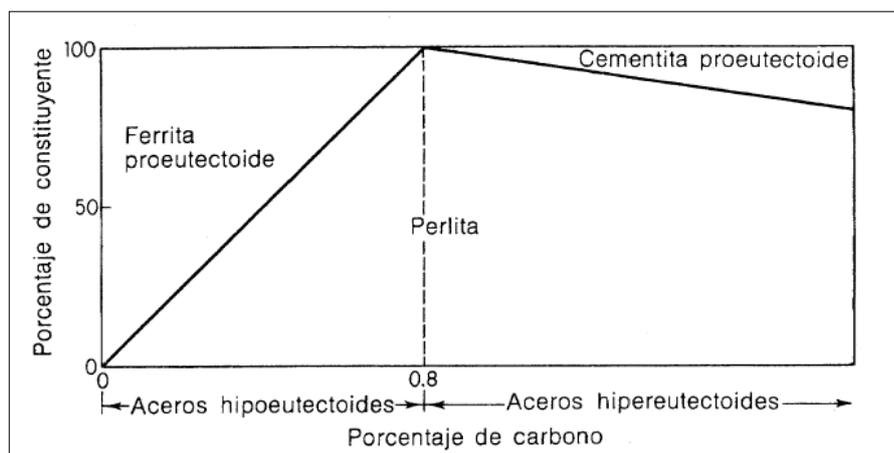


Figura 7-1. Proporción de los constituyentes presentes en la microestructura de aceros recocidos.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Avner, 1988: p. 254)

Para el proceso de recocido tenemos como punto de partida calentar al material (acero) por debajo de la temperatura alta del templado, en un corto tiempo, este punto en particular ayudara al acero a ser más manejable en su formación. Comúnmente aplicado en las industriales de alambre, y

laminas; por lo general se usan temperaturas de 550°C a 650°C, (1020°F a 1200°F). (Flores, 1996: p. 26)

1.6.5.2 Normalizado

Para este proceso el acero se debe calentar a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior, posteriormente permitir que la pieza inicie una etapa de enfriamiento a una temperatura ambiente, obteniendo así un acero con mejores propiedades de dureza y resistencia. La temperatura recomendada dependerá de la composición del acero, aproximadamente 870°C (160°F) (Flores, 1996: p. 28). En la tabla 6-1 se muestran las propiedades mecánicas (punto de cedencia (1000 lb/plg.), resistencia tensil (1000 lb/plg.), elongación % en 2plg, reducción en área % y BHN) en función de los porcentajes de carbono. En la figura 8-1 se observa la diferencia de composición que se obtiene del tratamiento térmico, por lo que, si se calienta a altas temperaturas, el carbón se dispersará y como resultado tendremos una composición semejante dentro del área. (Avner, 1988: p. 118)

Tabla 6-1. Propiedades mecánicas de aceros normalizados y recocidos

Carbono %	Punto de cedencia 1000 lb/plg.	Resistencia tensil 1000 lb/plg.	Elongación % en 2plg.	Reducción en área %	BHN
Normalizado acero laminado en caliente					
0,01	26	45	45	71	90
0,20	45	64	35	60	120
0,40	51	85	27	43	165
0,60	60	109	19	28	220
0,80	70	134	13	18	260
1,00	100	152	7	11	295
1,20	100	153	3	6	315
1,40	96	148	1	3	300
Recocido					
0,01	18	41	47	71	90
0,20	36	59	37	64	115
0,40	44	75	30	48	145
0,60	49	96	23	33	190
0,80	52	115	15	22	220
1,00	52	108	22	26	195
1,20	51	102	24	39	200

1,40	50	99	19	25	215
------	----	----	----	----	-----

Fuente: (Avner, 1988: p. 118)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

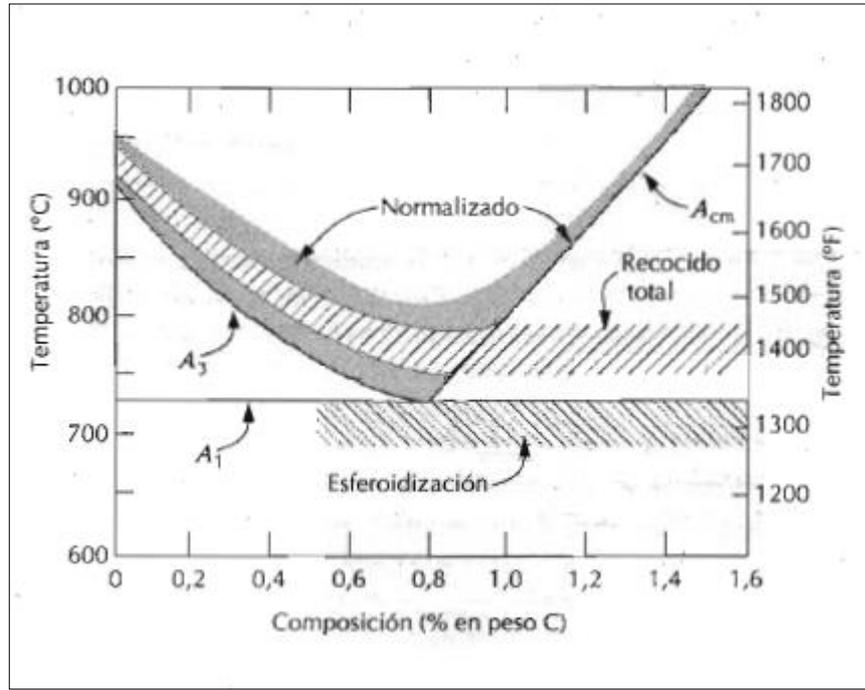


Figura 8-1. Variación de la temperatura en función de la composición del acero (% en peso C), normalizado y recocido.

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Fuente: (Callister, 2016: p. 339)

Al utilizar el proceso de variación de la temperatura en función del porcentaje del acero, se mejora la maquinabilidad, por lo tanto, la cantidad de carbono en las microestructuras es óptima. La Tabla 7-1, muestra las microestructuras optimas con diferentes contenidos de carbono

Tabla 7-1. Microestructuras optimas con diferentes contenidos de carbono.

CARBONO %	MICROESTRUCTURA OPTIMA
0,06 a 0,2	Como laminado en frio
0,2 a 0,3	De diámetro por debajo de 3pulg., normalizado; por encima de 3pulg, como laminado en frio.
0,3 a 0,4	Recocido, para la formación de perlita gruesa

0,4 a 0,6	Recocido, para la formación de perlita gruesa o esferoidita gruesa
0,6 a 1	100% esferoidita, de gruesa a fina

Fuente: (Avner, 1988: p. 259)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

1.6.5.3 Temple

Es un tratamiento térmico en el cual el acero se calienta a una temperatura elevada y posterior se realiza un enfriamiento rápido, con el objetivo de aumentar las propiedades de dureza del acero. En la figura 9-1 se observa el proceso de templado de un acero. (Perez Patiño, 1996 págs. 49-52)

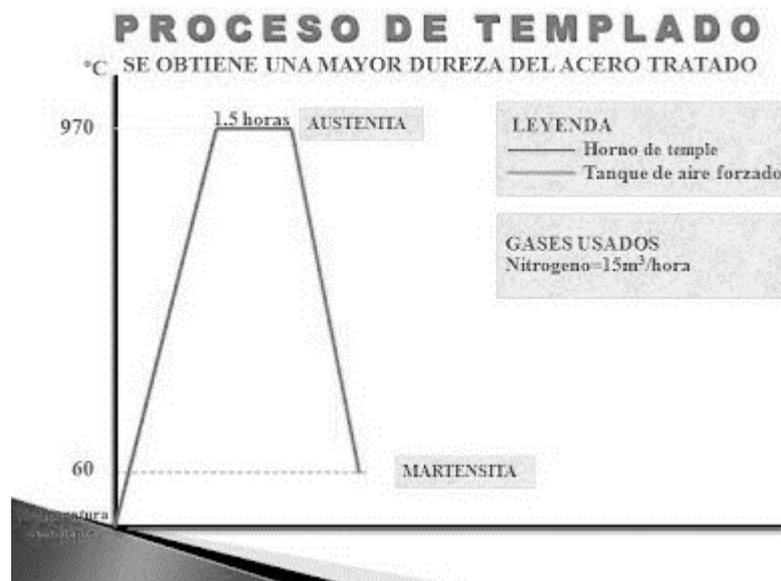


Figura 9-1. Intervalo de temperatura para el temple o endurecimiento de los aceros.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Perez, 1996: p. 50)

En el proceso de templado se deben controlar diferentes parámetros como la temperatura a fin de que no existan efectos en el acero como grietas y deformaciones, el tiempo requerido para asegurar la homogeneidad térmica y química. Se sugiere tomar en cuenta la excedencia de temperatura para evitar el crecimiento del grano y la oxidación superficial (Perez, 1996: p. 50). También, la temperatura de enfriamiento a velocidades muy altas para conseguir estructuras martensíticas. Si se consigue un correcto ajuste del temple, la transición entre la estructura austenítica a la martensítica se notará en la dureza de la zona templada.

Por consiguiente, se obtienen propiedades de dureza y resistencia muy altas no obstante las aleaciones de aluminio, que particularmente obtienen una dureza baja.

1.6.5.3.1 Factores del temple

- Composición química: La presencia de aleantes suele tener conductividad térmica menor que los aceros al carbono
- Temperatura: los aceros de alta aleación necesitan temperaturas altas, entre 1150°C y 1325°C.
- Tamaño de grano: los aceros de grano fino y austenita homogénea permiten obtener mejores propiedades y en especial, mayor tenacidad.
- Inclusiones: aceros más cuidados presentan mayores velocidades críticas de temple y los menos limpios, tienen velocidades inferiores) (Cueto, 2016: p. 17-20)

1.6.5.4 Revenido

Es un tratamiento térmico donde los principales factores significativos dentro de su composición son la dureza y la resistencia mecánica, por lo cual, al llegar a la finalidad del templeado la fragilidad de los aceros es muy alta, por su incremento en la dureza por lo tanto, el objetivo principal que consiste en realizar un revenido es proporcionar al material una disminución de la fragilidad del material como resultado se obtendrá un material con ganancia de tenacidad y por el contrario partida la disminución mínima de la dureza. (Rivas & Bohórquez, 2018: p. 45-46)

El revenido también viene a definirse como un tratamiento superficial que se realiza en continuación al procedimiento del templeado, por lo cual, este es un procedimiento particular que debe poseer el acero sometiéndose a una temperatura menos en comparación con la temperatura de austenización en el tiempo variable establecido, llegando al objetivo que disminuye la dureza y aumenta su tenacidad del acero el cual se obtiene en el templeado del material. (Sáenz & Cifuentes, 2017: p. 3-4)

En la figura 10-1 se observa la variación de la dureza entre un acero templeado y revenido por el aumento de la temperatura de revenido con respecto a la temperatura de austenización (800°C), por lo tanto se obtiene características mecánicas que se asemeja a un tratamiento isotérmico conocido como “*austempering*”, es así, que tenemos una reducción en su resistencia a la tracción y el límite elástico, aumentando al mismo tiempo la elongación, la estricción y la resiliencia del material. (Sáenz & Cifuentes, 2017: p. 2)

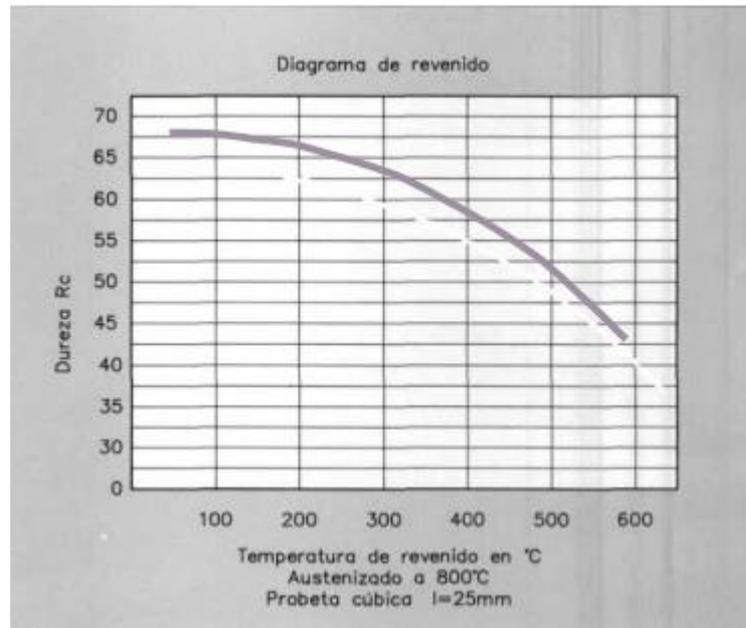


Figura 10-1. Diagrama de Revenido
 Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021
 Fuente: (Sáenz & Cifuentes, 2017: p. 2)

1.7 Corrosión

La corrosión es la alteración de la composición y la integridad física de un material sólido en medio de un ambiente corrosivo. De acuerdo, a estudios concluidos en el año 2001 por (Askeland, 2012), se presentó un informe, donde, el proceso anticorrosivo tiene un gasto anual del 8% del producto nacional bruto. De la misma manera (GDP de Gross domestic product). Solo el año de 1998 los costos que repercuten en este proceso como directos e indirectos alcanzaron una cifra aproximada de 550 mil millones de dólares.

En otra definición se describe como un proceso que consiste en el deterioro de los materiales metálicos (sin excepción), a los que incluye tanto los metales puros como también las aleaciones, y esta transformación del metal ocurre mediante reacciones químicas y electroquímicas, por otro lado, existen otros materiales como los polímeros o cerámicos a los que este proceso de corrosión se le conoce como degradación. Estos materiales se inducen con el paso del tiempo, para alcanzar su estado natural que consiste en un estado de menor potencial energético lo cual les permite normalizarse termodinámicamente con el medio ambiente circundante. (Jimenez, 2015 pág. 128)

Estos procesos son en su mayoría reacciones de oxidación – reducción que son reacciones electroquímicas, entonces a brevedad para poder llevar a cabo esta situación es necesario contar con: unos electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrolito, como medio conductor, las cuales en su mayoría son soluciones acuosas y una conexión eléctrica.

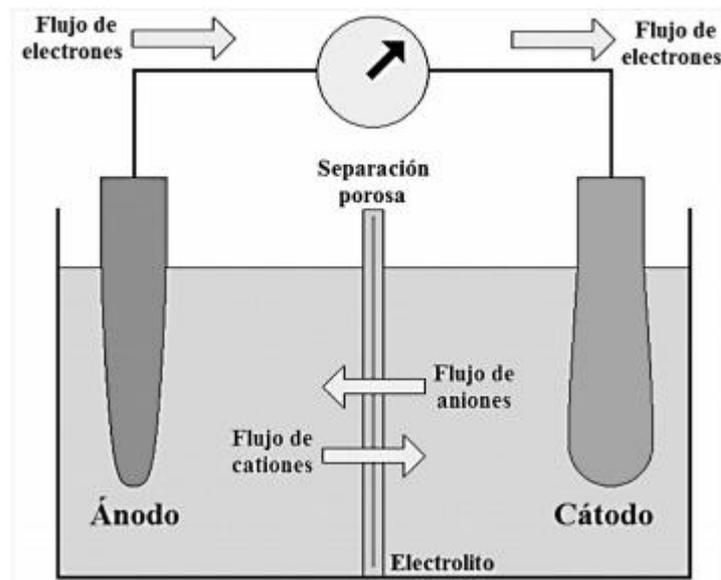


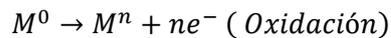
Figura 11-1. Representación de una celda electroquímica.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Jimenez, 2015: p. 129)

La figura 11-1 tiene como representación el esquema de los elementos mencionados, que su unión se conoce como una celda electroquímica, las ecuaciones que ocurren en este ejemplo son:

- En el ánodo



- En el cátodo



Las reacciones presentadas ocurren de manera similar o simultánea, como vemos en la ecuación, el ánodo cede electrones al sistema cuando reacciona aumentando su número de oxidación, donde cambia su estado metálico base a cationes los cuales se disuelven en el electrolito, en cambio los aniones metálicos absorben electrones, disminuyendo su número de oxidación, por lo que cambia a su estado base.

1.7.1 Corrosión Química

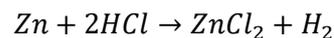
Se la conoce como corrosión directa, cuando un material entra en disolución dentro de un medio corrosivo líquido, mientras el material se encuentre en el medio este se seguirá disolviendo hasta que se consuma completamente o a su vez hasta que se sature el líquido, Askeland (2012),

menciona que otros materiales como las aleaciones a base de cobre, desarrollan una pátina verde esto sucede debido a la formación de carbonatos e hidróxido de cobre sobre el material, para este caso un ejemplo particular es la estatua de la libertad de Estados Unidos, que presenta un color verdoso. (Askeland, 2012: p. 852)

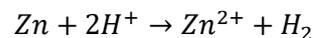
1.7.2 *Corrosión electroquímica*

Es un proceso latente que transforma el estado metálico al estado iónico, por lo que se requiere de un flujo de electricidad entre la superficie del metal a través de un electrolito donde se contiene una solución de iones, que a su vez son átomos cargados eléctricamente, ejemplo: el agua cargado con iones hidrógenos (carga positiva(H⁺)) e iones hidróxido cargado negativamente (OH⁻) en cantidades similares, por lo que el electrolito puede ser agua pura, agua salada, o soluciones acidas o alcalinas de cualquier concentración, finalmente completado el circuito se debe hacer dos electrodos un ánodo y un cátodo, quienes deben estar conectados. (Avner, 1988: p. 580)

Por lo que la mayoría de las reacciones que ocurren de son de naturaleza electroquímica, por ejemplo, si consideramos un pedazo de metal zinc dentro de un matraz que contenga ácido clorhídrico diluido, El zinc entra en proceso de corrosión al contacto con el ácido y este produce cloruro de zinc y gas hidrogeno como se indica a continuación. (Smith & Hashemi, 2006: p. 719)



También se puede escribir de una forma iónica simplificada, en la que se omite iones cloruro;



Por lo tanto, tenemos dos medias reacciones, la primera de óxido de zinc y la segunda de reducción de los iones hidrogeno, formando así gas hidrogeno.

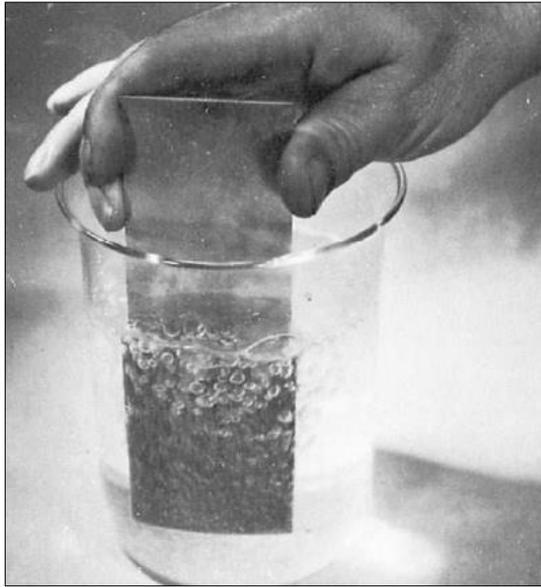
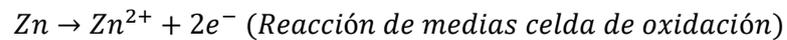


Figura 12-1. Reacción Clorhídrico con zinc para producir gas hidrogeno.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Smith & Hashemi, 2006: p. 828)



1.7.2.1 *Reacción de oxidación*

Sucede cuando los metales forman iones que son transformados en una solución acuosa circundante por lo que se llama reacción anódica, de la misma manera las regiones locales del metal en la superficie suceden la reacción de oxidación y esta recibe el nombre de ánodos locales, estos producen electrones que se sitúan en el metal y los átomos metálicos forman cationes ($\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^{-}$)

1.7.2.2 *Reacción de reducción*

Se le conoce como reducción ya que en los metales o no metales se reduce la carga de valencia, y este se le conoce como reacción catódica ya que hay consumo de electrones. Sobre las regiones superficiales del metal en el cual los iones de metálicos y los iones no metálicos pasan a la reducción en su carga de valencia se les conoce como cátodos locales.

En resumen, podemos asimilar que la corrosión electroquímica implica la reacción de oxidación que producen electrones y las reacciones de reducción que consumen los electrones producidos. Por lo tanto, estas reacciones de oxidación y reducción se realizan al mismo tiempo y a la misma velocidad total y esto para evitar la acumulación y carga eléctrica en el metal. (Smith & Hashemi, 2006: p. 721)

1.7.3 *Tipos de Corrosión*

Este se da por las diferentes condiciones ambientales de la misma manera la condición del material específicamente su naturaleza se caracteriza los distintos tipos de procesos de corrosión, las cuales, se ha revisado las más relevantes en las categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada.

1.7.3.1 *Corrosión generalizada (uniforme)*

Se le conoce como corrosión generalizada o corrosión uniforme cuando esta tiene repercusión en toda la superficie del material en una manera homogénea, llevando al deterioro del material de forma completa, cuando ocurren este tipo de corrosión provoca la mayor pérdida de materiales, pero de la misma manera es mucho más sencillo de predecir y controlarlo. En el tipo de corrosión generalizada la velocidad de repercusión es alta y se influencia por la existencia de impurezas y fases distintas en el material, estas inciden en el cambio de potencial eléctrico existente en el material, los cuales forman electrodos a pequeña escala, dando inicio al proceso de corrosión. Este tipo de corrosión lo podemos observar en materiales empleados en la industria de la construcción que son a base de hierro que no están aleados con metales inoxidable que puede ser níquel y el cromo.

1.7.3.2 *Corrosión Localizada*

La corrosión localizada a diferencia de la corrosión generalizada (uniforme) presenta una tasa más alta de riesgo potencial, por su dificultad en la detección que se presenta en lugares específicos del material, estos lugares se determinan por la naturaleza propia del material, además de la geometría que presente, como las condiciones medioambientales en la que debe trabajar o situarse, por lo tanto este tipo de corrosión se subdivide en: galvánica, por fisura, por picadura, por cavitación y microbiología. (Jimenez, 2015: p. 131)

1.7.3.3 *Corrosión galvánica*

Este proceso electroquímico ocurre en la corrosión de un metal particularmente en dos situaciones: 1) Que dos metales se encuentren en contacto donde uno de ellos es más noble; 2) Que los metales se encuentren en un medio altamente húmedo (medio electrolítico) para que los elementos se puedan corroer con mayor facilidad (Vázquez, 2018: p. 55) Esta forma corrosión se puede llegar a considerar tanto localizada como uniforme, se debe discurrir la relación del área de contacto entre los materiales ya que entre mayor sea la relación ánodo – cátodo, el proceso de corrosión tendrá una mayor velocidad. (Jimenez, 2015: p. 131) por lo tanto, los metales expuestos al ambiente desarrollaran un sistema de potencial eléctrico diferente o reducción formando así una celda galvánica.

1.7.3.4 *Corrosión por picadura*

La corrosión por picadura ocurre cuando los materiales presentan pequeños puntos en la superficie del metal, a medida que pasa el tiempo estos pequeños puntos de corrosión aumentan su tamaño y pasan a otro tipo de desgaste. La corrosión por picadura produce la acumulación de agentes oxidantes y a su vez el aumento del pH del medio, en consecuencia, se inicia un deterioro en la capa pasivada, lo que permite el proceso de la corrosión. (Jimenez, 2015: p. 132) por lo tanto es el inicio de otro tipo de corrosiones que ocupan un área mayor y producen un daño más elevado al material.

La corrosión por picadura se presenta con mayor frecuencia en los materiales como el aluminio y el acero, la mayor problemática presentada es una presencia de un pH casi neutro con presencia de aniones corrosivos, como el Cl u SO₄ que a menudo no se percibe con facilidad, este actúa de tal manera que se presenta en pequeñas proporciones y con una gran pérdida del material, produciendo el fallo del material. (López, 2019: p. 18)

1.7.3.5 *Corrosión por grieta*

Cuando se trata de este tipo de corrosión se puede asimilar a la corrosión tipo galvánica con la diferencia que este es tipo puntual donde ya se presentan cavidades o fisuras en la superficie del metal dando lugar a la aglomeración de lodo o polvo y este a su vez origina la propiciación de la corrosión. (Yancha & Troya, 2021: p. 25)

1.7.3.6 *Corrosión por fisura*

Este es uno de los tipos de corrosión en el cual en medio del proceso este se produce en zonas estrechas, donde el oxígeno es mucho menor que el sistema en general, en consecuencia, la disminución de la concentración del oxígeno en la zona actúa como ánodo dando lugar al proceso de corrosión por fisuras. (Jimenez, 2015: p. 131)

1.7.3.7 *Corrosión microbiológica*

Este en particular es uno de los tipos electroquímico, por lo que algunos microorganismos son capaces de producir corrosión en consecuencia que los metales se encuentran sumergidas, de los cuales podemos citar al hidrogeno-dependiente que utilizan el hidrogeno disuelto del líquido (agua) como parte de sus procesos metabólicos, este a su vez provoca, un diferencial de potencia de su alrededor (medio circundante), este se asocia al pitting (picado) del oxígeno o ácido sulfhídrico en el medio. (Díaz, Sánchez, & Emilio, 2014: p. 5)

1.7.4 *Corrosión por agua de mar*

El fenómeno que se presenta posee la interacción de dos organismos agua mar y metal por lo cual cada uno de ellos presentan afectados que los relacionan en el sistema, por lo tanto, las características del acero o la aleación que se pondrá en contacto con el agua de mar intervienen para la velocidad de formación de la corrosión como su avance en el tiempo formando películas corrosibles y toxicas. De la misma manera las características que presente el medio salino (agua de mar) su temperatura, salinidad, turbulencia, contenido de oxígeno, grado de contaminación, pH, y otras características que se presenten influirán en el proceso por corrosión en agua de mar. (Gardiazabal & Oneto, 2000: p. 634-638)

1.7.5 *Causas principales de la corrosión interna en las tuberías*

Existen varios factores que están implicadas en el proceso de corrosión que son: la composición del material, el medio ambiente donde se encontrara el material en su trabajo o su uso, la composición que tiene el acero y los materiales que están en contacto. Otros factores que influyen en el avance de la corrosión, es la velocidad y los mecanismos que se origine la corrosión será derivada de la composición química del fluido, que por lo general para la utilización de la tubería (agua en oleoductos y gasoductos) se tiene el agua condensada y agua en formación, y este se convierte en el principal influyente para el proceso de corrosión dentro del sistema de tuberías,

por lo tanto es necesario realizar una verificación la fase acuosa que se situara o está dentro del sistema antes de proceder a analizar otros componentes químicos. (Yancha & Troya, 2021: p. 27)

1.7.6 *Causas principales de la corrosión externa en las tuberías*

Las tuberías que se encuentran expuestas al medio ambiente están sometidas a la corrosión atmosférica este ocurre de tal manera que se asemeja a la corrosión electroquímica, teniendo en cuenta la existencia de una capa de humedad que se encuentre en la superficie del metal. La película de humedad fina normalmente contiene sustancias, también poseen O_2 disuelto esta combinación acelera el proceso de la corrosión en la superficie del acero. Esta humedad presentada es variable en función del tiempo y el espacio, sin embargo, al paso del tiempo el acero presentara irregularidades muy pequeñas sobre la superficie de la tubería y los contaminantes en forma de sólidos, estos a su vez provocaran, el proceso de generación de intersticios, donde el agua quedara estancada en forma indeleble. (Aguilar & Reina, 2014)

1.8 **Proceso de electrolisis**

Este es un proceso mediante la electroquímica a través de varias reacciones, las cuales generan un transferencia de electrones entre las diversas sustancias que se encuentran dentro del sistema químico, por tanto al ser un proceso de oxidación y reducción , el principal elemento de importancia que se presenta es el electrón que tiene las siguientes características: carga negativa, baja masa; por tanto el primero elemento cederá el electrón que al finalizar el proceso quedara cargado positivamente y con igual masa, por otro lado el segundo elemento (receptor), quedara cargada positivamente capturando la carga. (Arroba & León, 2020: p. 45)

Esto se realiza por la llamada conducción electrolítica donde los iones se transfieren con libertad en medio de la disolución acuosa, por lo que, si se conecta el conductímetro a una corriente, uno de ellos será positivo (ánodo) y el otro negativo (cátodo), la atracción de iones positivos por parte del cátodo y la atracción de iones negativos por parte del ánodo genera un movimiento en los electrones en la solución genera una corriente eléctrica. (Regalado, 2016: p. 42)

1.8.1 *Leyes de Faraday que determinan la tasa de corrosión*

1.8.1.1 *Principio de la ley*

La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrolisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a ese electrodo, como se indica en la ecuación 1.

$$M=K*Q \quad (1)$$

1.8.1.2 Primera ley de Faraday

Establece que para una solución electrolítica dada la cantidad de material depositado o liberado sobre los electrodos es directamente proporcional a la cantidad total de electricidad que pasa a través de la solución y se calcula mediante la ecuación 2.

$$m \propto It \text{ ó } m = Zit \quad (2)$$

Donde:

$I = corriente$

(A) amperios

$t = tiempo (s)$

$m = masa del producto primario (g)$

$Z = constante de proporcionalidad (equivalente electroquímico),$

esto es la masa de la sustancia liberada por 1 amperio segundo de una corriente (1 coulombio)

1.8.1.3 Segunda ley de Faraday

Establece, según las ecuaciones 3 & 4 que si por distintas celdas electrolíticas que contiene diferentes electrolitos se hace pasar la misma cantidad de electricidad en los electrodos se depositan cantidades de sustancia en proporción directa al peso equivalente del elemento químico.

$$m_1 \propto \frac{M_1}{n_1} \propto Z_1 \quad (3)$$

$$m_2 \propto \frac{M_2}{n_2} \propto Z_2 \quad (4)$$

Donde:

$m_1, m_2 =$ masas del producto primario (g)

$M_1, M_2 =$ masa molar ($g * mol^{-1}$)

$n_1, n_2 =$ número de electrones

$Z_1, Z_2 =$ equivalencia electroquímica

(Ahmad, 2006 pág. 58)

En combinación de la ecuación 3&4 obtenemos la ecuación 5:

$$m = \frac{I * T * M}{n * F} \quad (5)$$

Donde:

$m =$ cantidad de metal que se ha corroído o depositado (g)

$I =$ corriente (A)

$t =$ tiempo que dura el proceso (s)

$M =$ masa atómica del metal $\left(\frac{g}{mol}\right)$

$n =$ valencia del metal

$F =$ constante de Faraday = 96500 $\left(\frac{A * s}{mol}\right)$

(Rodríguez, 2008 pág. 34)

1.9 Aplicación de la primera ley y segunda ley de Faraday – Tasa de corrosión

Al proporcionar las leyes establecidas por Faraday, este nos describe la electrólisis que origina el proceso electroquímico, por lo tanto, de una manera inversamente proporcional se la representa como la pérdida de masa en función del tiempo ($\delta * \gamma^{-1}$ o $kg * s^{-1}$) (Yancha, y otros, 2021)

La ecuación 6 que se presenta a continuación se relaciona la pérdida de peso del metal frente al tiempo; por lo tanto, tenemos:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{MI}{nF} \quad (6)$$

Donde:

$w =$ tasa de corrosión [mm ; mpy ; $mg * dm^2 * dia^{-1}$]

$M =$ Masa molar [$g * mol^{-1}$]

$n =$ numero de electrones

$A =$ área de exposicion [mm^2 ; in^2]

$t =$ tiempo [año: dia: seg]

$F =$ constante de Faraday $\left[\frac{96500 C}{eq} \right]$

(Yancha, y otros, 2021)

1.10 Evaluación de la corrosión por técnicas electroquímicas.

Podemos observar el avance de la corrosión mediante técnicas electroquímicas, clasificando en corrosión uniforme o la corrosión localizada la cual se evalúa a través de curvas de polarización lineal y potencio dinámicas, y por espectroscopia de impedancia electroquímica.

1.10.1 Curvas de polarización lineal

Es un método no destructivo para evaluar la corrosión en el material, lo cual permite establecer la velocidad de corrosión, que al seguir el procedimiento llegara a una fase determinada como “estacionario” a partir de valores de resistencia a la polarización.

Cabe presentar que las medidas de polarización lineal presentan limitaciones de medir únicamente la corrosión general mientras que la corrosión localizada no puede ser medido o determinado, o a su vez no puede presentar el tipo de cinética que controla el proceso, este método se utiliza en su mayoría de ocasiones para monitorear la corrosión en un tiempo largo. (Silanes, Salazar, & Vega, 2019: p. 10)

Para poder realizar el método de polarización lineal se basa en la teoría del potencial mixto según Corte & Peña (2019) por lo que las curvas de polarización se pueden obtener a partir de la siguiente ecuación 7. (Corte & Peña, 2019)

$$i_{app,c} = i_c - i_a \quad (7)$$

Donde:

i_c : densidad de corriente para la reacción de reducción catódica

i_a : densidad de corriente para la reacción de oxidación anódica

$i_{app,c}$: densidad de corriente catódica aplicada

Las cuales todas deben estar aplicadas al mismo potencial que es E ; y de la misma manera tenemos la densidad de corriente aplicada, a través de la ecuación 8:

$$i_{app,a} = i_a - i_c \quad (8)$$

En el grafico 13-1 se puede observar la simulación de la variación del voltaje que forma la linealidad vista el cual se encuentra cercano al origen, la linealidad se encuentra en función de las constantes de Tafel que se haya seleccionado.

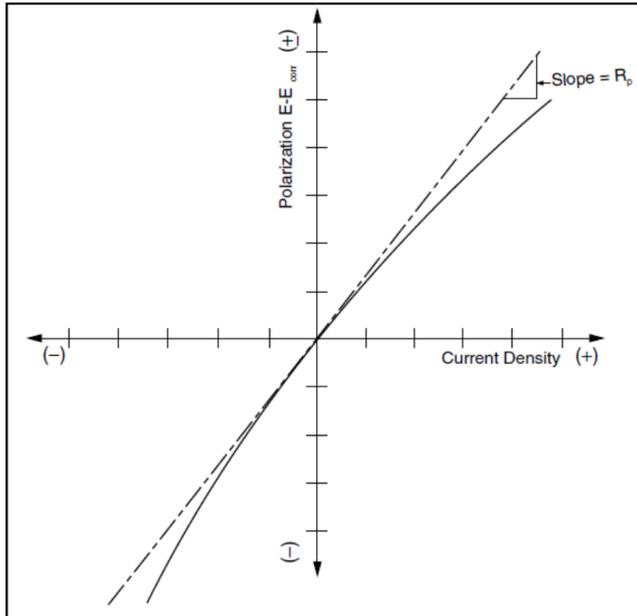


Figura 13-1. Gráfico hipotético de resistencia a la polarización

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Fuente: (Corte & Peña, 2019)

El gráfico hipotético que describe la supuesta linealidad no existe en la realidad, aun así, no presenta errores en la técnica aplicada y su aproximación es lo bastante correcta.

A continuación, se presenta la polarización del potencial de corrosión E_{corr} en las cuales se aplicaron las densidades de corriente anódica y catódica $i_a - i_c$, según las ecuaciones 9 y 10.

$$\varepsilon_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_{corr}} \quad (9)$$

Y

$$\varepsilon_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_{corr}} \quad (10)$$

Donde:

ε_c y ε_a : corresponden a los sobrepotenciales

β_c y β_a : cada uno pertenece a las constantes de Tafel catódica y anódica

i_{corr} : densidad de corrosión

Los cambios estables que se presentan en ε_c y ε_a corresponden al potencial de corrosión E_{corr} .

En el origen del gráfico de la curva tenemos la pendiente $(\frac{d\varepsilon}{di_{app}})_{\varepsilon \rightarrow 0}$, el cual corresponde a la resistencia a la polarización R_p , lo cual es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión. (Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua a 3,5% de cloruro de Sodio, 2019)

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \quad (11)$$

Entre las pendientes de Tafel se presenta una relación en función de la constante B (ecuación 11) lo identifica como paso de la proporcionalidad a la igualdad.

Velocidad de corrosión

Para la calcular la velocidad de corrosión contamos con la ecuación 12, como se indica a continuación:

$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{PE}{D} \times i_{corr} \quad (12)$$

Donde:

V_{corr} : Velocidad de corrosión (mpy)

PE: Peso equivalente

D: Densidad (g/cm^3)

I_{corr} : Densidad de corrosión (A/cm^2)

Peso equivalente de la aleación

En la siguiente ecuación 13 se puede encontrar el peso equivalente de una aleación, donde se separa las unidades de masa de la aleación para determinar el número equivalente N_{EQ}^{-1}

$$N_{EQ}^{-1} = \sum \left(\frac{f_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right) \quad (13)$$

Donde:

Fi: Fracción de masa (g)

Ni: Intercambio de electrones

Ai: Peso atómico (g)

1.10.2 *Curvas potencia dinámicas: ajuste por Tafel*

Esta técnica tiene su utilidad en la determinación de la velocidad de corrosión y determinar el proceso de corrosión ya sea anódica o catódica controla el sistema; por otro lado, para las superficies de los materiales pasivos, bajo este método podremos determinar el potencial de pasivación, también el potencial de re-pasivación y el rango de potencial de la zona pasiva. De estos términos podemos conocer cómo se relaciona la protección de una película pasiva a un metal inmerso a la corrosión y obtener la caracterización del comportamiento de esta.

1.10.3 *Espectroscopía de impedancia electroquímica*

Este en cambio difiere de los métodos antes mencionados por la utilización de corriente alterna en lugar de utilizar la corriente continua, el cual produce la perturbación dentro del sistema, por lo que la ventaja que presenta es la ayuda de medir uno o varios procedimientos que ocurren en el mismo material en función del tiempo como constante en cada uno de ellos, llegando a obtener valores como la resistencia al recubrimiento, por lo tanto, este llega a ser una técnica ideal para la evaluación de recubrimientos protectores, presentando una mayor información que se obtiene a diferencia de utilizar corriente continua, otra de las mayores ventajas que demuestra es permitir monitorear la degradación que ocurre en función del tiempo donde se ha aplicado una pequeña perturbación como un método no destructivo.

1.10.4 *Ruido electroquímico*

Para poder evaluar la corrosión localizada esta técnica es la más confiable, ya que se monitorea el potencial dentro del circuito acierto como también su densidad de corriente conforme al avance del tiempo. Donde al evaluar los resultados se debe utilizar herramientas matemáticas como las características fractal de la señal o transformación de los registros de tiempo en frecuencia, donde se aplica el modelo matemático de Fourier. (Silanes, Salazar & Vega, 2019: p. 11)

1.11 Técnicas de caracterización de materiales

La caracterización se define como la determinación de los atributos particulares de algún objeto o alguien para poder distinguir de otros semejantes, por lo tanto, se utilizarán varias técnicas como: la espectrometría de emisión óptica (OES), microscopia, dureza Brinell y micro dureza Vickers. (Yancha & Troya, 2021: p. 35), esto nos permitirá poseer detalles necesarios para identificar cambios o estructuras necesarios para el estudio.

1.11.1 *Espectrometría de emisión óptica*

Se presenta como una herramienta para poder detectar espectros longitudinales que son de ondas específicas que emiten radiación electromagnética de forma técnica la concentración de isótopos en una en solución.

De otro concepto podemos describir a la espectrometría como la técnica que tiene como objetivo cuantificar los elementos presentes en un material (metálico) que puede ser el acero, de la misma manera aleaciones ferrosas o no ferrosas, este procedimiento se lleva a cabo generando un arco que genera la cantidad de energía necesaria para pulverizar la muestra en función que este a su vez produzca iones que tengan características eléctricamente excitadas, el cual comprende en el espectro visible (130 – 800nm). (Yancha & Troya, 2021: p. 35)

1.11.2 *Microscopía*

Permite estudiar las particularidades de un metal o de una aleación bajo las escalas microscópicas. En dicho proceso lo que se busca es establecer el tamaño de grano, distribuciones de sus fases, la forma, las inclusiones que permiten verificar la influencia que tiene sobre las propiedades mecánicas del material. (Yancha & Troya, 2021: p. 36) Es necesario recomendar la limpieza y cuidado de las muestras al momento de llevar a cabo el proceso debemos poseer productos a ser evaluados, sin ningún elemento que desfavorezca a la visualización de los objetos en el material.

1.11.3 *Dureza*

Es la resistencia que presentan las superficies de los materiales al ser rayados o penetrados bajo una fuerza estática ejercida por un objeto que no sufre deformaciones por lo tanto el cuerpo opone una menor o mayor resistencia que bien se puede comparar con respecto a otro material. En mecánica es una de las propiedades de mayor importancia ya que determina la resistencia del

material en función a la tracción, del desgaste que puede presentar y el mecanizado. Al generalizar los métodos podemos obtener la dureza de los materiales como consecuencia de la resistencia a la penetración de otros materiales bajo condiciones determinadas. Esta manera de medir la dureza se ha empleado en las conocidas como dureza Rockwell, Brinell y Vickers. (Castrillón & Torres, 2017: p. 9-18)

1.11.3.1 *Dureza Brinell*

Este procedimiento se basa en la propuesta metodológica del profesor sueco J. A. Brinell que consiste en determinar la dureza de los metales, al aplicar la técnica de la compresión progresiva sobre una superficie el cual tenga las características de ser plana y lisa de la probeta o material a ensayar, donde se aplique una presión por un determinado tiempo, en el cual se produzca una impresión en una forma de agujero. Este se mide por un microscopio del casquete esférico.

Para determinar la dureza Brinell de la medida obtenida por el microscopio se divide al valor de la carga que ha actuado sobre la impresión en el material, el resultado se compara con las tablas proporcionadas que van desde los 2mm hasta los 6mm. (Santos et al, 2001, p. 74)

Se obtiene el número de dureza Brinell a partir del ensayo de acuerdo con la ecuación 14:

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (14)$$

Donde:

D = *diámetro esférico (penetrador)*

d = *diámetro de la huella*

F = *carga aplicada en kgf.*

Se expresa a la dureza Brinell mediante el símbolo HBW que precede del valor numérico obtenido en el ensayo, seguida del valor que corresponde a la medida de la bola en mm y la carga aplicada en kgf. Por ejemplo: 128 HBW 2,5/63,5. (GORDO, y otros, 2012)

1.11.3.2 *Dureza Vickers*

Se trata de un ensayo que se utiliza para la determinación de la dureza de un material en comparación de la resistencia a la indentación que esté presente; la dureza de Vickers (HV) es la determinación de una huella en la superficie. En la manera como se desarrolla el procedimiento se utiliza un penetrado de diamante en forma piramidal con base cuadrada, la penetración de esta se lo realiza de manera perpendicular a la superficie del material a medir, esto sucede bajo la acción de una carga P a un ángulo de 136°. La carga aplicada se mantiene por determinado tiempo, al retirar la carga se mide la diagonal de la impresión sobre la superficie, finalmente por medio de tablas con datos expresados en Kgf (Kilogramo Fuerza) se puede llegar a obtener el valor como lo indica en la ecuación 15:

$$HV = 0,102 \frac{2F \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (15)$$

Donde:

F: carga en Newtons

d: medida de la huella en mm

Se representa su valor como HV, precedido del valor numérico de dureza, seguido del valor numérico de la carga aplicada en el ensayo, por ejemplo, 74 HV30. (GORDO, y otros, 2012)

En comparación la dureza Brinell este método permite la evaluación de todos los materiales metálicos sin que se tome en cuenta el estado en el que se pueda encontrar y su espesor. (Santos et al, 2001: p. 76)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo y nivel de investigación

El trabajo presenta varios aspectos de la investigación el cual llega a ser de tipo: Investigativo, donde se realizará una comparación de la resistencia a la corrosión del acero API 5L X42 bajo dos ambientes electrolíticos diferentes, en términos de la tasa de corrosión y propiedades mecánicas.

Para este trabajo se ha considerado el grado de profundidad como el alcance, dándonos como resultado que sea aprehensivo por la comparación y análisis que se debe realizar a los datos obtenidos del desgaste por corrosión que sufran las probetas durante el procedimiento, cabe resaltar que los resultados aportaran de manera significativa a toda la industria metalúrgica.

2.2 Descripción de la investigación

El tipo de acero API 5L X42 se lo utiliza mayormente en empresas industriales para el transporte de petróleo y gas, por su efectividad en las propiedades mecánicas y químicas que cumplen con el trabajo requerido en la industria. Al someter el acero a distintos tipos de condiciones ambientales en la capa exterior y el flujo que transita por la parte interior de la tubería, es necesario identificar nuevas alternativas que ayuden a mejorar su propiedades mecánicas - químicas y alarguen la vida útil del acero, por lo tanto, este proceso de investigación tendrá como parte central la aplicación de los tratamientos térmicos y su evaluación frente a los dos ambientes electrolíticos que son KCl (Cloruro de potasio) y agua de mar, logrando obtener resultados que eviten la corrosión en la tubería y acrecienten la resistencia de la misma.

2.2.1 Metodología

En la figura 1-2 se presenta un resumen de la metodología planteada para el desarrollo del tratado investigativo. Se ha dividido en varias secciones que nos llevarán a la obtención de resultados y conclusiones.

Es importante mencionar que sin una investigación bibliográfica no se puede obtener las bases sólidas que sustenten la tesis, por lo tanto, para realizar este trabajo de investigación se tomó en cuenta los resultados obtenidos de la tesis y artículo científico respectivamente de los siguientes autores: (Yancha, y otros, 2021) y (Villavicencio et al, 2020) .

Dentro de la metodología desde el título 2 hasta el final se realiza un recorrido del cómo se ha llevado a cabo cada ítem, de los cuales se obtienen subtítulos que hacen referencia a una información más detallada del proceso específico para cada acción.

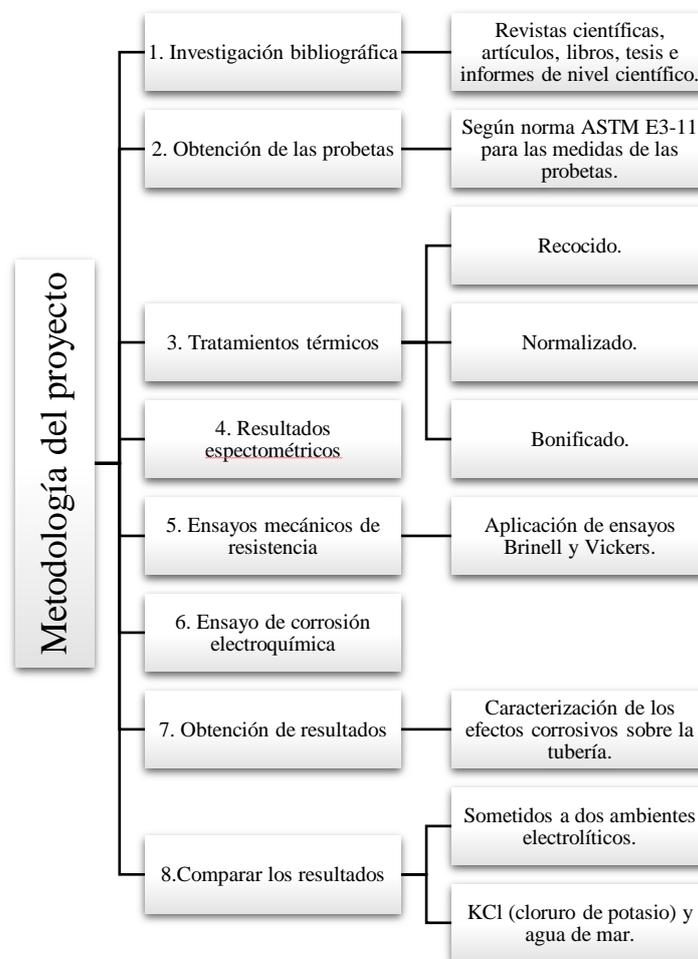


Figura 1-2: Diagrama de metodología del proyecto
Realizado por: Ilbis P. Alex Vinicio, 2021

2.2.2 *Descripción de la metodología*

En el progreso del presente trabajo investigativo se realizará la revisión bibliográfica de los temas más relevantes que conformarán la base teórica para la realización de este trabajo, por lo tanto, los artículos científicos, libros, tesis y entre otros sostendrán correctamente el desarrollo del problema que se plantea.

Los temas de investigación básica serán los siguientes:

- Fundamentos de la ciencia e ingeniería de Materiales
- El acero y sus principales aplicaciones en la ingeniería
- Aceros al carbono y diagrama de fase
- Tratamientos térmicos para los aceros
- Principios de la corrosión en la ingeniería metalúrgica
- Tesis efectos de los carbonatos y bicarbonatos
- Caracterización metalográfica del acero

De acuerdo a la tesis por los autores (Yancha, y otros, 2021) sobre el tema “Efectos del carbonato y bicarbonato en la resistencia a la corrosión en aceros API 5L X42 con tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado”, conjuntamente con el artículo científico (Villavicencio, y otros, 2020) publicado con el título “The role of heat treatments, non-metallic inclusions, and microstructure on the corrosion resistance of an API 5L X42 steel.” nos permite obtener datos, información y resultados notables para realizar la comparación con los datos obtenidos del acero API 5L X42 que ha sido sometido al ambiente de agua de mar en la tesis antes mencionada con la misma probeta sometido al ambiente cloruro de potasio (KCl), al finalizar el análisis de cada uno de los resultados obtenidos como también las conclusiones a las que los autores han llegado podemos identificar por comparación simple la diferencia que presentan cada una de las probetas. Cada uno de los procedimientos de la figura 1-2 se detallará en este capítulo en cambio los nuevos resultados e información que se han con las probetas API 5L X42 y su comparación, se menciona en el apartado del capítulo 3.

Finalmente, en el presente proyecto que comparará los resultados obtenidos del acero sometido a los ambientes corrosivos (Agua de mar y Cloruro de potasio (KCl)), proporcionará las mejores características mecánicas y químicas ante la corrosión.

2.3 Población y muestra

Se realiza un diseño experimental de varianza unifactorial, lo que quiere decir, que al tener como una única variable independiente el proceso de cambio de dureza se dará en consecuencia de los tratamientos térmicos aplicados en las probetas, de esta manera podremos determinar el tamaño de la muestra requerida para el análisis.

Tabla. 1-2: Promedio de dureza aplicada en cada tratamiento térmico

%	μ
Recocido	130
Normalizado	147
Bonificado	158

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

$$\sum_{i=1}^3 \mu = 435$$

$$\bar{\mu} = \frac{435}{3} = 145$$

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

$$\tau_2 = (\mu - \bar{\mu}) = 147 - 145 = 2$$

$$\tau_3 = (\mu - \bar{\mu}) = 158 - 145 = 13$$

$$\sum_{i=1}^3 \tau^2 = 398$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \tau^2}{n - 1}} \quad (16)$$

$$s = 14,28$$

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_i \tau^2}{\alpha s^2} \quad (17)$$

n = número de probetas

a=3

a=Ni tratamientos térmicos.

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

$$\Phi^2 = \frac{n \times 398}{3 \times 14,286^2} = 2,67n$$

Tabla. 2-2: Procedimiento según los grados de libertad de la muestra

n	Φ^2	Φ	a(n-1)	β	Potencia (1- β)
2	5,34	1,88	2 -		
3	8,01	2,74	4 -		
4	10,68	3,55	6	0,068	0,903

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Para la localización del valor de la potencia es necesario el valor de la probabilidad de aceptar la hipótesis β , el cual podemos encontrar mediante una línea vertical con el dato Φ y la horizontal, que se encuentra en las curvas con un error de $\alpha = 0,01$; estos nos darán un resultado del valor β .

Debemos tomar en cuenta los grados de libertad para poder escoger el valor en la figura 2-2.

Grados de Libertad:

$$V_1 = \text{Grados de libertad } V_1 = (n - 1) = (4 - 1) = 3 \quad (18)$$

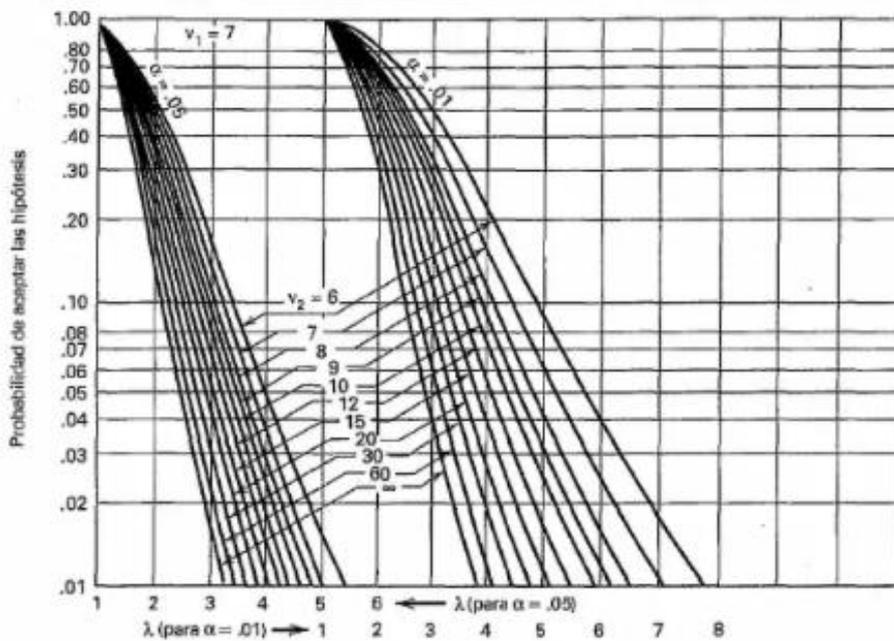


Gráfico 1-2: Curvas para la evaluación del análisis de varianza
Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021
Fuente: (Montgomery, 2004: p. 654)

Con lo cual, podremos determinar el número de probetas para la realización de las técnicas de caracterización, por lo que concluimos que son (4), que serán divididas como, ensayo a la corrosión y resistencia a la indentación los cuales de este último son ensayos de dureza Brinell y Vickers, esto aplica para ambos casos o ambientes electrolíticos que serán sometidos.

- 1 ensayo de dureza Brinell
- 1 dureza Vickers
- 2 ensayo de corrosión

2.4 Materiales

En la tabla 3-2 se detalla la información de los productos químicos, necesarios que se utilizaron para elaborar las reacciones químicas durante los ensayos de corrosión, en la cual se encuentra el nombre del producto químico, el grafico referencial y las características fisicoquímicas como su composición, densidad, concentración, masa molar, etc; que se detallan a continuación:

Tabla. 3-2: Reactivos y compuestos químicos

N.	Descripción	Gráfico referencial	Características físico-químicas
1	Fluoruro de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: NaF • Densidad: 2,56 g/cm³ • Concentración: 0,003 g/l • Masa Molar: 41,9881 g/mol
2	Cloruro de Estroncio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: SrSi2 • Densidad: 3,05 g/cm³ • Concentración: 0,025 g/l • Masa Molar: 157,84 g/mol
3	Bromuro de Potasio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: KBr • Densidad: 2,74 g/cm³ • Concentración: 0,101 g/l • Masa Molar: 119,002 g/mol
4	Bicarbonato de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: NaHCO₃ • Densidad: 2,173 g/cm³ • Concentración: 0,201 g/l • Masa Molar: 84,01 g/mol

5	Cloruro de Potasio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: KCl • Densidad: 1,987 g/cm³ • Concentración: 0,695 g/l • Masa Molar: 74,55 g/mol
6	Cloruro de Calcio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: CaCl₂ • Densidad: 2,15 g/cm³ • Concentración: 1,16 g/l • Masa Molar: 110,99 g/mol
7	Hidróxido de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: NaOH • Densidad: 2,1 g/cm³ • Masa Molar: 39,997 g/mol • Pureza: 99,7%
8	Cloruro de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: NaCl • Densidad: 2,16 g/cm³ • Concentración: 24,53 g/l • Masa Molar: 58,443 g/mol
9	Cloruro de Magnesio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: MgCl₂ • Densidad: 2,32 g/cm³ • Concentración: 5,2 g/l • Masa Molar: 95,211 g/mol
10	Sulfato de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: Na₂SO₄ • Densidad: 2,664 g/cm³ • Concentración: 4,09 g/l • Masa Molar: 142,04 g/mol

11	Ácido Bórico		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: H_3BO_3 • Densidad: $1,435 \text{ g/cm}^3$ • Concentración: $0,027 \text{ g/l}$ • Masa Molar: $61,83 \text{ g/mol}$
12	Alúmina		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: Al_2O_3 • Densidad: $3,961 \text{ g/cm}^3$ • Masa Molar: $101,96 \text{ g/mol}$
13	Agua Destilada		<ul style="list-style-type: none"> • Composición: H_2O • Densidad: 1 g/cm^3 • Masa Molar: $18,015 \text{ g/mol}$

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

La tabla 4-2 describe los equipos utilizados para el análisis del proceso de corrosión en las probetas acero API 5L X42. Con los equipos Microscopio electrónico de barrido (SEM), Microscopio Óptico, Espectómetro de argón, se obtuvieron imágenes para analizar su

composición de porcentaje de elementos químicos que forman las probetas, de la misma manera la visualización de microestructural en la superficie de las probetas (Revisar capítulo III).

En la tabla antes mencionada se hace referencia principal al nombre del equipo, al gráfico referencial y sus características como ficha técnica.

Tabla. 4-2: Equipos para el análisis del proceso y desarrollo del ensayo corrosivo

N.	Descripción	Gráfico de referencia	Características
1	Microscopio electrónico de barrido (SEM)		<ul style="list-style-type: none"> • Resolución: 3nm-(30kv), 4nm(20kv), 8nm(3kv), 15nm(1kv) • Aumento: x5 a x300,000 • Modelo: JSM - IT100 • Marca del Equipo: Jeol-SEM
2	Microscopio Óptico		<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: Eclipse-E200 • Marca del Equipo: Nikon • Iluminación: Tipo Led
3	Espectrómetro de argón		<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: Q2-ION • Marca: Bruker • Consumo (Ar): 2,5 L/min • Frecuencia (Hz): 50-1000 • Cobertura: 170 - 685 nm
4	Banco de pulido		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: S/N • Modelo: S/N • Numero de platos: 1 • Velocidad rotación: 150/300 rpm

5	Banco de lijado		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: S/N • Capacidad: 2 superficies abrasivas • Tipo: Banco manual
6	Potenciostato/Galvanostato		<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: Autolab PGSTAT204 • Marca: Metrohm Autolab • Rango potencial: +10V • Rango (i): 100mA-10nA • Corriente máx.: +400 mA
7	Balanza analítica		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: OHAUS • Precisión: 0,0001 g • Capacidad máxima: 220 g
8	Celda de corrosión		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Metrohm Autolab • Capacidad: 1 l • Tipo de probeta: Circular • Área expuesta: 1cm²
9	Agitador magnético		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: SONICA Swep System • Modelo: 500 WATT MODEL • Rango de Temp.: 5-40 °C • Humedad Relativa Rh: 20-90%

10 pH metro		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Oakton • Modelo: pH 700 • Rango pH: -2 -16
-------------	--	---

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

La tabla 5-2 detalla los instrumentos de laboratorio que han sido utilizado en las diferentes experimentaciones como complementos para determinar la tasa de corrosión en la superficie de la probeta, los compuestos químicos que forman al cero API 5L X42.

Tabla. 5-2: Descripción de los instrumentos del laboratorio

N.	Descripción
1	Vidrio reloj
2	Termómetro
3	Piceta
4	Dummy Cell 2.0
5	Vaso de precipitación (50 & 100 ml)
6	Papel abrasivo
7	Contraelectrodos (Acero Inox)
8	Electrodo referencial Ag & AgCl
9	Espátula
10	Balón aforo 1000 ml

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

2.5 Procesos de Tratamientos térmicos

Se realizaron diferentes tratamientos térmicos al acero (recocido, normalizado y bonificado) con el fin de aumentar la dureza, la elasticidad y la resistencia del acero. Se variaron parámetros como la temperatura, presión, velocidad y tiempo, para mejorar las propiedades mecánicas del material.

El procedimiento consta de fases específicas para su ejecución:

1. A 400°C realizar la acción de precalentado del horno
2. Calentamiento del horno a la temperatura fijada
3. Duración conforme al tratamiento térmico
4. Acción del enfriamiento, (puede ser bajo diferentes procesos, dependiendo el caso).

2.5.1 Recocido

Bajo este procedimiento se logra obtener ferrita más perlita, el cual se lleva bajo los siguientes pasos:

1. Las probetas calentar a una mayor temperatura A3 (913-727 °C)
2. Fase de enfriamiento donde se realiza de una manera lenta dentro del horno, hasta el siguiente día.
3. Retirar las probetas y realizar una limpieza superficial retirando el carbono.

2.5.2 Normalizado

Este procedimiento se lleva a cabo con el fin de que las piezas puedan eliminar las tensiones que se sitúan en las microestructuras obteniendo ferrita y perlita más fina, por lo tanto, se aplica los siguientes pasos:

1. Las probetas se deben calentar a una temperatura mayor que la A3 (913-727°C), la temperatura superior.
2. El tiempo con el que permanecerá es de una hora, con la temperatura constante. La temperatura será mayor que la crítica A3.
3. Remover del horno las muestras para la fase de enfriamiento que se debe realizar al aire libre por un día.

2.5.3 Bonificado

Este tratamiento térmico nos ayudara a conseguir una gran resistencia y tenacidad para el acero, por lo que las piezas fueron sometidas a un temple y revenido que cumple con las siguientes especificaciones técnicas del proceso.

1. Calentar las probetas a una temperatura mayor que la temperatura crítica A3 (913-727 °C).
2. Dentro del horno debe permanecer durante un tiempo de dos horas (2h), con la temperatura superior a la A3.
3. Extraer las piezas del horno y sumergirlas en agua (temperatura del agua 25°C), durante la fase de enfriamiento.

2.6 Preparación de las soluciones

2.6.1 Elaboración de agua de mar sintética

Bajo las investigaciones realizadas en el año 2008 en Akita y Niigata ciudades pertenecientes a Japón, se resuelve que las condiciones que deben tener los campos petrolíferos correspondientes al agua de campo con los siguientes iones:

Tabla. 6-2: Parámetros y composición deriva del líquido (agua) del campo petrolífero

Parámetro	Agua de mar [SW]	Sulfato - Agua Salada [SO4]	Agua Salada [Cl]
Cl ⁻ [mg/L]	256060		25600
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	2640		2640
Mg ²⁺ [mg/L]	1280		0
Ca ²⁺ [mg/L]	420		0
K ⁺ [mg/L]	420		0

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Teniendo como base las investigaciones realizadas por su similitud de acuerdo al proceso de corrosión, se debe objetivamente encontrar el compuesto ideal, por lo tanto, la tabla 2-4 que se indicó contiene los iones que señalan como los precursores del proceso de corrosión, es así como se opta por el agua de mar, de tal manera que su preparación sigue las normas e instrucciones establecidos por las normas estandarizadas de ASTM D1141-98.

Para una mejor comprensión de los componentes que constituyen el agua de mar sintético, se formuló en la siguiente tabla.

Tabla. 7-2: Componentes del agua del mar sintético (g/L)

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: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Se realiza los siguientes pasos para la preparación del agua de mar sustitutiva.

- Colocar en la balanza analítica cada compuesto para que sea pesado.
- En 100 ml de agua destilada añadir los componentes químicos descritos en la tabla 7.2.
- Homogenizar la solución después de la colocación de todos los componentes químicos
- Con agua destilada aforar en un litro de solución
- Homogenizar la solución
- Esperar la solución mientras reposa por 24 horas, terminando el tiempo volver a homogenizar.

2.6.2 *Elaboración de una solución de neutralización*

Se tiene presente que los valores del pH en las evaluaciones in situ deben corresponder a rangos de $4 < \text{pH} < 6$ dentro de los pozos petroleros, esto para que pueda existir una variación en el comportamiento de la corrosión en el acero específicamente a su tasa de corrosión, tal que se cumpla el proceso de la manera más similar, por tanto, se debe adicionar NaOH a 0,1 N (Hidróxido de Sodio) a la solución para que se pueda ajustar el pH dentro de la solución del agua

de mar sustitutiva. Bajo la ecuación ___ se constituye los requerimientos en gramos para la preparación. (Yancha, y otros, 2021)

$$N = \frac{eq}{L_{Solución}} \rightarrow N = \frac{\text{moles de NaOH}}{L_{Solución}} \rightarrow 0,1 = \frac{\text{moles de NaOH}}{1L_{Solución}} \quad (19)$$

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

Donde:

N: normalidad de solución

eq: *N*. de moles equivalentes (NaOH)

Una vez que se tiene el valor en gramos del hidróxido de Sodio (NaOH) se debe:

1. Pesar 3,999 g de NaOH (Hidróxido de Sodio) en una balanza analítica.
2. En 50 ml de agua destilada, colocar el compuesto NaOH y disolver con la ayuda de un agitador magnético
3. Traspasar la solución de 50ml, NaOH a un balón aforado con capacidad de 1000 ml.
4. Finalmente, hasta 1000ml, aforar.

2.7 Caracterización de los aceros API 5L X42

Para este procedimiento en el acero API 5L X42, se realizan dos técnicas de caracterización a las muestras, las cuales son: metalográfica y determinación de dureza a través de la indentación, por lo tanto, estas etapas se lo realizarán a probetas a las que se les ha aplicado tratamientos térmicos como recocido, normalizado, bonificado, además a las muestras en su estado de suministro.

En el proceso se verificará su microestructura y las inclusiones que puedan afectar a los estudios de corrosión durante el proceso a desarrollarse.

La segunda etapa de la caracterización se realizará por la técnica de indentación. Las probetas son sometidas a ensayos de dureza, donde se identificará las características mecánicas que presentan los materiales simulando un ambiente de trabajo real.

2.7.1 *Análisis metalográfico de los aceros API 5L X42*

Para realizar el análisis metalográfico, las probetas deben cumplir ciertos parámetros según la norma ASTM E3-11, las cuales son: 3mm de espesor y un diámetro de 14,4 mm esto se puede obtener a través de la técnica del rectificado que se le puede dar a las probetas.

A continuación, cuando las probetas tengan las características requeridas se procede al procedimiento de desbaste en los bancos manuales de lijas; los papeles abrasivos utilizados deben ser de las siguientes series: 240, 320, 400, 600, 1000, 1200 y 1500.

Finalmente se somete a la probeta a un desbaste en el banco de pulido, para que las superficies puedan quedar aptas para el siguiente proceso; se debe aplicar una velocidad de 150 rpm en el banco y uso del compuesto alúmina Buchler de 1 μ .

2.7.1.1 *Caracterización de los aceros API 5L X42, mediante espectrometría*

Para el procedimiento debemos tomar en cuenta lo que nos indica en la norma ASTM 1251, que da requerimientos específicos sobre la probeta que se debe aplicar; como lo es, la aplicación de la chispa en tres lugares, con el objetivo de obtener datos acerca de los elementos que lo componen, como resultado tendremos un promedio en el porcentaje de peso de la probeta; el tiempo requerido para lograr el objetivo debe ser de 15 minutos en cada uno de los puntos aplicados. Con los datos obtenidos se podrá identificar el material similar, vinculando su composición con el elemento adecuado.

2.7.1.2 *Microscopia óptica y análisis SEM*

Para el análisis correspondiente se debe realizar una revelación microestructural, esto se realiza mediante el uso del químico Nital 5%, lo que se obtiene de las probetas (Acero API 5L X42) es el cambio microestructural además de la concentración de ferrita más perlita.

En el proceso de microscopia óptica las probetas deben ser observadas con ampliaciones correspondientes a 20X, 50X y 100X, esto para tener una mayor objetividad en los detalles y resultados, para este análisis se usó el microscopio Olympus BX41M-LED y el microscopio electrónico Jeol. Lo que se obtiene es la identificación de fases presentes en el acero; adicional se debe realizar un análisis EDS (Yancha, y otros, 2021) en las muestras sometidas a corrosión.

2.7.2 *Ensayos de Dureza (resistencia a la indentación)*

Para los Análisis que se realizan a las muestras se considera dos métodos lo cuales son ensayo de dureza Vickers y ensayo de dureza Brinell.

2.7.2.1 *Dureza Vickers*

Para el proceso de ensayo correspondiente se lo realizo con el equipo Micro - durómetro FUTURE TECH, modelo FM800, serie FMX8340, con lo cual se analiza los siguientes aspectos:

- Carga aplicada que debe estar a 9,807 N (Newtons)
- Tiempo de 15 s (segundos) de aplicación.

2.7.2.2 *Dureza Brinell*

Para el proceso de ensayo de dureza Brinell se lo realizó con el equipo Durómetro ERNST, modelo NR3DR, serie 4651, nuevamente se requiere de aspectos de aplicación únicos para el desarrollo:

- Patrón de ensayo correspondiente a 95,4 IIB/30 ± 5
- Tiempo de duración de la fuerza correspondiente a 10 s (segundos).

2.7.3 *Ensayo de impacto*

Este ensayo se realizó en función de la norma ASTM E23, que describe el procedimiento a llevar a cabo en el ensayo de impacto de materiales metálicos que se encuentran a temperatura ambiente. La máquina que se utilizó para el procedimiento tiene los siguientes detalles: Equipo de máquina de ensayos Charpu PIC 450/C con serie M152552AR14, que cumplen las siguientes características para el ensayo Entalle normalizado en V

- Entalle normalizado en V
- Aplicación de 450 J (Joules) de energía

2.7.4 *Ensayos electroquímicos en el acero API 5L X42*

La Facultad de mecánica cuenta con laboratorio de metalografía, por lo que los ensayos de corrosión acelerada de las probetas se llevaron a cabo en dichos laboratorios, las cuales se encuentran en estado de suministro y además de muestras que se les ha aplicado tratamientos

térmicos de normalizado, recocido y bonificado, los resultados se describen en la tercera parte de la esta investigación.

2.7.5 Celda de corrosión

Según la norma ASTM (G5, G59, G61) son cinco partes que describe para que este compuesta una celda de corrosión. Que se las describe a continuación

1. Recipiente de vidrio con la capacidad de 1L
2. Porta muestras con un área de 1cm^2

Electrodo de trabajo (WE): probetas de bajo carbono en sus diferentes composiciones

3. Electrodo de referencia (RE) de Ag/AgCl
4. 2 contra electrodos de acero inoxidable (Ce) de 2mm de diámetro
5. Termómetro de 0-150

2.7.6 Parámetros experimentales utilizados en los ensayos de corrosión

En el capítulo I se describen los parámetros que se utilizaran para la experimentación que se realizará en las pruebas de corrosión:

- Por un tiempo de una hora saturar la solución con el componente químico CO_2
- Con frecuencia de 30 min de tiempo, determinar los respectivos OCP
- Con Voltaje de $\pm 300\text{ mV}$ Vs. OCP, se debe realizar las voltamperometrías
- Escanear a un intervalo de tiempo (Swep rate) $0,715\text{ mV/s}$

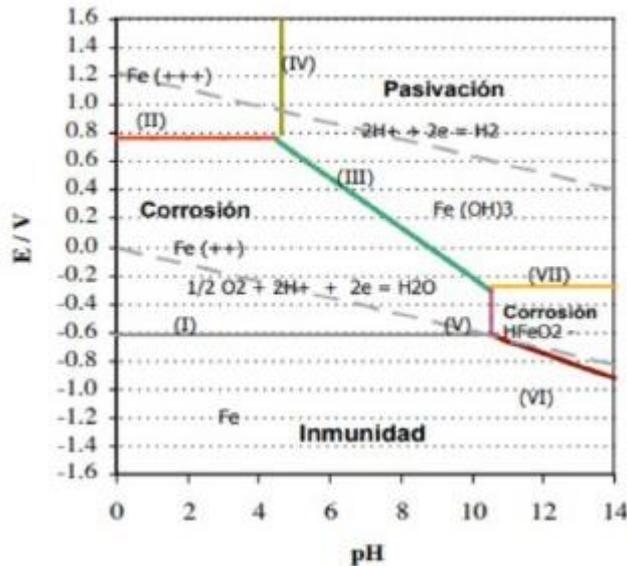


Gráfico 3-2: Relación (pH-potencial Fe)

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

2.7.7 Temperatura ambiente

Cuando se lleva a cabo el proceso de corrosión se debe realizar a diferentes temperaturas las cuales oscilan en diferentes magnitudes, algunos autores como (Olvera, y otros, 2015) consideran que la temperatura del líquido (Agua) debe estar en un intervalo de (40-80 °C) Para llevar a cabo el proceso de corrosión se debe considerar investigaciones de (Benamor et al, 2017) los cuales nos afirman que las variaciones pueden ser las siguientes (20-60°C). Estas variaciones están en función del compuesto ideal.

Al mezclar en el proceso de corrosión en la celda electroquímica bajo una saturación con el elemento CO₂, se logra sustituir el agua de mar con una temperatura de rango (20-60°C), por lo tanto, se considera la base de la investigación en base al electrolito. De la misma manera en consideración de las velocidades, al tener velocidades menores o igual a 200mV/s, en el ensayo de corrosión la resistencia no se ve afectada en la polarización. (Yancha, y otros, 2021)

Se puede apreciar las velocidades de valor 200 mV/s, cuando las temperaturas ambientes están de acuerdo a las citas mencionadas.

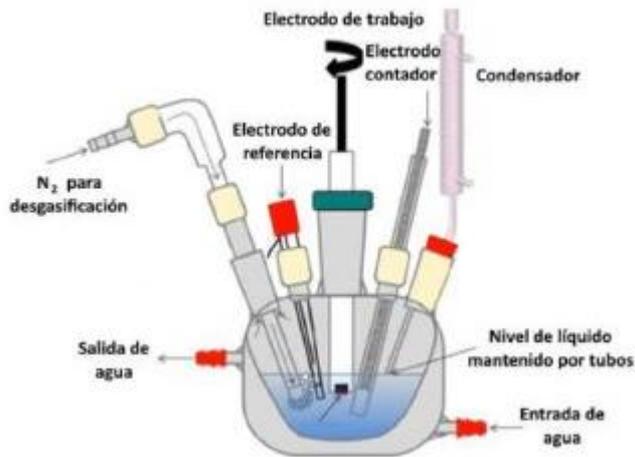


Gráfico 4-2: Posicionamiento de las conexiones de la celda de corrosión

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

2.7.8 *API 5L X42 factor de la medición electroquímica del acero.*

Para obtener los datos de los ensayos electroquímicos se hace el uso del equipo PGSTAT 204 Metrohm Autolab y NOVA 2.1 los cuales son un Potenciostato/Galvanostato y un software, respectivamente, los datos se obtienen a partir de seguir la siguiente secuencia.

- Tratamiento térmico respectivo.
 - Suministro
 - Recocido
 - Normalizado
 - Bonificado
- Evaluación de la velocidad de corrosión en cada una de las etapas.

2.8 Evaluación de la corrosión

En cada uno de los procesos obtenidos se debe llegar a la evaluación de resultados por lo que este proceso se lo realiza en consideración de los siguientes pasos:

- Inspección mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM). - Encargada de dar resultados conforme a la exposición de productos de corrosión. Para examinar la superficie del material.

- Espectrometría de rayos X de dispersión de energía (EDS). - utilizada para la exploración de los diferentes elementos químicos dentro del material; análisis micro químico.

2.9 Proceso para la comparación de resultados de acuerdo a la caracterización

Al termino de las caracterizaciones de la probeta Api 5L X42 sometida a los diferentes procesos como:

- Preparación de las probetas según la norma:
- Proceso de tratamientos térmicos
- Evaluación y extracción de resultados de los procesos descriptivos
 - Caracterización de las probetas mediante espectrometría
 - Análisis mediante evaluación SEM y microscopia óptica
- Evaluación y resultados del análisis de Dureza
- Evaluación de los ensayos de corrosión

Se establece la comparación de los resultados obtenidos por las probetas, mediante la evaluación de los resultados obtenidos en cada uno de los procesos antes descritos.

2.9.1 Comparación de resultados

Para la comparación de resultados se debe evaluar cada uno de los procesos, los resultados indican la capacidad de cada probeta en función del tratamiento térmico aplicado y su resistencia a la corrosión de la misma manera se comprenderá de mejor manera con los efectos que presente cada uno.

Por comparación simple se evalúan los valores encontrados de manera individual por la probeta API 5L X42 sometida al medio Agua de Mar como también el acero API 5L X42 sometida al medio de KCl (Cloruro de Potasio), los valores medidos se encuentran en mpy (mili pulgadas por año) y mm/year (milímetros por año) respectivamente; por lo tanto, bajo un sistema de conversión los valores en el resumen final se encuentran estandarizados en el sistema métrico internacional (milímetro por año, mm/year).

Finalmente se compara y se concluye los mejores resultados mediante gráficos y tablas en función de la tasa de corrosión obtenida en las probetas. Las cuales se describen a mayor detalle en el capítulo 3.

Capítulo III

3. Resultados y discusión de resultados

En esta sección se realizará la manifestación de los resultados aplicados al acero API 5L, categoría X42 a raíz de la investigación y evidencia obtenida de los siguientes ítems:

1. Tratamientos térmicos (recocido, normalizado, bonificado).
2. Caracterización de la microestructura (Descripción de los cambios en la microestructura)
3. Aplicación de ensayos de dureza, resistencia a la indentación. (Ensayos mecánicos).
4. tratamientos térmicos (Bonificado, recocido, normalizado); la tasa de corrosión.

3.1 Acero API 5L X42 observado a través de microscopía óptica (acero sometido al medio electrolítico agua de mar)

Principalmente en este apartado se ha logrado identificar los diferentes cambios en la microestructura que se relacionan con cada una de las etapas de los tratamientos térmicos; el tratamiento térmico de recocido las probetas presentan la formación de ferrita y perlita dividida en matrices de coloración oscura para la ferrita, en el siguiente procesos térmico las probetas muestran una mayor dispersión en toda la superficie por lo que se puede evidenciar un 80% de ferrita y un 20% de perlita, propio de las probetas que pasan pro la fase de normalizado adicional se evidencia la formación de pequeñas inclusiones de óxido de aluminio, finalmente en la etapa de bonificado se observa una mayor dispersión de la ferrita el cual se asemeja a pequeñas agujas de coloración oscura ubicadas en toda la superficie en contraste con la perlita.

Bajo el procedimiento EDS se puede localizar los productos formados de la corrosión del agua de mar y también del KCl, en ambos procedimientos se descubrieron los elementos Sodio (Na) y oxígeno (O) además a estos se adjuntan elementos los cuales cumplen el rol de reveladores que el proceso de corrosión se encuentra en su fase activa, estos elementos son: Hierro (Fe) y carbono (C). A la formación de los elementos podemos constatar que en el proceso con la probeta tipo normalizado se evidencia la formación de nuevos elementos como son: cloro (Cl) que en combinación con el elemento sodio (Na), se crea el cloruro de sodio (NaCl), de la misma manera en esta sección se evidencia de mejor manera las inclusiones de varios elementos como son: silicio (Si) y el aluminio (Al).

3.2 Aplicación de ensayos de dureza, resistencia a la indentación (ensayos mecánicos)

Cuando los aceros han sido sometidos a los tratamientos térmicos el material logra obtener mayores ventajas en cuanto a su resistencia mecánica (dureza, resistencia a la indentación), por lo tanto es necesario medir los valores a los que ha llegado la probeta; obviamente cada acero en función al tratamiento térmico presenta valores diferentes por lo que podemos identificar en los aceros de tipo suministro una valoración promedio entre 146 -151 HBW; tipo recocido 129.6 – 141 HBW; tipo normalizado 147.4 – 167 HBW y tipo bonificado 158 – 188 HBW. Todos estos valores se han logrado en un laboratorio con ambiente controlado de temperatura promedio 21.3°C y humedad promedio de 52.2 %RH.

Para los ensayos de impacto se presenta cada uno de los valores en promedio a la energía absorbida por las probetas las cuales presentan valores propios de cada una de las etapas de tratamiento térmico; por lo que tenemos tipo suministro: 84.6 (J), tipo recocido: 65.9 (J), tipo normalizado: 92.5 (J), tipo bonificado: 107.7 (J); para este ensayo las probetas contaron con una medida estándar de altura 0.8 (cm), ancho 0.5 (cm) y un laboratorio de ambiente controlado de 23.8°C y humedad relativa de 47.9 %RH

3.3 Resistencia a la corrosión del acero API 5L X42 sometido a dos medios electrolíticos diferentes. (Agua de mar y KCl)

El procedimiento para la obtención de la tasa de corrosión se basa en la ejecución del método conocido como voltamperometría de barrido lineal el cual nos ayudara a obtener curvas de polarización lineal conforme a los resultados obtenidos por la derminación del OCP en un lapso de 30 min. Este procedimiento se realiza para cada una de las probetas que fueron sometidos a los tratamientos térmicos adicional la probeta de tipo suministro para finalmente realizar una comparativa. Para las probetas sumergidas en el electrolito de agua de mar tenemos la de tipo suministro: $-1.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, recocido: $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, normalizado: $-2,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, bonificado: $-4,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; por otro lado, contamos con los resultados de las probetas sumergidas en el electrolito de cloruro de potasio (KCl) que demostraron los siguientes resultados. Tipo suministro: $-4.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, recocido: $-6.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, normalizado: $-3.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, bonificado: $-3.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Luego se analizaron los datos para obtener

3.4 Acero API 5L X42 observado a través de microscopia óptica (acero sometido al medio electrolítico agua de mar)

Para la obtención de resultados con forme a la caracterización microestructural se utilizó la técnica de microscopia óptica (barrido y trasmisión), el cual permite capturar digitalmente las imágenes de la micrografía las cuales se presenta en alta resolución, las cuales son capturadas a través de una lente ocular con un aumento de 10X.

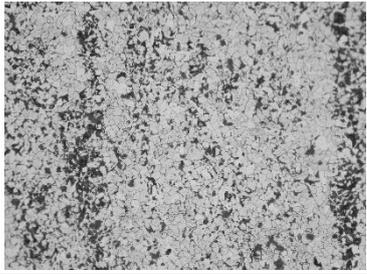
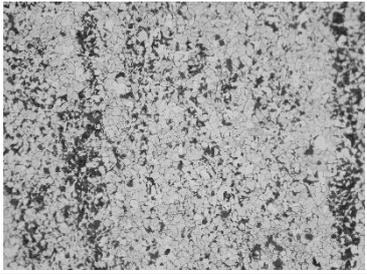
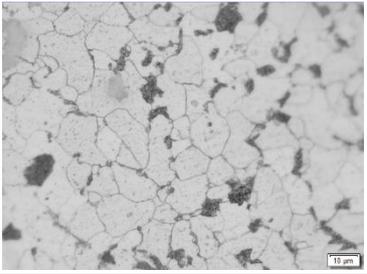
Las microscopias realizadas permiten visualizar inclusiones y fases presentadas por los materiales en los aceros tratados.

3.4.1 *Proceso del ensayo*

Con el uso del químico Nital al 5% (que es un revelador, común mente usado para acciones de esta índole), se procede a aplicarlo en un tiempo estimado de 5 s (segundos) para las probetas que se someterán al proceso.

En cuanto a las ampliaciones como se muestra en la tabla 1-3, serán de 20X, 50X, 100X, efectuando la descripción en las mismas para poder identificar las microestructuras en la probeta.

Tabla 1-3: PROBETA TIPO: SUMINISTRO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.

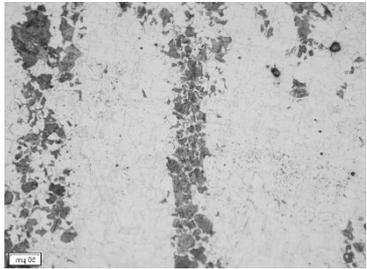
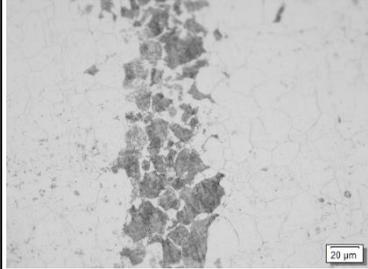
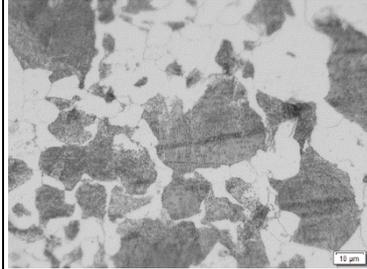
Probeta API 5L X42		
Ampliación: 20X	Ampliación: 50X	Ampliación: 100X
Tipo: Suministro		
		

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo suministro: en el proceso de la descripción de las micrografías obtenidas podemos diferenciar dos matrices, que se caracterizan principalmente por la coloración, dentro de la primera matriz tenemos el color blanco que presenta un porcentaje mayor en el espacio; esta sección se describe como la matriz ferrítica, conjuntamente con la sección oscura que se describe como las áreas de perlita; por la forma y dirección que presentan los rasgos en las probetas son producto del proceso de laminación que se asemeja al proceso de manufactura de las tuberías sin costura; además presenta una forma de grano irregular de la misma forma presentan inclusiones de una coloración gris como formas alargadas y redondas.

Tabla 2-3: PROBETA TIPO: RECOCIDO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.

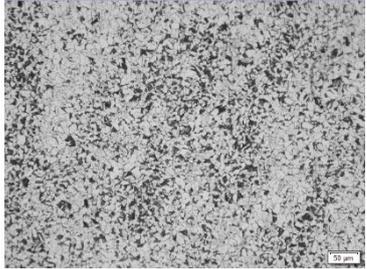
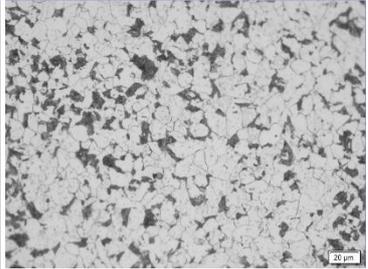
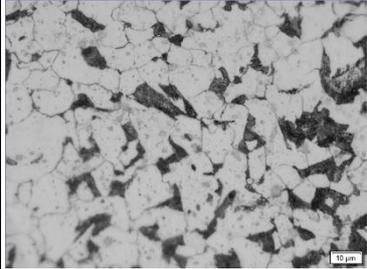
Probeta API 5L X42		
Ampliación: 20X	Ampliación: 50X	Ampliación: 100X
Tipo: Recocido		
		

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo recocido: en las siguientes imágenes presentadas podemos evidenciar una diferencia más amplia con respecto a al ítem anterior correspondiente a la tabla 2-3, estas nuevas micrografías presentan características más implícitas en cuanto a sus dos matrices, que se caracterizan principalmente por el color, dentro de la primera matriz tenemos el color blanco descrita como la matriz ferrítica, conjuntamente con la sección oscura que describe las áreas de perlita; los rasgos que presentan la forma y la dirección en las probetas son características propias del acero API 5L X42, a estas formas les acompañan inclusiones con coloración en negro, las cuales se aprecian como óxido de aluminio y óxido de silicio en pequeñas cantidad asociadas.

Tabla 3.3: PROBETA TIPO: NORMALIZADO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.

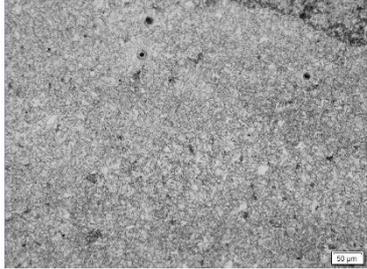
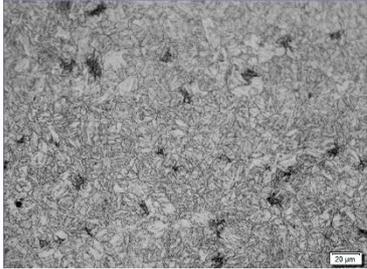
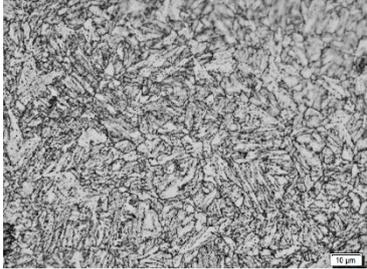
Probeta API 5L X42		
Ampliación: 20X	Ampliación: 50X	Ampliación: 100X
Tipo: Normalizado		
		

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo normalizado: Las micrografías que se presentan a continuación muestra amabas matrices tanto de perlita como de ferrita, las cuales las diferenciamos con los siguientes colores; blanco (matriz ferrítica), negro (matriz perlítica), en el tratamiento de tipo normalizado por lo general se obtiene el punto proeutectoide, esto se debe a los porcentajes de ferrita y perlita presentados los cuales son: 80% Ferrita y 20% Perlita, además esta proporcionalidad se encuentra en los límites del grano para finalmente observar inclusiones en pequeñas cantidades de óxido de aluminio.

Tabla 4.3: PROBETA TIPO: BONIFICADO, visualización y descripción de las microestructuras bajo diferentes aumentos.

Probeta API 5L X42		
Ampliación: 20X	Ampliación: 50X	Ampliación: 100X
Tipo: Bonificado		
		

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo bonificado: En las imágenes se puede visualizar que en el tratamiento de tipo bonificado puede encontrarse varias características propias las cuales se presentan con formas que asimilan a espigas, agujas o simplemente formas alargadas y finas, este tipo de formas conjuntamente con la coloración oscura se las conoce como Perlita; esto se debe porque al pasar por el proceso de temple la probeta adquiere la forma peculiar similar a unas agujas, para finalmente presentar óxidos de aluminio en forma redonda, óxidos de hierro en forma alargada, obteniendo finalmente una matriz de cementita más la adición de perlita.

3.5 Acero API 5L X42 observado por microscopia óptica, sometido al medio electrolítico KCl a 0,1M

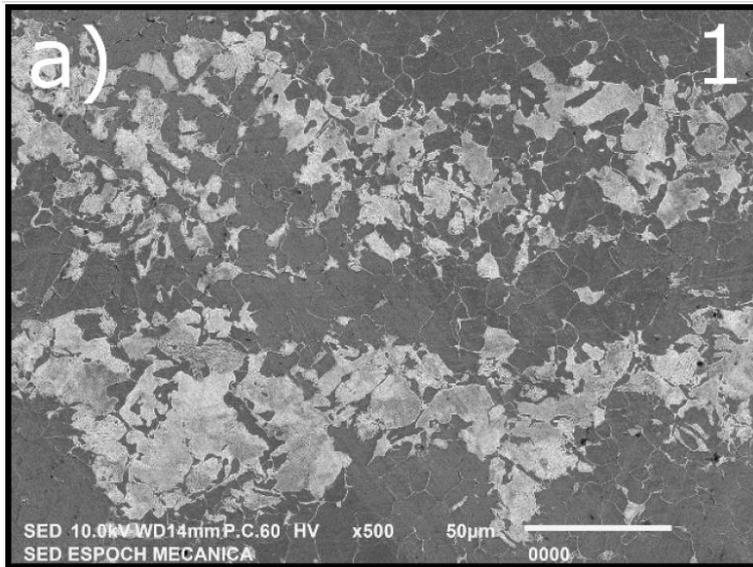


Figura 1-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo suministro.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo suministro: En la figura 1-3 se evidencia dos matrices, que se caracterizan principalmente por la coloración, dentro de la primera matriz tenemos el color blanco que presenta un porcentaje mayor en el espacio; esta sección se describe como la matriz ferrítica, por otra parte, en la sección oscura se describe como las áreas de perlita, por la forma y dirección que presentan. Al observar los rasgos en las probetas afirmamos que son producto del proceso de laminación ya que se asemeja al proceso de manufactura de las tuberías sin costura; además presenta una forma de grano irregular de la misma forma muestran inclusiones de una coloración gris con formas alargadas y redondas.

En consecuencia, de la cantidad relativamente alta de manganeso en la muestra ha producido el incremento de perlita en forma de bandas

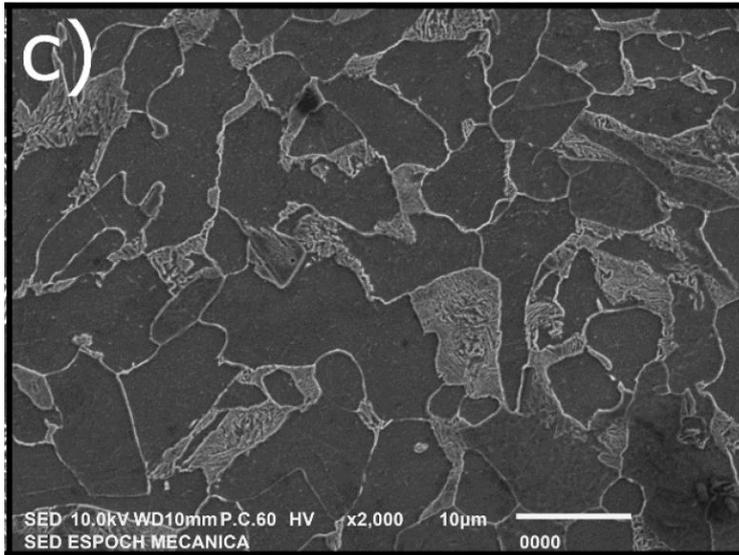


Figura 3-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo normalizado.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Tipo normalizado: en la figura 3-3 se observa una formación uniforme de la caracterización de perlita y ferrita, detalle que se produce a consecuencia del enfriamiento por aire que sufren las probetas para poder llegar a la fase de normalizado, además, presenta características especiales las cuales son el refinamiento de grano y una mejor distribución de la misma, las matrices tanto de perlita como de ferrita se muestran más ordenadas las formas alargadas como pequeñas astillas unidas representan a la matriz ferrita, en cambio la matriz perlítica se muestra más uniforme, más ordenada y con mayor congruencia en forma y color.

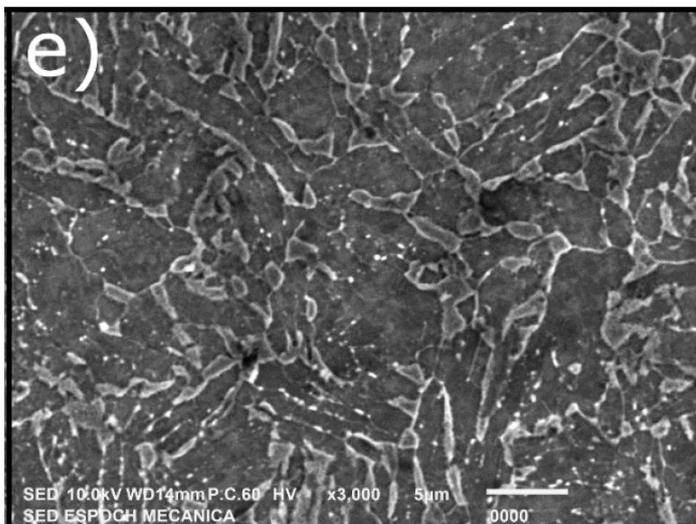


Figura 4-3: Visualización y descripción de la microestructura, tipo bonificado.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

En la figura 4-3 se observa una distribución de las matrices (ferrita & perlita) más equitativas en función de la dispersión por la superficie, es posible diferencias cada una de las matrices por su

coloración representativa en la imagen. La uniformidad en la superficie es evidente, ya que sus formas son similares para ambas matrices.

Las características adicionales que presenta este tipo de probeta a comparación con las demás microestructuras analizadas muestran morfologías de martensita y austenita las cuales se distribuyen por el área analizada en la micrografía para llegar a una microestructura de cementita templada en consecuencia de la larga permanencia de 650°C

3.6 Ensayo de dureza

3.6.1 Ensayo de dureza Vickers

Según la norma NTE INEN ISO 6507-1 se realizaron los ensayos de las probetas fabricadas del material API 5L X42, las dimensiones se formaron de acuerdo con la tabla 5-3. La finalidad es desarrollar las características mecánicas mediante los ensayos que serán sometidos a los respectivos tratamientos térmicos. Estos estudios se realizaron en el centro de fomento productivo metalmecánico carrocerero (CFPMC), en el anexo C se encuentra el desarrollo del informe.

Tabla 5-3: Detalles de los resultados obtenidos de la dureza Vickers en la probeta API 5L X42

Tratamiento térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HV 0.1)
Suministro	21	56.9	147.44 - 213
Recocido	20.4	58.6	141.16 - 139
Normalizado	21	56.9	148.46 - 174
Bonificado	20.5	58.5	173.7 - 215

Fuente: (Yancha, y otros, 2021) (Villavicencio et al, 2020)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

El rango de temperatura promedio para realizar las pruebas de dureza oscila entre 20,5 – 21 °C y el rango de humedad medio es de 56,9 – 58,6 % HR. Los valores promedios en cuanto a la dureza Vickers se encuentran descritas conforme al tratamiento térmico aplicado. En resumen, el tratamiento térmico que presenta un valor mínimo es el recocido con un valor de 141,16 HV 0.1; el valor máximo se presenta en el tratamiento final bonificado con un valor de 173,7 HV 0.1

Cada uno de estos valores corresponden a los beneficios que presentan cada uno de los tratamientos, por lo tanto el cambio en la microestructura es evidente; de acuerdo al proceso de

recocido la reducción de la dureza Vickers en el tratamiento térmico es considerable en un 4%, aumentando su ductilidad; esto ocurre porque se ha sometido a la probeta a un tratamiento de calentado por 870 °C, el cual se mantiene por un tiempo de 60 min, posteriormente el enfriamiento se lo realiza dentro de la mufla con lo que conseguimos los resultados descritos.

3.6.2 *Ensayo de dureza Brinell*

De acuerdo con la normativa presentada en los documentos NTE INEN ISO 6506-1, se procedió a realizar los ensayos en el CFPMC, de los cuales, se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la tabla 6-3.

Los informes correspondientes con mayor detalle se hallan en el Anexo B.

Tabla 6-3: Detalles de los resultados obtenidos en la dureza Brinell en la probeta API 5L X42

Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Humedad %	Dureza Promedio (HB 2,5 / 187,5)
Suministro	21.6	52.2	146 - 151
Recocido	21.4	52.4	129.6 - 141
Normalizado	21.3	52.4	147.4 - 167
Bonificado	21.3	52.6	158 - 188

Fuente: (Yancha, y otros, 2021) (Villavicencio et al, 2020)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

La tabla 6-3 detalla los resultados obtenidos al realizar el ensayo de dureza Brinell en la probeta API 5L X42, con un rango de temperatura promedio que oscila entre 21,3 – 21,6 °C y un rango de humedad relativa promedio de 52,2 – 52,6 % HR. El tratamiento térmico que presenta un valor mínimo es el recocido con un valor de 129,6 HBW 2,5 / 187,5; el valor máximo se presenta en el tratamiento final bonificado con un valor de 158 HBW 2,5 / 187,5.

3.7 **Ensayos de Impacto**

El siguiente ensayo se realizó en el CFPMC, de los cuales los informes se detallan en el Anexo E, cada uno de los valores obtenidos en los ensayos los presentamos en las tablas 7-3.

Tabla 7-3: Detalles de los resultados obtenidos en los ensayos de impacto a la probeta 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

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

La tabla 6-3 detalla los resultados obtenidos al realizar el ensayo de impacto en la probeta API 5L X42, con un rango de temperatura promedio que oscila entre 23,3 – 24,2 °C y un rango de humedad relativa promedio de 47,3 – 48,8 % HR. El tratamiento térmico que presenta un valor mínimo es el recocido con un valor de 65.9 (J); el valor máximo se presenta en el tratamiento final bonificado con un valor de 107,7 (J).

3.8 Ensayo de corrosión

Para el correspondiente ensayo se concibe el uso de los laboratorios de la facultad de mecánica, “Laboratorio de Metalografía”, para lo cual se toma de referencia la norma ASTM D-1141 lo cual afirma para la postulación de los resultados, la utilización del electrolito correspondiente que se menciona en la norma descrita, de la misma manera se debe tomar de referencia la implementación de los parámetros experimentales que se indican en el inciso 2.8.6, y la utilización de la celda electroquímica.

3.8.1 Voltamperometría de barrido lineal

Este procedimiento tiene como finalidad la obtención de los resultados de las curvas de polarización los cuales se pueden percibir mediante el comportamiento de las probetas durante el análisis, para lo cual se cuenta con dos probetas de cada tratamiento térmico y condiciones que se describen en el inciso 2.9.

Por lo tanto, podemos describir las características esenciales para realizar los ensayos a las diferentes probetas, tenemos en primera fase la adición de CO₂ por un tiempo de 60 minutos (1h), de manera continua para la verificación de los parámetros en los límites establecidos se debe determinar u observar el OCP en lapsos de 30 minutos.

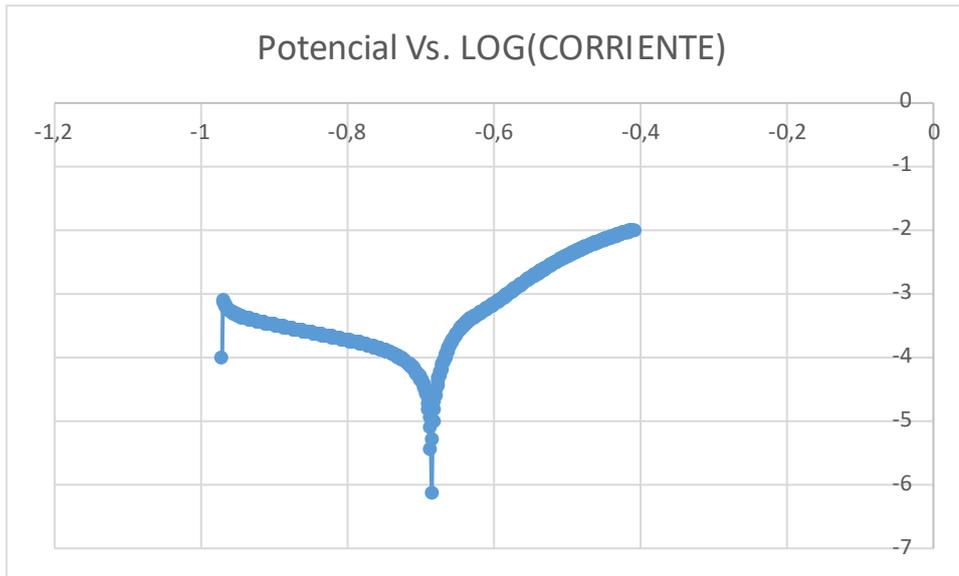


Gráfico 1-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Suministro.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

El grafico 1-3 presenta una densidad de corriente máx.: $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para una probeta de tipo suministro el cual se ha sumergido durante 1 hora posterior a ellos se ha recabado los resultados en un tiempo promedio de 30 minutos lo cual, identifica la curva de polarización para una probeta sin tratamiento térmico.

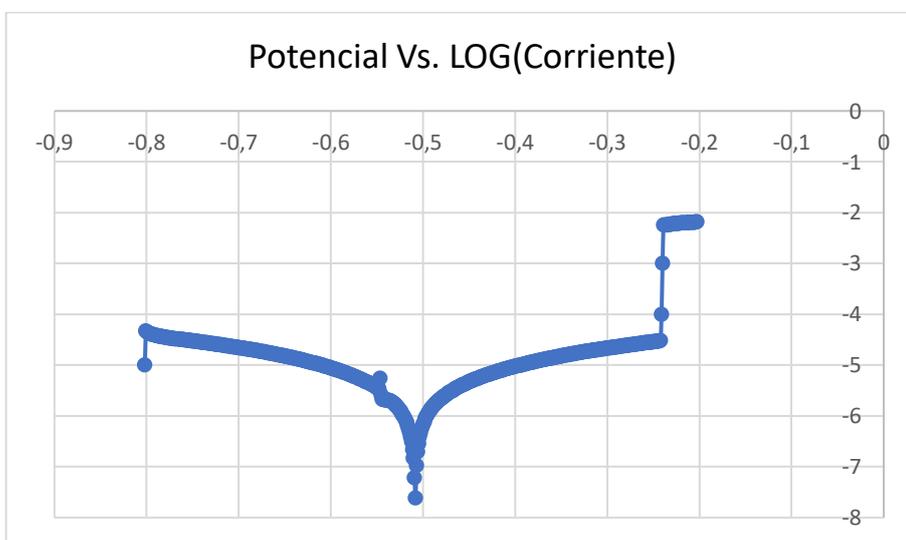


Gráfico 2-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Normalizado.

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

El grafico 2-3 presenta la probeta de tipo normalizado con una densidad de corriente máx.: $-2,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, sin embargo antes de alcanzar dicho resultado se puede observar que tiene una estabilidad en $-4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual se evidencia la estabilidad generada, durante el proceso.

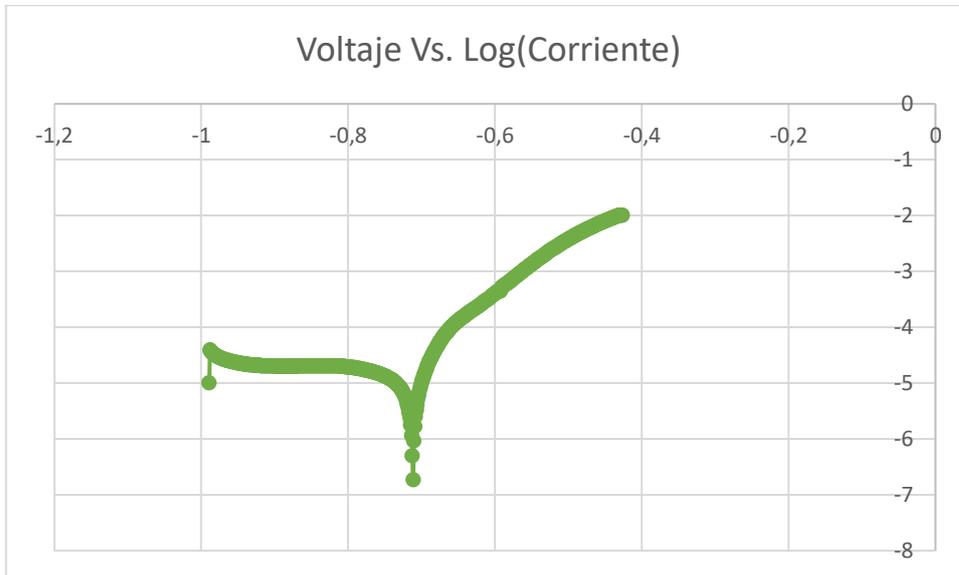


Gráfico 3-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Recocido.

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

En este grafico podemos evidenciar que la densidad de corriente máx. es de $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ el cual corresponde a la probeta de tipo recocido.

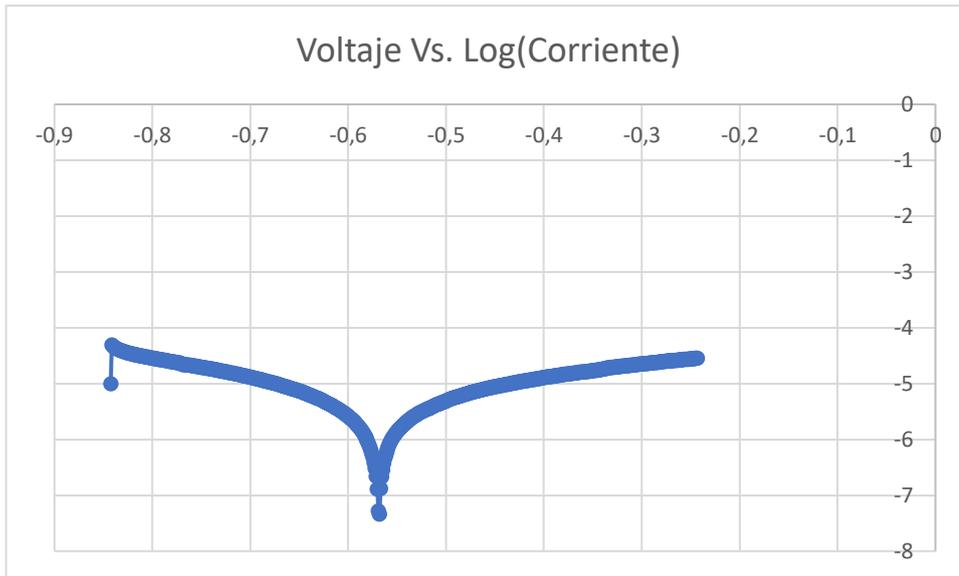


Gráfico 4-3: Acero API 5L X42, curva característica de polarización. Estado del acero: Recocido.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

En cambio, se puede observar en el gráfico 4-3, que el punto máximo se encuentra en un valor de $4,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pero a la vez que se evidencia un cambio en el potencial eléctrico se puede notar que los valores se forman en un intervalo entre -2 y $-4,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Los resultados obtenidos de las probetas sometidas al electrolito agua de mar se describen y analizan las imágenes que representan el potencial eléctrico en el eje X y por el eje Y tenemos el logaritmo que forman la densidad de corriente, esto nos ayuda a identificar la curva de polarización para poder compararlos con cada uno de los resultados por cada tratamiento térmico; entonces se describe lo siguiente “entre mayor sea el potencial del electrodo, mayor será la densidad de corriente expresada” (Yancha, y otros, 2021) en cambio las variaciones que se evidencian en el eje de la densidad de corriente se describen como los cambios de procesos que ocurren en el proceso de ensayo, donde se puede identificar la penetración del material por la corrosión (pitting)

Según el gráfico 1-3 se menciona que la densidad de corriente máxima se encuentra en $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ valores que son muy similares con el gráfico 2-3, que sostiene una densidad de corriente máxima en $-2,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, hasta este punto los valores son muy bajos por lo que el potencial del electrodo es menor, por lo mismo se puede identificar al gráfico 3-3 con una densidad de corriente máxima en $-2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, este gráfico corresponde al tratamiento térmico de recocido, este tratamiento térmico lo podemos comparar con la probeta de suministro que presenta uno de los valores en el punto de inflexión de la figura 4-3 por lo que tenemos un valor en cuanto al potencial eléctrico de

-6,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, cabe resaltar que la probeta en estado de suministro no cuenta con ningún tratamiento térmico, por lo que se afirma que es el acero en su estado puro. Significativamente podemos denotar que, por cada tratamiento térmico y probeta durante el ensayo, los resultados no son similares que asimilan a un proceso de corrosión diferente.

En cambio, se puede observar en el grafico 4-3, que el punto máximo se encuentra en un valor de 4,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pero a la vez que se evidencia un cambio en el potencial eléctrico se puede notar que los valores se forman en un intervalo entre -2 y -4,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Por lo tanto, se define que si los valores se encuentran en un nivel promedio de -2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ independientemente del tratamiento térmico aplicado a la muestra se llegará a la formación de un tipo de corrosión conocido como pitting (*caso de corrosión*) mismos que se derivan de la primera formación de carbonatos en el material, referencia grafico 2-3.

Finalmente detallamos que cada uno de los gráficos tiene un punto de inserción tanto de la polarización anódica como también de la polarización catódica, estos se encuentran en E_{corr} (*potencial de corrosión*), por lo que definimos a los resultados como características del método Tafel, al momento que el material debe pasar de un momento activo a un momento pasivo (*revisar inciso 3.5.1*) se encuentra bajo el análisis del cambio de potencial eléctrico como también la densidad de corriente, encontrando así el comportamiento del material, por lo tanto las tasas más altas de corrosión las analizamos en los puntos más altos en la densidad de corriente máxima. (Yancha, y otros, 2021)

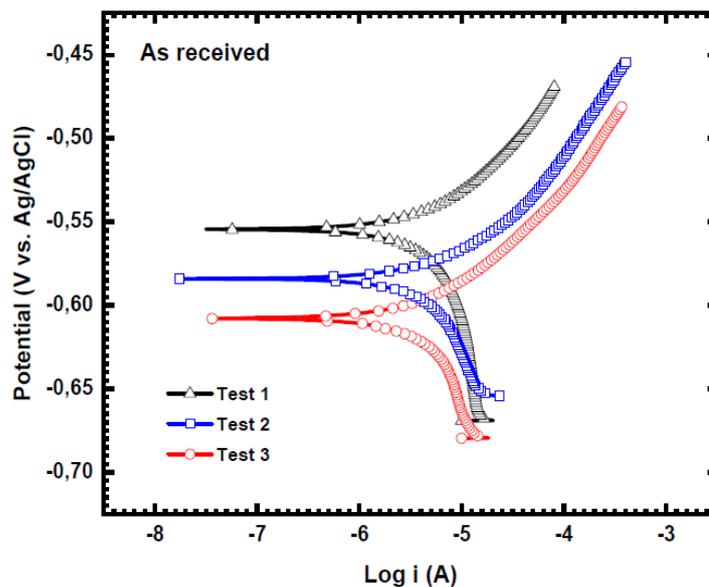


Figura 5-3. Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo suministro tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

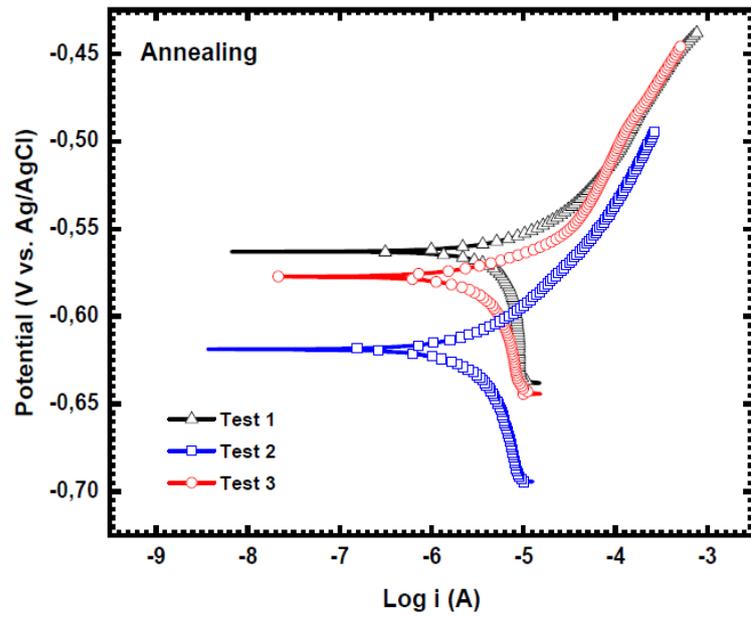


Figura 6-3. Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo recocido tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h
 Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

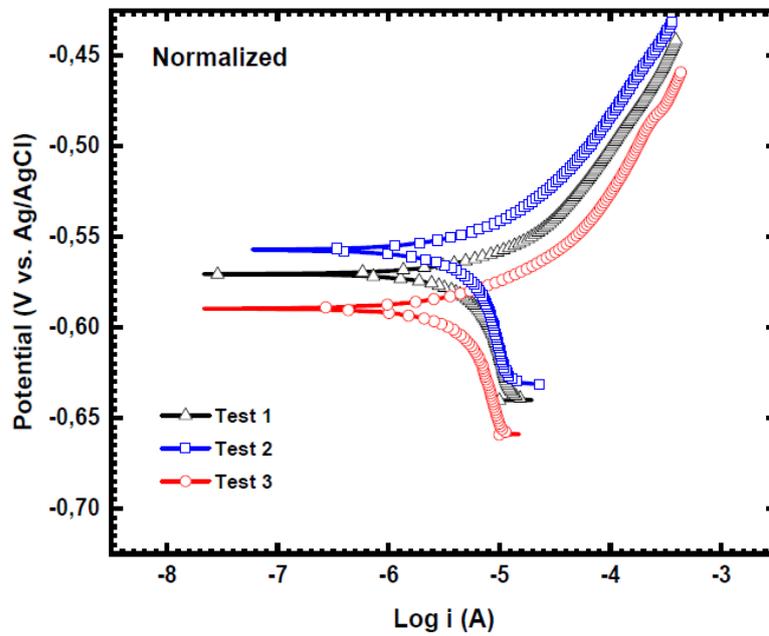


Figura 7-3. Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo normalizado tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h
 Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

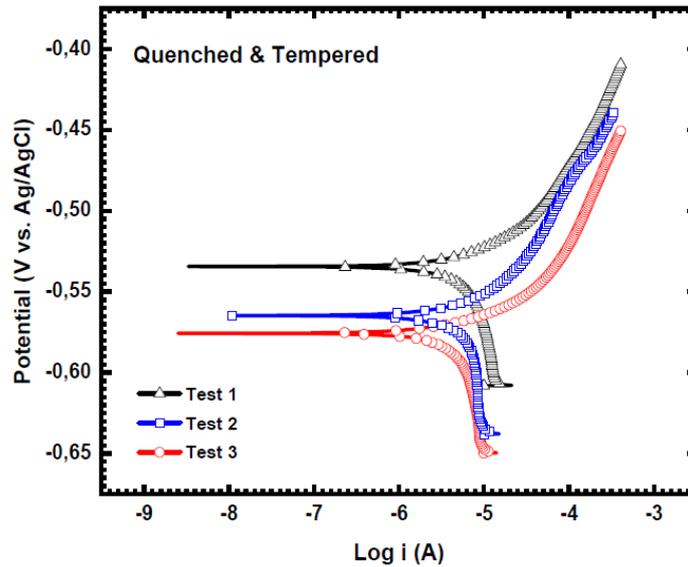


Figura 8-3. Diagramas de Tafel del acero API XL X45 para tuberías, tipo bonificado tras la inmersión en KCl 0,1 M durante 1 h
Fuente: (Villavicencio, y otros, 2020)

Los ensayos realizados en cloruro de potasio (KCl a 0,1 M) se establecieron bajo las normas y condiciones aplicadas en el inciso 2.8.6, para cada una de las probetas que fueron sometidas al tratamiento electroquímico. Las cuales son: Suministro, recocido, normalizado y bonificado.

Tenemos el máximo de densidad de corriente alcanzada para este experimento con un promedio de $-3,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, en conjunto con los resultados obtenidos con todas las probetas que se han sometido al experimento, cabe señalar que los estudios realizados corresponden a tres testeos diferentes en promedios de una hora, es así como podemos diferenciar su equivalencia de manera visual a través de sus colores establecidos por cada uno de los testeos y el cambio que ha presentado. Al observar cada uno de los gráficos que se muestra en el proceso de corrosión electroquímica (graficas de Tafel) en el medio de KCl a 0,1M bajo las curvas de polarización, determinamos el rango en cual se ubica el potencial que viene a ser entre $-0,50\text{V}$ y $-0,65\text{V}$, las cuales se diferencian en su i_{corr} , por ende podemos revisar que su diferencia radica en el tratamiento térmico aplicado, entonces exponemos que en las probetas de recocido y suministro se encuentran las tasas más altas de corrosión, al poseer cantidades altas de densidad de corriente equivalentes a un promedio de $-0,60\text{V}$.

3.8.2 Evaluación de la tasa de corrosión

Para este apartado necesitamos la guía de la norma ASTM G102-4 que detalla la conversión de los valores cuantificados de velocidad a la que ocurre el proceso de corrosión en las probetas, los primeros datos para la conversión lo podemos obtener mediante la Ley de Faraday que evalúa la valencia que presenta los materiales, esto quiere decir que las probetas en el proceso de corrosión electroquímica variarían su corriente eléctrica, entonces, al obtener los datos preliminares podemos evidenciar la tasa de corrosión que procede en el tiempo una vez convertidos.

La ley de Faraday detalla que se son necesarios los datos evaluados en la base de la región Tafel que se definen a 1 decano de densidad de corriente y 100 mV, por lo que será necesario comparar las curvas obtenidas en los gráficos anteriores, una vez realizado el proceso podremos obtener la evaluación de la velocidad de corrosión como la tasa que presenten cada una de las probetas analizadas.

$$I_{\text{corr}} = I_{\text{corr}}/A \quad (20)$$

Donde:

I_{corr} = densidad de corriente de corrosión

($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), I_{corr} = corriente total anódica

μA , A = área de la muestra en exposición, se mide en cm^2

Según la ASTM, describe que el área de análisis debe ser de 1 cm^2

$$E_w = W/n \quad (21)$$

$E_w = 55,845/2$

$E_w = 27,92$ (peso equivalente)

Donde:

E_w = peso equivalente

W = peso atómico

n = número de electrones que corroen el material en un átomo

(Ahmad, 2006)

$$CR_{\text{corr}} = i_{\text{corr}} \cdot XE_w / dxF \quad (22)$$

Donde:

CR_{corr} = tasa de corrosión (mm/año)

E_w = peso equivalente

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

d = densidad del hierro (Fe)

F = constante de Faraday

Al tener el hierro (Fe) como elemento principal se debe evaluar el proceso de corrosión mediante el intercambio de electrones que se evidencia en la oxidación que ocurre en el material, entonces, se identifica el intercambio a $2 e^-$ con una densidad de $7,87 g/cm^3$ y finalmente la constante de Faraday que es $96485 C/eq$. (Yancha, y otros, 2021)

Entonces obtenemos:

$$CR_{corr} = i_{corr} \times E_w / d \times F \quad (23)$$

3.8.2.1 *Resultados obtenidos para las probetas sometidas al electrolito de agua de mar al aplicar la ecuación anterior.*

Tabla 8-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Suministro, Solución: Agua de Mar a 0,1M

E _{corr} , Obs (V)	I _{corr} (A/cm ²)	I _{corr} (uA/cm ²)	mpy	mm/year
-0.68454	0.00010779	107.79	49.32974424	1.253
-0.67878	0.00011896	118.96	54.44165855	1.3828

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 9-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Normalizado, Solución: Agua de Mar a 0,1M

E _{corr} , Obs (V)	I _{corr} (A/cm ²)	I _{corr} (uA/cm ²)	mpy	mm/year
-0.50842	0.000002084	2.84	0.953735848	0.024225
-0.54541	0.000003692	3.6924	1.689814896	0.042921

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 10-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Recocido, Solución: Agua de Mar a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A/cm ²)	Icorr (uA/cm ²)	mpy	mm/year
-0.71166	0.000015292	15.292	6.998334252	0.177758
-0.70874	0.000025402	25.402	11.62514299	0.295279

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 11-3: Resultados tasa de corrosión, Tipo: Bonificado, Solución: Agua de Mar a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A/cm ²)	Icorr (uA/cm ²)	mpy	mm/year
-0.56843	0.000005437	5.437	2.488225433	0.063201
-0.5224	0.000006121	6.121	2.801255817	0.071152

Fuente: (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

3.8.2.2 *Resultados obtenidos para las probetas sometidas al electrolito de KCl al aplicar la ecuación anterior.*

Tabla 12-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Suministro, Solución: KCl a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Icorr (uA)	mm/year
-0,55	0.00000723	7,23	0.067
-0,58	0.00000456	4,56	
-0,60	0.00000548	5,48	

Fuente: (Villavicencio et al, 2020)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 13-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Normalizado, Solución: KCl a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Icorr (uA)	mm/year
----------------	-----------	------------	---------

-0,57	0.00000426	4,26	0.091
-0,56	0.00000443	4,43	
-0,59	0.00000348	3,48	

Fuente: (Villavicencio et al, 2020).

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 14-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Recocido, Solución: KCl a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Icorr (uA)	mm/year
-0,61	0.00000782	7,82	0.070
-0,57	0.00000347	3,47	
-0,57	0.00000684	6,84	

Fuente: (Villavicencio et al, 2020).

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

Tabla 15-3: Resultados de la tasa de corrosión, Tipo: Bonificado, Solución: KCl a 0,1M

Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Icorr (uA)	mm/year
-0,53	0.00000488	4,88	0.103
-0,56	0.00000396	3,96	
-0,58	0.00000478	4,78	

Fuente: (Villavicencio et al, 2020)

Realizado por: Ibis P. Alex, 2021

3.8.2.3 *Análisis de resultados generales para datos de electrolisis de agua de mar.*

Contamos con la valoración medida del voltaje de corrosión, de la misma manera con la apreciación del ruido de corriente generado (corrosión) y mpy (mili pulgadas / año); todos estos valores se lo pueden obtener al verificarlos con la solución acuosa a $7 \text{ pH} \pm 2$, dentro de los parámetros establecidos que son necesarios para llevar a cabo el ensayo, por lo tanto se obtiene que los resultados presentan una ligera variación en la medición del voltaje lo que provoca la mínima diferenciación en un proceso cuasi lineal (Yancha, y otros, 2021) esto lleva a que los valores no se eleven sobrepasando la región que establece un control en la difusión que provoca la corrosión, además se puede notar que no varía el potencial. Verificamos los datos en el software Nova 2.1 con resultados similares.

Cuando se compara con los resultados generados en el sistema que contiene el agua de mar sustituta podemos observar las variaciones notorias que se dan tanto en los potenciales

electroquímicos y corriente, cuando se analiza en una solución compuesta por 0,1 M saturada de CO₂. Al finalizar los ensayos obtenemos valores negativos, lo que (Montes, y otros, 2016) menciona que tienden a estar activos durante el procedimiento.

3.8.2.4 Análisis de resultados generales para datos de electrolisis de KCl a 0.1M.

En cambio, para este análisis poseemos ligeras variaciones en la nomenclatura, por lo que el ruido de corriente generado es (corrosión) y mm/year es (milímetros / año); el cambio que sufren en las curvaturas de Tafel y resultados se debe a la velocidad de los ensayos, en este caso tenemos velocidades de 0,1mV/s, por lo tanto, al realizar las pruebas correspondientes tenemos las probetas de suministro, estas se obtuvieron con valores que oscilan entre 0,42 y 0,58 V frente a Ag / AgCl. Cuando ya se han concluido con las pruebas de 1h respectivamente para la solución KCl a 0,1M, estos valores corresponden similarmente a 0,58V (Popov, 2015; Alves, y otros, 2001) los cuales son considerados como marcos temporales estandarizados, entonces nos encontramos que se encuentran dentro del rango normal, demostrando así que los resultados son fiables.

Se puede denotar que el proceso de corrosión puede incrementar en las zonas donde exista alguna fisura o corte circundante que provoca un aumento en la tasa de corrosión, dentro de los ensayos podemos verificarlos por el potencial presentado no obstante al medio ambiente no tenemos los mismos métodos de predicción

3.8.3 Evaluación de los productos de corrosión.

Este procedimiento se logra bajo el uso del laboratorio de mecánica que cuenta con el microscopio electrónico de barrido (SEM), propios que se utiliza en la visualización de las muestras.

Tanto las probetas de suministro como las que cuentan con un determinado tratamiento térmico se aplicaron al procedo EDS (Espectrometría por dispersión de energía de rayos X), el cual es un proceso de microanálisis & Químico.

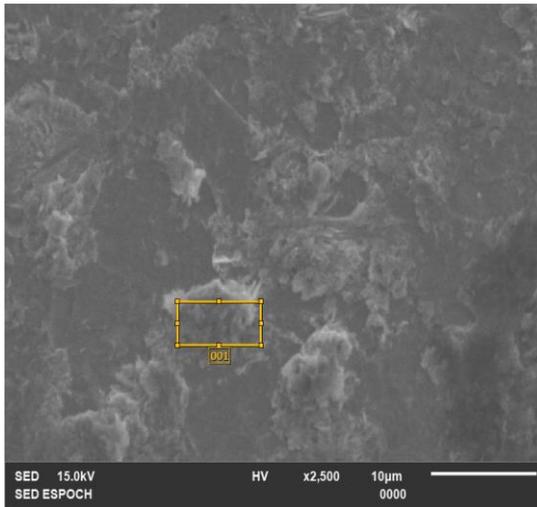


Figura 9-3: Probeta API 5L X42, tipo Suministro sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

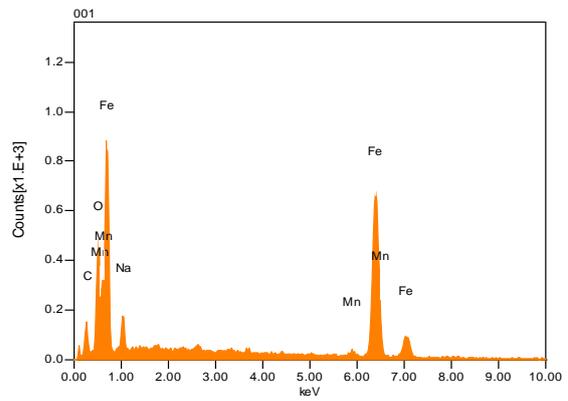


Figura 10-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo suministro. Ensayo de espectrometría de rayos X.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

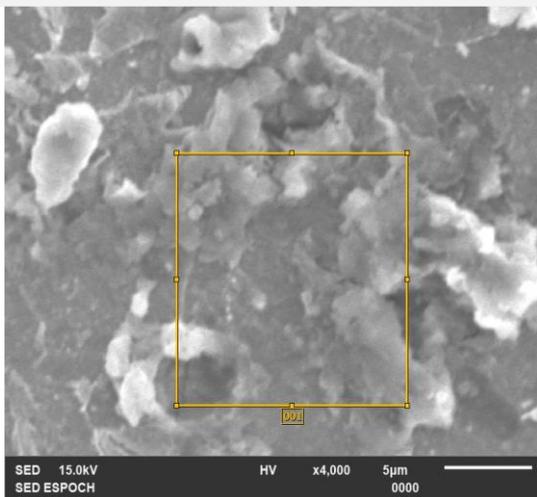


Figura 11-3: Probeta API 5L X42, tipo normalizado sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

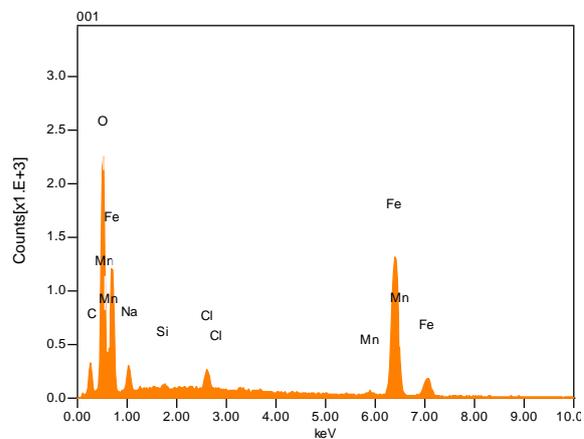


Figura 12-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo normalizado. Ensayo de espectrometría de rayos X.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

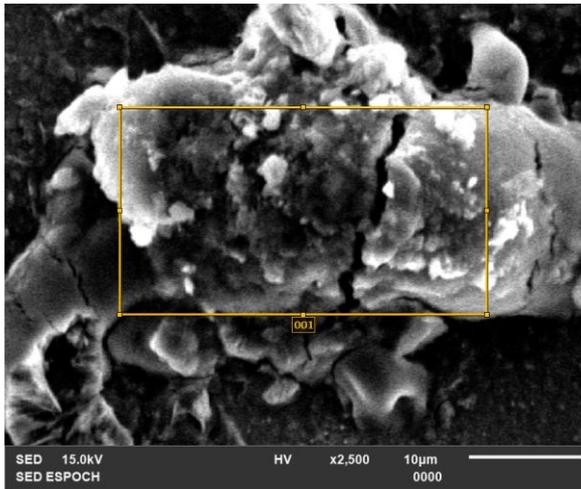


Figura 13-3: Probeta API 5L X42, tipo recocido sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

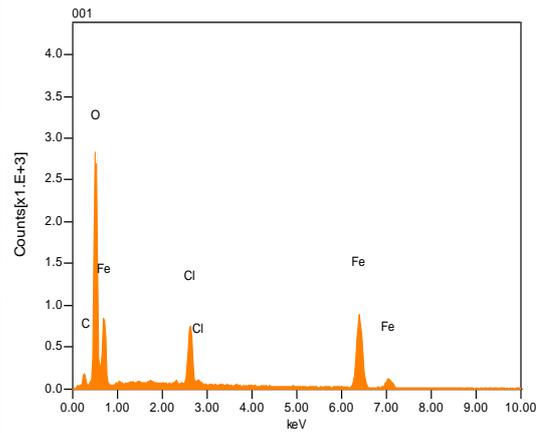


Figura 14-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo recocido. Ensayo de espectrometría de rayos X.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

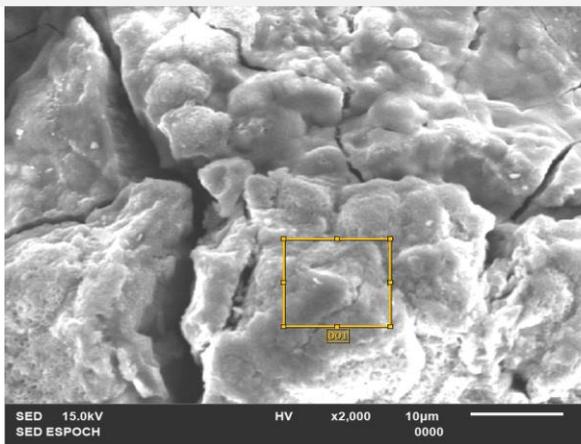


Figura 15-3: Probeta API 5L X42, tipo bonificado sometido al procedimiento EDS, medio electrolítico agua de mar.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

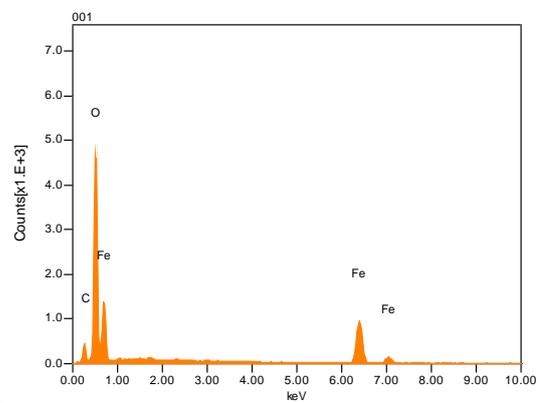


Figura 16-3: Formación de efectos de corrosión en la probeta API 5L X42, tipo bonificado. Ensayo de espectrometría de rayos X.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

3.8.3.1 *Análisis de resultados generales para datos obtenidos en el procedimiento EDS y Espectrometría de rayos X para probetas sometidas al electrolito de agua de mar.*

Sometiendo a las probetas al proceso de espectrometría se puede evidenciar varios procesos de formación de efectos corrosivos como también componentes en las probetas, estos nos inclinan a detallarlas ya que son propias en este proceso acelerado. Dentro del proceso de visualización del microscopio electrónico de barrido (SEM), se detalla secciones con coloraciones específicas.

En primera instancia tenemos la formación evidente de elementos como son el ion cloruro y iones de carbono & hierro. En las imágenes presentadas por el procedimiento SEM, se evidencia la coloración dividida en secciones como claras y oscuras, por lo que, entre mayor sea la coloración oscura se detalla como mayor presencia de carbonatos (FeCO_3) (Yancha, y otros, 2021) también nos menciona que si existen otro componente puede originarse agregados como (CaCO_3) carbonatos de calcio, por lo que la formación de estos productos está ligado a los elementos que lo conforman.

En la espectrometría de rayos X para esta sección se puede identificar con mayor precisión los elementos que conforman las probetas luego de ser procesadas en el ensayo electroquímico de corrosión, por lo que tenemos los elementos: Sodio (Na) y oxígeno (O) además a estos se adjuntan elementos los cuales cumplen el rol de reveladores que el proceso de corrosión se encuentra en su fase activa, estos elementos son: Hierro (Fe) y carbono (C). A la formación de los elementos podemos constatar que en el proceso con la probeta tipo normalizado se evidencia la formación de nuevos elementos como son: cloro (Cl) que en combinación con el elemento sodio (Na), se crea el cloruro de sodio (NaCl), de la misma manera en esta sección se evidencia de mejor manera las inclusiones de varios elementos como son: silicio (Si) y el aluminio (Al), estos se producen antes del ensayo por lo que con las micrografías de rayos X podemos comprobar su presencia en las probetas.

Finalmente podemos describir las fases que se presentan dentro de las probetas del acero API 5L X42, como los elementos que se incrustan provocan el proceso de corrosión las fases presentes en los aceros promueven el proceso de activación acelerada de corrosión, o a su vez su disminución por lo tanto es necesario describir que la fase ferrita es la que más resalta el cual se diluye demasiado pronto, tal es que lo realiza antes que la fase cementita lo haga, estas diluciones provocan que se deposite una capa de productos corrosivos en el acero, esta capa es muy fina, por tanto también se puede encontrar carbonatos de hierro y cementita no disuelta en la probeta ensayada. (Yancha, y otros, 2021), el hecho que no diluya la capa de cementita permite que la probeta pueda resistir relativamente por mayor tiempo al proceso de corrosión, de la misma manera si se aumenta la deposición de carbonatos de hierro, este provoca una mayor resistencia de dilución de cementita, regresando al procedimiento anterior, se evidencia una mayor resistencia en la probeta.

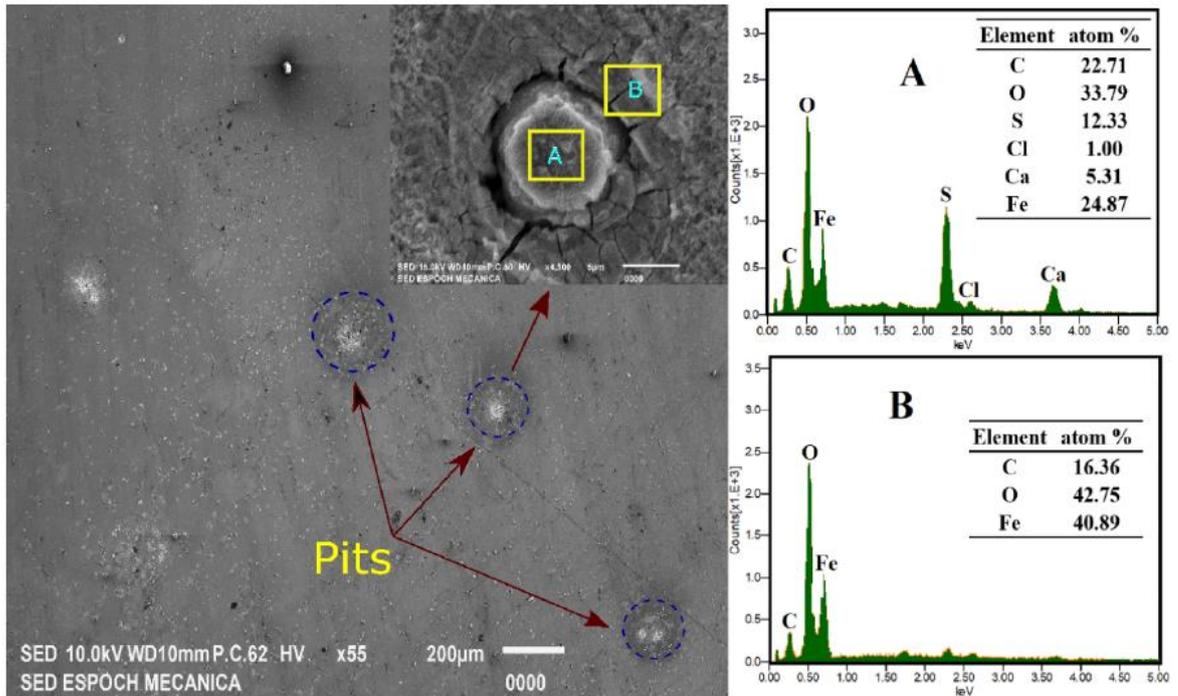


Figura 17-3: Probeta API 5L X42, tipo suministro sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

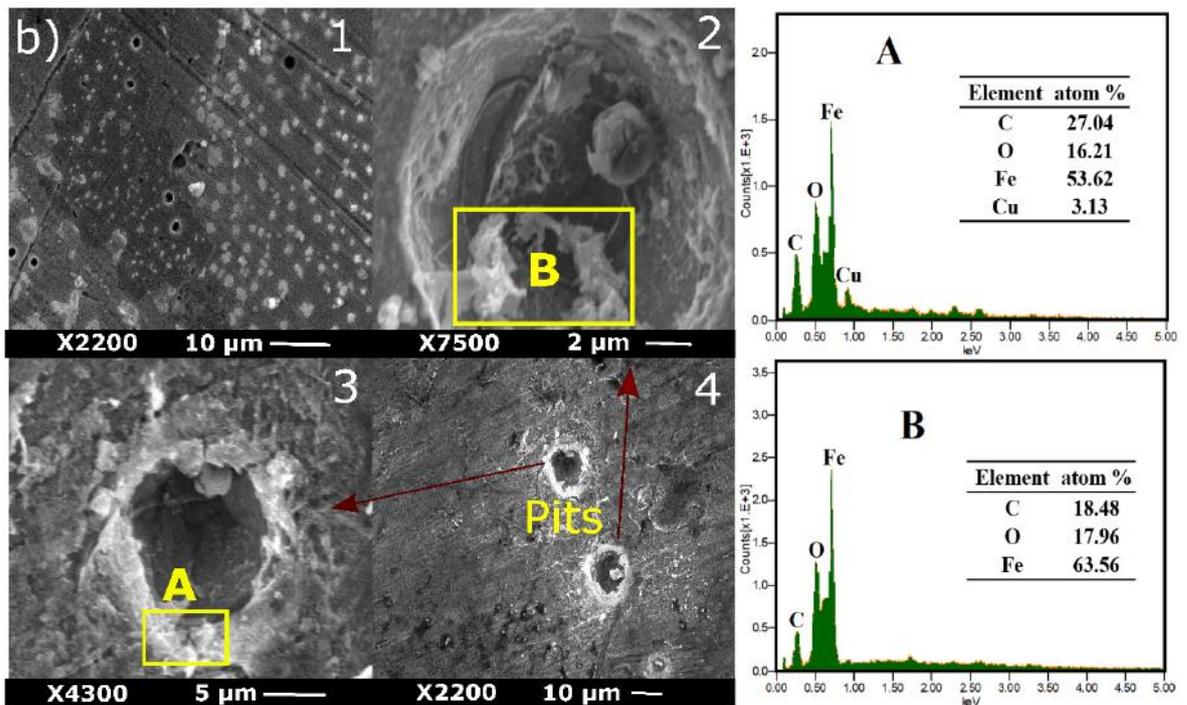


Figura 18-3: Probeta API 5L X42, tipo recocido sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

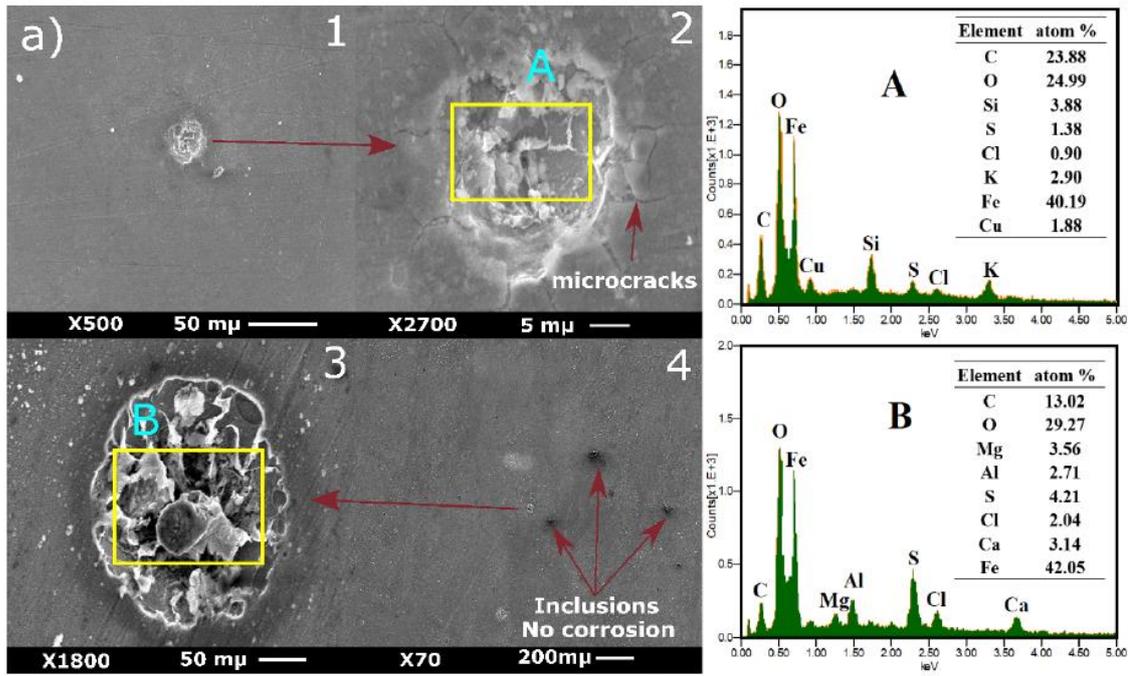


Figura 19-3: Probeta API 5L X42, tipo normalizado sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

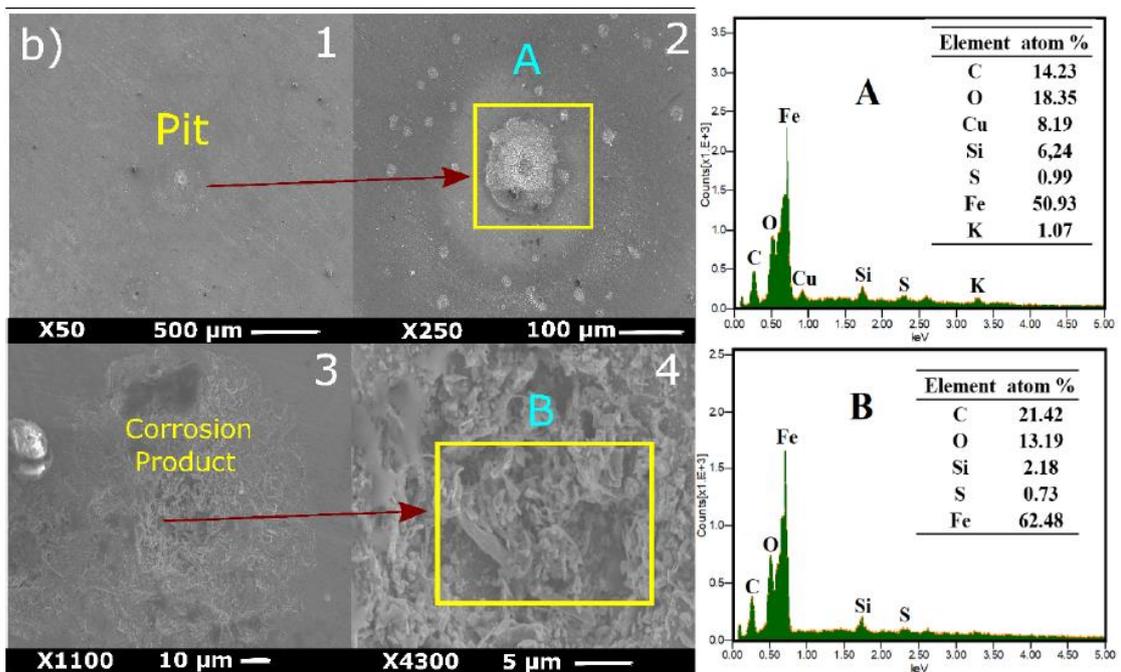


Figura 20-3: Probeta API 5L X42, tipo suministro sometido al procedimiento EDS y resultados de espectrometría de rayos X, medio KCl a 0,1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

3.8.3.2 *Análisis de resultados generales para datos obtenidos en el procedimiento EDS y Espectrometría de rayos X para probetas sometidas al electrolito de KCl a 0,1M.*

Los resultados obtenidos mediante espectrometría realizada al acero API 5L X42, el hierro en la disolución anódica en KCl 0,1 M tiende a situarse en los parámetros descritos en la ley de Tafel, podemos describir que la reducción del oxígeno se muestra una corriente limitante de difusión, esto se indica en las curvas de polarización, por lo tanto tenemos la certeza que se encuentra controlado por la concentración de polarización activada, según (Villavicencio, y otros, 2020) el potencial de corrosión puede determinarse por extrapolación, obteniendo así el índice de corrosión tanto en las ramas anódicas como catódica, esto se puede realizar cuando el proceso catódico está controlado por concentración de polarización en lugar de la activación de polarización. Por lo que las tasas netas tanto de disolución de hierro como la reducción de oxígeno son similares o a su vez se puede realizar el método de extrapolación al percibir esta igualdad de reducciones en los elementos.

Las curvas de Tafel al estar o entrar en contacto con un electrolito durante largos periodos de tiempo tienden a estabilizarse, dentro de las evaluaciones se realizó para 5min y 1h, cabe recalcar que para esta investigación se trabajó con los resultados de las probetas sometidas por 1h, por lo que la comparación lo puede encontrar en los resultados adicionales o anexos, en comparativa tenemos que los resultados de 5 min muestran valores más bajos en comparación con los valores sometidos por 1h, entonces para obtener datos más preciso debemos realizar pruebas con velocidades de exploración bajas a 0,1mV/s.

Por lo tanto describimos que los resultados obtenidos en probetas que fueron sometidas a algún tratamiento térmico y a la prueba por un tiempo de 5min sus potenciales encontrados fueron bajos (E_{corr}) al compararlos con las probetas de tipo suministro, las tasas de corrosión es más alta, finalmente podemos tener un resumen de las tasas de corrosión resultantes en el siguiente orden < suministro < recocido < normalizado < bonificado, por lo que los resultados sugieren que el ataque corrosivo a las muestras de tipo recocido responden de una manera eficaz en un ambiente de cloruro.

Al tratar estas probetas en observación morfológica SEM y análisis químico EDS podemos observar las conjeturas que se localizan en todas las probetas, tales corresponden a inclusiones localizadas después de las pruebas de inmersión, además que todas las muestras dan indicios de corrosión por picadura, esto bajo varios autores (G.S. , 1998; Burstein, y otros, 2004; Szummer, y otros, 1993) sugieren que el tipo de corrosión que presenta se identifica por el contacto que tiene el acero con soluciones que contienen aniones agresivos, cabe resaltar que el cloruro es una gente

altamente agresivo que causa corrosión por picaduras en muchos metales, en cambio en otro autores señalan que no solamente por entornos agresivos se puede llegar a generar corrosión del tipo picadura, sino también por las conocidas inclusiones esféricas (Villavicencio, y otros, 2020) por lo que el desarrollo de la investigación citada identifico a través de un método de análisis conocido como Szummer Et Al, la corrosión localizada en medio de un ambiente de cloruro, los aceros llegarán a ser más propensos a sufrir si estos contienen <2% de manganeso en su composición. Entonces del desarrollo general podemos observar en la figura 18-3 que la corrosión da inicio por varias inclusiones que se logra verificar gracias al análisis químico de EDS, de la misma manera podemos identificarlo por la morfología presentada, las micro fisuras que se encuentran alrededor y un micro agujero en el centro del pozo, entonces al verificar las imágenes se describe que la corrosión por picaduras se produce desde las inclusiones esféricas.

Según la figura 19-3 y mediante el análisis químico EDS podemos observar que se tiene elementos que componen a la probeta, los cuales son el carbono (C) el oxígeno (O) el elemento hierro (Fe) y cobre (Cu), dentro de las inclusiones que se puede observar en la muestra de tipo recocido existen agujeros que se forman a partir de las disoluciones de las inclusiones dando lugar a una mayor formación de corrosión por picaduras a diferencia de la probeta de suministro. Los productos de corrosión se empiezan a formar alrededor de las inclusiones, por lo que podemos aseverar que la exposición prolongada al electrolítico provoco la disolución completa de las inclusiones esféricas llegando a resultar como la formación de hoyos o pozos para finalmente formarse de una capa de productos corrosivos a partir de los pozos.

En la figura 20-3 se muestran resultados de los ensayos realizados en la solución KCl a 0,1M, estos resultados se pudieron obtener a través de EDS, estas probetas corresponden a la información relativa de probetas sometidas a tratamientos térmicos de normalizado y bonificado respectivamente, en contrapartida con las anteriores muestras en estas probetas no se observa una completa disolución de las inclusiones lo que provoca que se genere agujeros en el material, por lo tanto, se observa una mínima disolución del metal y en las proximidades se observan picaduras por corrosión, aun así, podemos encontrar que se han logrado formar micro fisuras en los alrededores de los hoyos. En el tratamiento de normalizado se puede observar la formación de un pozo que no ha se ha completado por lo que lo llamaremos “formación de pozo joven” con forma esférica, como se puede apreciar, podemos notar que se han formado micro agujeros y al igual que los resultados anteriores existen productos corrosivos en los alrededores (capas de productos corrosivos); esta disolución del elemento Al_2O_3 se puede apreciar por el análisis EDS, continuamente se puede notar la formación de hoyos corrosivos relativamente más pequeños rodeando al pozo joven, en cambio para la probeta de tipo bonificado la distribución uniforme de micro agujeros es más evidente ya que se encuentran en su superficie.

Por todo lo que hemos podido revisar podemos incidir que todos los tratamientos térmicos han llegado al punto de sufrir corrosión por picaduras, a consecuencia evidente de la disolución por lo (G.S. , 1998 págs. 29-35) nos proporciona información acerca de las picaduras que forman la corrosión y estos pueden incurrir en la etapa activa cuando áreas específicas son más propensas a disolverse con mayor velocidad que el resto de la superficie. El coeficiente de expansión térmica juega un papel muy importante ya que es la responsable de que se activen la formación de microgrietas alrededor de las inclusiones, esta propiedad descrita determina la morfología y el estrés de las inclusiones por lo que estas diferencias en los coeficientes de expansión térmica entre las inclusiones y el metal promueven la formación de microgrietas o tensiones internas alrededor de las inclusiones entonces tenemos que en la fase de enfriamiento se generan en el metal adyacente a las inclusiones de Al_2O_3 por la variación que sufren los coeficientes. Coeficiente de expansión termia del acero $10,8 \times 10^{-6} / ^\circ C$) y coeficiente de dilatación térmica del oxido de aluminio, Al_2O_3 : $8,2 \times 10^{-6} / ^\circ C$). (Villavicencio, y otros, 2020)

3.9 Resultados generales en conjunto de los resultados de las probetas API 5L X42 sometidas al electrolito de agua de mar.

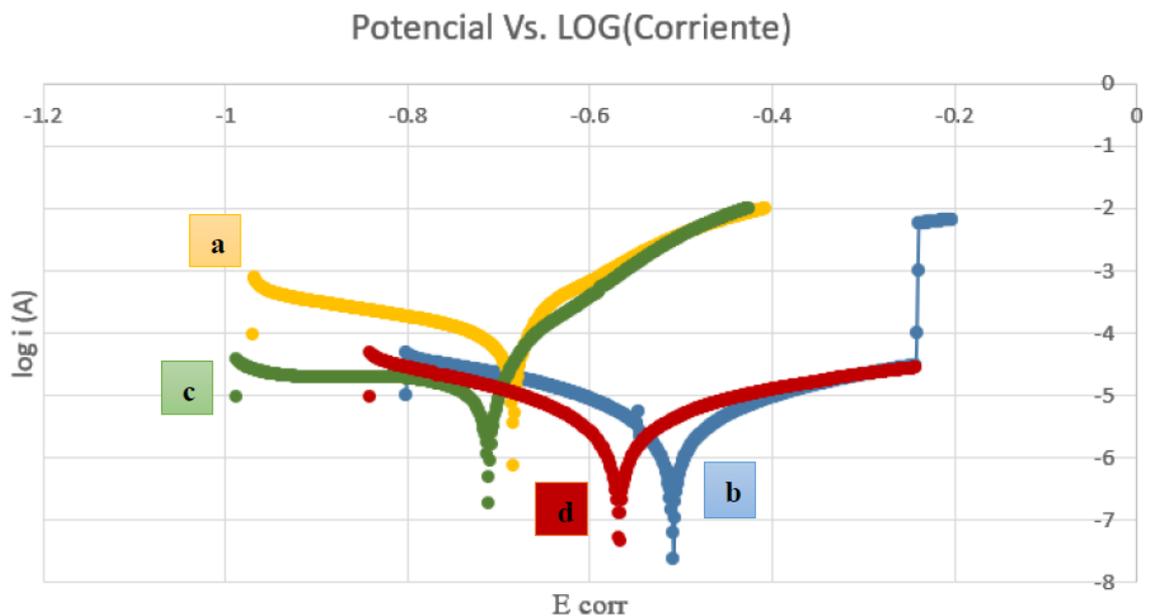


Figura 21-3: Resultados de la curva de polarización, sometidos a medio electrolítico agua de mar, a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

En la figura 21-3 se observa los resultados de la curva de polarización, sometidos a medio electrolítico agua de mar, a) suministro, b) normalizado, c) recocido, d) bonificado. Entre mayor sea el potencial del electrodo mayor será la densidad de corriente expresada por lo tanto podemos aseverar que entre mayor sea el potencial, mayor será la tasa de corrosión que se tendrá en cada uno de las probetas, de las cuales podemos visualizar que nos presenta la probeta de tipo (a) nombrada como suministro que nos da un voltaje de 0.7 voltios a continuación la probeta de tipo (b) de normalizado con un voltaje aproximadamente de 0.55 voltios, de la misma manera tenemos a la probeta de tipo (c) nombrado como recocido que nos presenta un valor de 0.75 voltios y finalmente la probeta de bonificado (d), nos denota un valor de 0.51 voltios; dándonos como resultado el menor voltaje presentado por la probeta de tipo normalizado. En una primera instancia podemos concluir que esta es la probeta que mejor ha dado resultados en el potencial de voltaje versus la corriente aplicada.

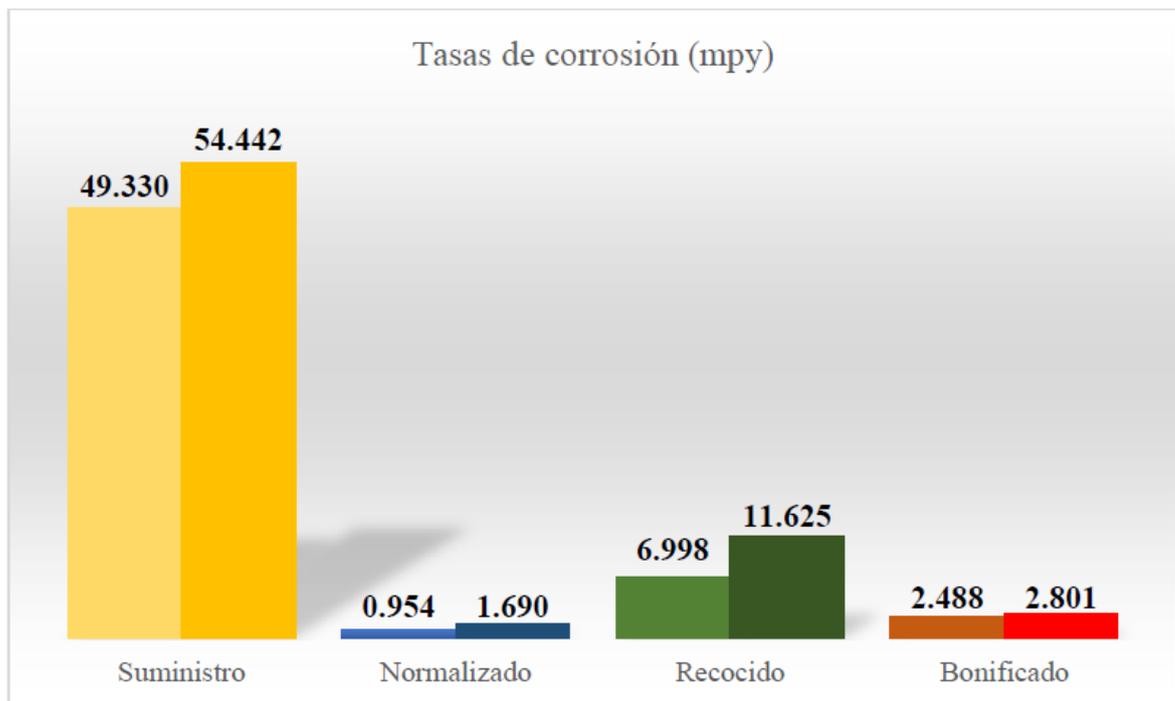


Figura 22-3: Resultados del análisis EDS, evaluación de las tasas de corrosión de las probetas sometidas al medio electrolítico agua de mar.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

En la Figura 22-3, se observa que la probeta con el tratamiento térmico de normalizado presenta menor cantidad de mpy, en cambio por el resultado del análisis EDS podemos comprobar que muestra mayor contenido de iones carbono como también lo es con el elemento del hierro, es así

como la ferrita en la probeta de normalizado se presenta como ánodo y el elemento cementita como cátodo, aquellos que se mencionan son los microconstituyentes de la probeta analizada.

Cuando se ha hidratado al elemento CO_2 , este provoca una reacción que lleva a la disociación de fracciones reducidas de ácido carbónico, por lo que la formación de iones de hidrogeno se consolida con la disolución del hierro por otro lado formación de carbonatos y bicarbonatos esta toma lugar con la reducción de iones hidrogeno, las cuales se evidencian en un procedo de la morfología SEM, esta última es una reacción catódica, mientras que el primer proceso descrito corresponde a una reacción anódica, para constituir este apartado se menciona que el compuesto FeCO_3 que corresponde a carbono de hierro es la contraparte de la calcita (CaCO_2) esto se debe a similitud en sus estructuras, estas se pueden evidenciar en las gráficas de espectrometría de rayos X, iones de calcio (Ca), los cuales son altamente solubles en la solución de agua de mar, entonces tenemos la siguiente analogía, cuando se tiene un entorno de CO_2 el carbonato de calcio suplanta a la calcita, esto se debe a que un átomo de calcio es reemplazado por un átomo de hierro. (Yancha, y otros, 2021)

Los siguientes resultados para evaluar la tasa de corrosión, de las cuales la probeta de suministro presenta un promedio de 53.882 mili pulgadas por año (mpy) de tasa de corrosión, este resultado transformado a milímetros por año nos resulta de 1.31 mm/year, de la misma manera tenemos el siguiente resultado de normalizado con un promedio de 1.32 mpy la cual en la transformación nos da un resultado de 0.0335 (mm/year) milímetros por año de corrosión, continuamos con el resultado de recocido que nos presenta un promedio de 9.3115 mili pulgadas por año eso transformado a milímetros por año nos da un resultado de 0.236512 milímetros por año, finalmente tenemos el resultado de la probeta de bonificado con un resultado de 2.6445 mpy en promedio y el resultado en milímetros por año de 0.06717

Cómo se evidenciaba en los resultados anteriores de las pruebas de Tafel podemos comprobar que la tasa de corrosión de la probeta de suministro es relativamente muy alta en comparación con las probetas que se han sometido a un tratamiento térmico de las cuales la probeta de normalizado tiene una baja tasa de corrosión que presenta durante el año le continúa la probeta de bonificado y finalmente la probeta de recocido nos da un valor de 9.3115 de corrosión de mili pulgadas por año, por lo tanto, el límite máximo que nos ha mostrado en la tasa de corrosión de la probeta de recocido; fuera de ello todos los valores son debajo de la misma por lo tanto podemos aseverar que la tasa de corrosión de la probeta de normalizado es la mejor de todas para nosotros poder utilizarlas en el campo.

3.10 Resultados generales en conjunto de los resultados de las probetas API 5L X42 sometidas al electrolito KCl a 0,1M.

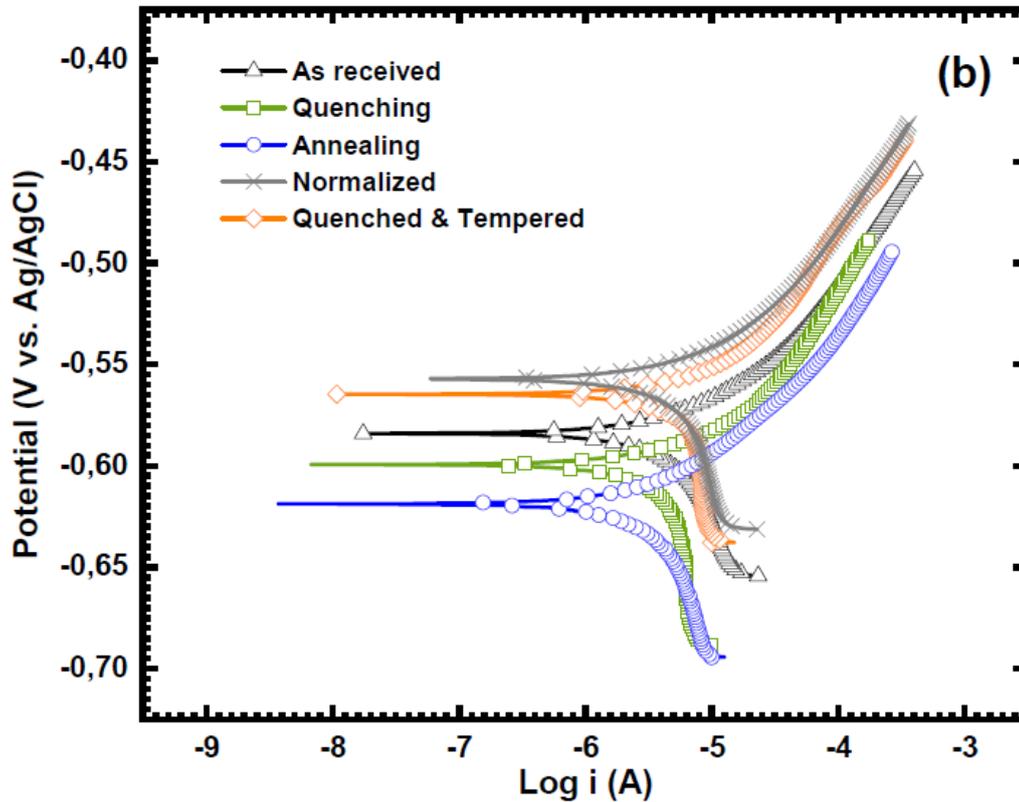


Figura 23-3: Gráficas de Tafel que comprenden los resultados de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Al analizar el gráfico 23-3 tenemos una comparativa de las probetas que se sometieron a tratamientos térmicos y de la probeta que no se sometió a tratamiento térmico como es el caso de la probeta de suministro, de acuerdo al gráfico 23-3 tenemos que en la comparativa los valores se sitúan de entre menos 0,55 a -0,75 V de potencial por lo que podemos describir que la probeta de normalizado tiene un valor aproximado a 0,55V de la misma manera tenemos la probeta de bonificado que está en un rango más alto con un aproximado de 0,57V; continuamos con la probeta de suministro el cual está en un promedio de 0,58V y finalmente tenemos la muestra de recocido que nos da un valor muy alto de 0,65V. Cómo se puede apreciar todos estos valores en función a la intensidad de corriente se sitúan en un promedio de 3.5 A, poseen tasas de corrosión cuando se tiene potenciales electrolíticos más bajos, significa que las muestras deberían tener

tasas de corrosión más altas por lo que en este caso la tasa de corrosión más alta lo tiene el tratamiento térmico de tipo bonificado.

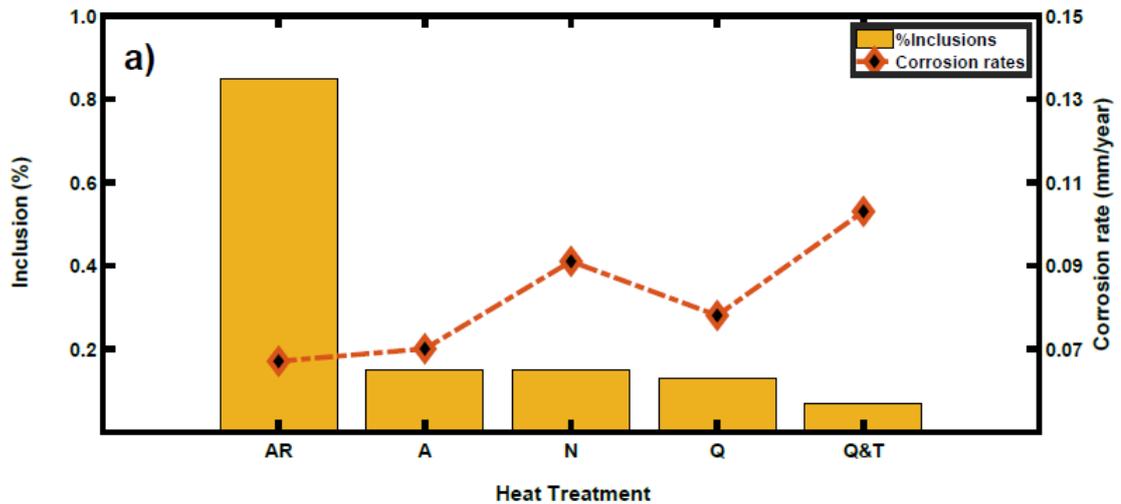


Figura 24-3: Resultados de las inclusiones halladas en porcentaje ya tasa de corrosión de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

En el gráfico 24-3 se muestra un análisis en porcentaje de las inclusiones totales que se han encontrado en cada una de las superficies conjuntamente con la tasa de corrosión generada en los ensayos de las muestras por lo tanto tenemos el primer análisis correspondiente a la probeta de suministro el cual presenta una tasa alta de inclusiones superior al 80% encontradas en su superficie en cambio la probeta de normalizado como la probeta de recocido tienen tasas de inclusiones bajas inferior al 20% y finalmente la probeta de bonificado presenta muestras de inclusiones significativamente bajas en comparación con las anteriores (mucho menor al 20%); a simple vista se podría analizar que las tasas de corrosión deberían ser en función de la cantidad de inclusiones ya que estas al disolverse dan lugar al proceso de corrosión del material pero bajo los ensayos realizados se ha demostrado lo siguiente: la probeta de suministro presenta alto porcentaje de inclusiones, pero muestra una muy baja tasa de corrosión su valor se encuentra por debajo del 0,07mm/año por otro lado la probeta de bonificado presenta tasas de inclusión muy bajas pero la tasa de corrosión es muy alta en su superficie su valor está por debajo de los 0,11mm/año, la muestra de recocido logró bajas tasas de corrosión 0,07mm/año y resultados bajos en el porcentaje de inclusiones dentro del metal, finalmente para las muestras de normalizado son significativamente similares el porcentaje de inclusiones encontradas pero en

cuestión a la tasa de corrosión, esta se encuentra por encima del 0,09mm/year por lo tanto no se obtuvieron las mismas velocidades de corrosión en las distintas muestras; es así, que al revisar estos resultados podemos aseverar que el porcentaje de inclusiones no tienen una consecuencia significativa en las tasas de corrosión con un ambiente de cloruro pH neutro. (Villavicencio, y otros, 2020)

Como se ha conocido cuando las inclusiones de aluminio se disuelven éstas dan lugar a la formación de un tipo de corrosión conocida como picaduras; en una simple analogía se puede dar como resultado que cuanto mayor sea el número de inclusiones, mayor será el número de picaduras que se deberían observar en las muestras por lo tanto la velocidad de la corrosión debería ser proporcionalmente más alta conjuntamente con su porcentaje, en cambio no es el resultado que nosotros esperábamos por lo tanto se rechaza la suposición de que el porcentaje de inclusión influyen las tasas de corrosión para este caso, por consiguiente nos situamos en revisar los parámetros de la microestructura en cuanto a su dureza de cada muestra para determinar si entre ellas se conoce algún tipo de mejora en la tasa de corrosión.

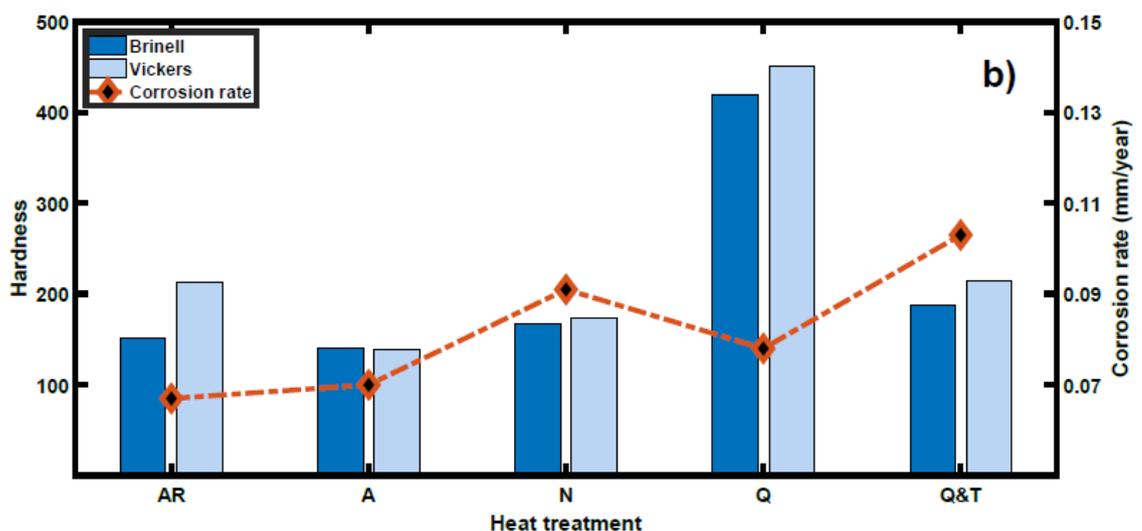


Figura 25-3: Tasas de corrosión según la dureza obtenida después del tratamiento térmico de las probetas sometidas al medio electrolítico KCl a 0.1M.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

Observamos qué en relación a la dureza que muestran las probetas según el gráfico 25-3 las muestras del tipo bonificado y del tipo suministro presentan las tasas más alta de dureza no obstante tanto las probetas de normalizado como de recocido presentan valores similares entre ellos por el porcentaje de dureza es menor con respecto a los primeros dos tipos, de la misma

manera la velocidad de corrosión y la tasa de corrosión varían entre ellas por lo tanto tenemos que en la probeta de suministro y de recocido obtenemos el menor valor de la tasa y velocidad de corrosión. Por otra parte, en la probeta de normalizado obtenemos una mayor tasa de corrosión seguidamente la muestra de tipo bonificado tiene la tasa de corrosión más alta con respecto a las muestras anteriores

La probeta de normalizado nos proporciona un valor intermedio en la dureza, esta mayor dureza se logró con la martensita que pertenece a la muestra de templado además en una fase dura y quebradiza formó un acero menos vulnerable. Podemos observar también que la ferrita de la probeta de suministro presenta valores altos en comparación con los granos de ferrita que muestran las probetas de recocido y normalizado, entonces, encontramos que en la microestructura compuesta por ferrita y Perlita se mejora la dureza de la probeta y al mismo tiempo se mejora la anticorrosión, disminuyendo las tasas que por lo generalmente puedan tener.

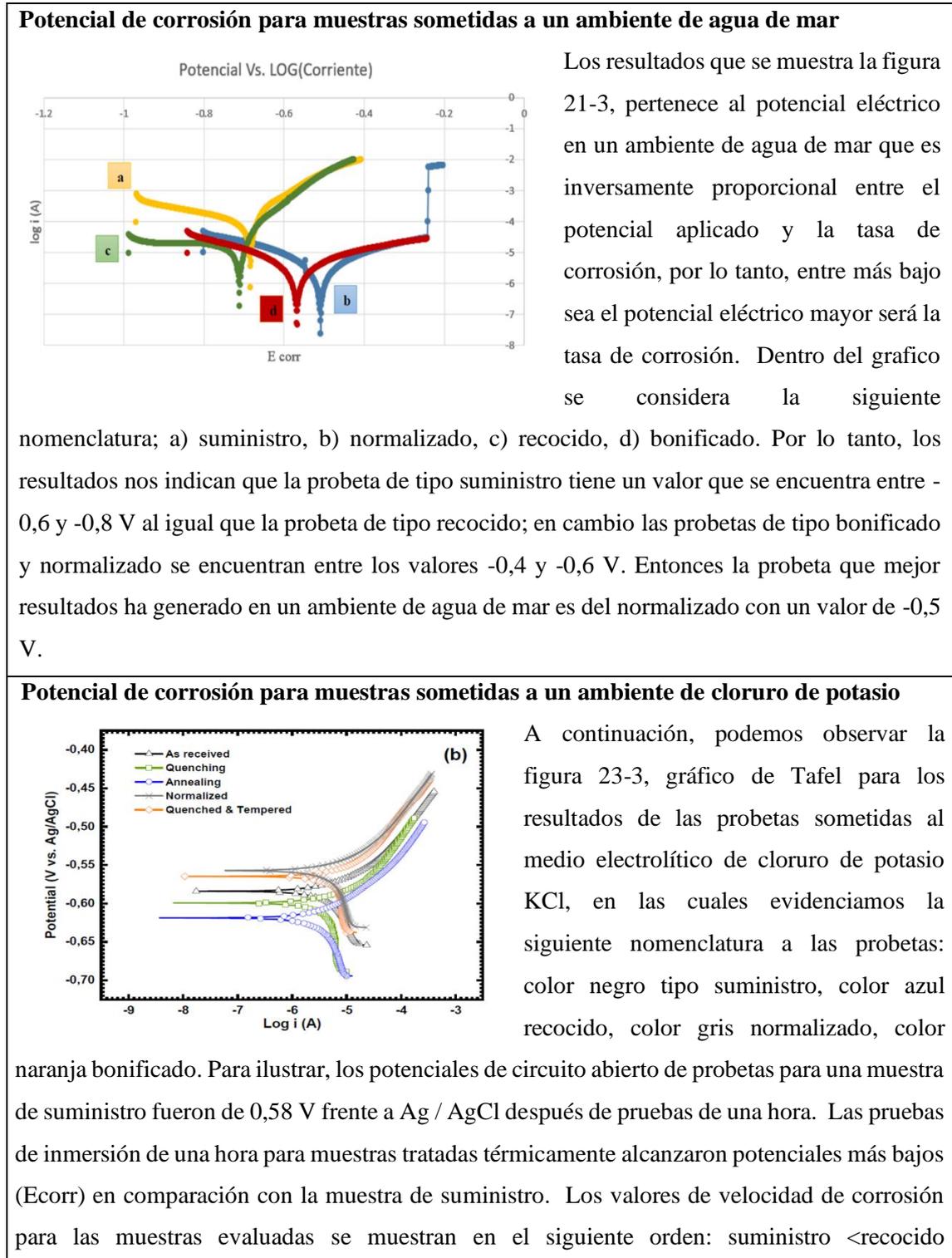
Las cantidades de cobre y cantidades considerables de manganeso ayudan a que los granos de ferrita aumenten su dureza y que se pueda disminuir la velocidad de corrosión. La alta disolución del manganeso y cobre en los granos de ferrita mejoran la dureza según los datos obtenidos de los ensayos Vickers por otro lado también tenemos el análisis de DS cantidades como: manganeso, molibdeno, cromo, distribuidos en las regiones de martensita y austenita mejora la templabilidad de los aceros con bajo contenido de carbono. Nosotros podemos observar que el porcentaje de manganeso en estas probetas, como son del bonificado no son tan altas como lo que se pudo observar en las muestras de suministro eso explica la variación en la tasa de corrosión por lo que es más bajo en la probeta de suministro que la probeta de bonificado.

Finalmente, las muestras normalizadas y templadas alcanzaron las tasas de corrosión más altas, podría atribuirse al hecho de que el cobre ya no forma parte de los granos de ferrita, para el caso de muestras normalizadas, como se ejemplifica en la Figura 12b. Por otro lado, los granos de ferrita tenían mayores contenidos de manganeso en la muestra normalizada que las regiones de austenita y martensita templada (en una muestra templada). Esta es la razón por la que la resistencia a la corrosión es mayor para las muestras normalizadas en lugar que las muestras templadas como se ve en la Figura 10a.

En resumen, no existe relación entre el porcentaje de inclusiones y la velocidad de corrosión para un acero API 5L X42 sumergido en un ambiente de cloruro con un pH cercano a un valor neutro. Por el contrario, la mejora de la dureza debido a la disolución de elementos como el cobre y el manganeso en las microestructuras de ferrita / perlita además el manganeso y molibdeno en las microestructuras de martensita / austenita, mejoró la resistencia a la corrosión.

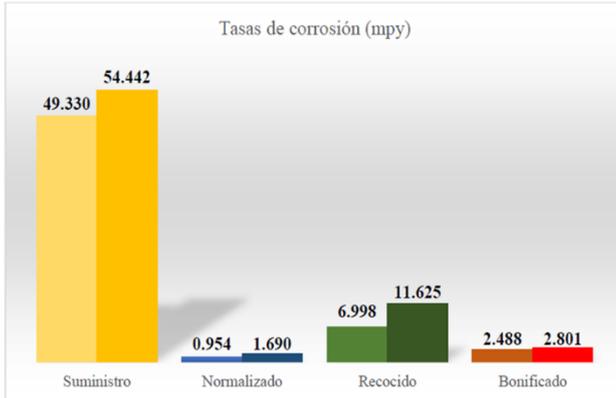
3.11 Resumen comparativo de los resultados finales obtenidos de la probeta API 5L X42 sometidos a dos electrolitos (agua de mar y cloruro de potasio)

Tabla 16-3: Resultados del potencial y tasa de corrosión sometido a electrolisis.



<normalizado <bonificado. Estos resultados sugieren que las probetas de tipo recocidos y normalizado responden efectivamente al ataque corrosivo en ambientes de cloruro.

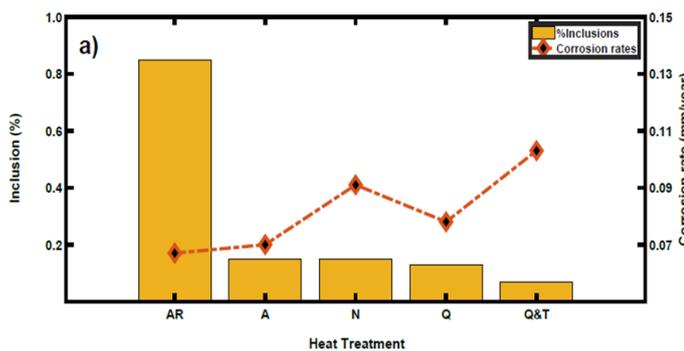
Tasas de corrosión sometidas a un ambiente de agua de mar en función de su velocidad (mpy)



A través de la figura 22-3 podemos evidenciar lo mencionado anteriormente, por lo tanto, en esta ocasión se presenta un gráfico de la velocidad de corrosión en mpy (mili pulgadas por año). Se evidencia que la mayor velocidad de corrosión la tiene la probeta de suministro con valores entre 49.330 - 54.442 mpy,

seguidamente tenemos a las probetas las cuales se les ha sometido un tipo de tratamiento térmico a la probeta de suministro, por lo cual las probetas de normalizado, recocido y bonificado presentan valores de tasa de corrosión por debajo del 11.625 mpy. Finalmente podemos aseverar que la probeta de tipo normalizado resiste satisfactoriamente a la velocidad de corrosión un medio electrolítico, como es el agua de mar con un resultado entre 0.954 - a.690 mpy.

Tasas de corrosión sometidas a un ambiente de cloruro de potasio KCl en función de su velocidad (mm/year)



En función de la velocidad de corrosión obtenida por cada probeta en milímetros por año (mm/year) que ha sido sometido a un ambiente electrolítico de cloruro de potasio se obtiene los siguientes resultados como

indica en la figura 24-3, la probeta de suministro presenta alto porcentaje de inclusiones, pero presenta una baja tasa de corrosión (0,07mm/year) por otro lado la probeta de bonificado (Q&T) presenta una tasa de inclusión baja pero la tasa de corrosión es alta en su superficie (0,11mm/year), la muestra de recocido logró tasas bajas de corrosión (0,07mm/year) y resultados bajos en el porcentaje de inclusiones, finalmente para las muestras de normalizado sus resultados en porcentaje de inclusiones son significativamente similares a las anteriores muestras tratadas térmicamente, pero en cuestión a la tasa de corrosión, esta se encuentra por

encima del 0,09mm/year por lo tanto no se obtuvieron las mismas velocidades de corrosión en las distintas muestras; es así, que podemos aseverar que el porcentaje de inclusiones no tienen una consecuencia significativa en las tasas de corrosión con un ambiente de cloruro pH neutro, donde la probeta de recocido (A) responde satisfactoriamente.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

3.11.1 Comparación del acero API 5L X42 bajo dos ambientes electrolíticos en función de la tasa de corrosión.

Tabla 17-3: Comparación de la tasa de corrosión obtenida de los ambientes electrolíticos.

Comparación tasa de corrosión bajo dos ambientes electrolíticos					
Ambiente electrolítico	Tratamiento térmico				Unidad
	Suministro	Recocido	Normalizado	Bonificado	
Agua de mar	0.32	0.03	0.24	0.07	mm/year
Cloruro de potasio	0.07	0.07	0.09	0.11	

Fuente: (Villavicencio, y otros, 2020) (Yancha, y otros, 2021)

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

La Tabla 17-3, muestra la comparación de la tasa de corrosión entre las probetas sometidas a los ambientes agua de mar y el cloruro de potasio en sus diferentes tratamientos térmicos. Los resultados indican que la probeta de tipo normalizado (para la probeta sometida a agua de mar) presenta el valor más bajo con un resultado de (0.03 mm/year) en cambio para el ambiente electrolítico de cloruro de potasio la probeta de tipo recocido en quien muestra mayor resistencia a la corrosión con un valor de (0,07 mm/year); se puede evidenciar el resultado mencionado con la figura 5-3 que se encuentra a continuación.

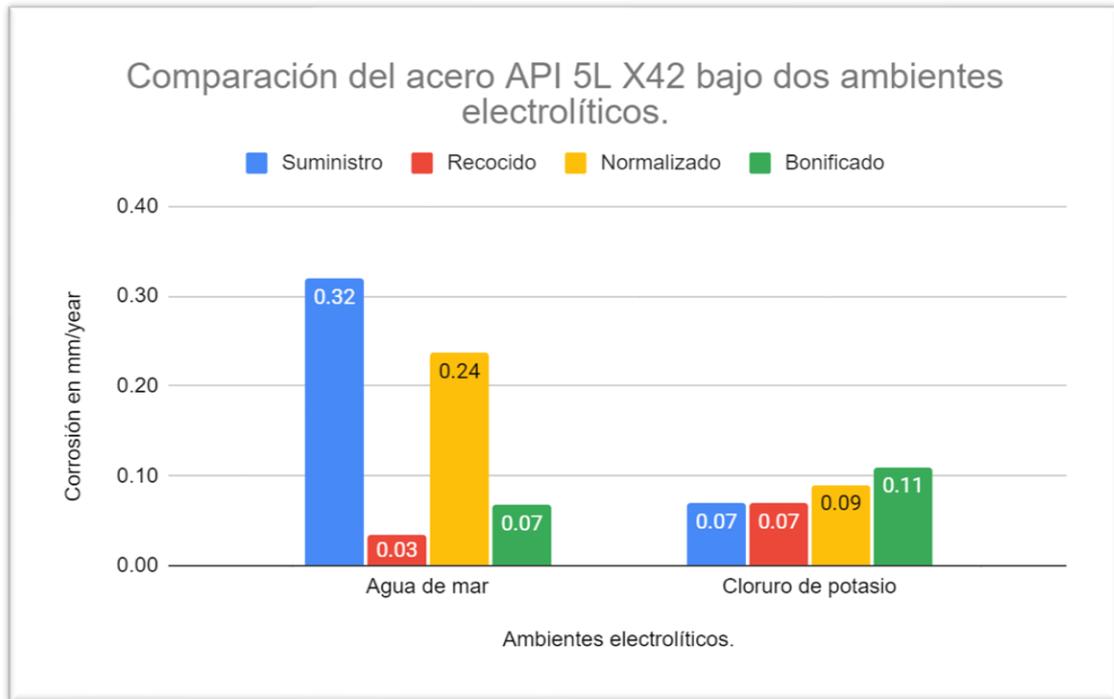


Gráfico 5-3: Grafico comparativo de la tasa de corrosión bajo dos ambientes electrolíticos.

Realizado por: Ilbis P. Alex, 2021

El gráfico 5-3 el cual presenta una comparación de las probetas con su respectivo tratamiento térmico los cuales son recocido, normalizado y bonificado; adicional se compara con la probeta de tipo suministro el cual no tiene ningún tratamiento térmico aplicado. Esta gráfica pretende describir de una manera visual los valores que se describieron en la tabla 17-3; y es aquí donde evidenciamos que la probeta de tipo recocido presenta mejores características en la resistencia a la corrosión con valores menores a 0.07 mm/year.

CONCLUSIONES

Al analizar los tratamientos térmicos de bonificado, normalizado y recocido a cada una de las probetas se observó el cambio microestructural que sufren estos aceros mejorando considerablemente sus propiedades mecánicas y químicas demostrando mayor resistencia a la corrosión, por ejemplo, el acero de tipo suministro presenta menor resistencia a la corrosión en comparación con las probetas ensayadas, la probeta de tipo recocido presenta la tasa de corrosión más baja en ambos casos.

Las probetas tratadas con un ambiente electrolito de KCl a 0.1M (cloruro de potasio) presentan formaciones en la superficie de óxidos de aluminio las cuales aumentan la corrosión de tipo picadura. Los valores más altos de óxido de aluminio se obtuvieron en la probeta de suministro, sin embargo, en los resultados sus tasas de corrosión y velocidad de avance son muy bajas en comparación con las probetas de bonificado y normalizado.

Las probetas que muestran una mayor resistencia a la indentación se obtiene resultados favorables en cuanto al proceso destructivo de la corrosión, esto se debe, a la alta dureza que proporcionan la superficie del material tratado térmicamente; una fase dura con mayor contenido de martensita ayuda a que la probeta sea menos vulnerable ante la corrosión.

Las probetas que fueron sometidas a ensayos de inmersión en una disolución de descomposición por la acción de una corriente eléctrica continua en un ambiente electrolito de KCl a 0,1M (cloruro de potasio) muestran mayor resistencia a la corrosión debido a la presencia de altas cantidades de cobre y cantidades considerables de manganeso las cuales se encuentran en los granos de ferrita, aumentan la dureza del material, reduciendo la tasa de corrosión en la superficie de las probetas, además en las pruebas EDS se encontró manganeso, molibdeno y cromo distribuidos en las regiones de martensita y austenita, por lo que podemos concluir que la presencia de manganeso mejora la templabilidad de los aceros de bajo carbono.

Las probetas con un tratamiento térmico de recocido, presentaron mejores resultados a los ensayos de corrosión con un 2,54% en comparación las probetas de tipo suministro, adicional un 49.99% en comparación a la probeta que tiene un tratamiento de tipo bonificado; estos resultados y conclusiones pertenecen a las probetas sumergidas en un ambiente electrolítico de agua de mar.

Los tratamientos térmicos más aptos para aceros API 5L X42 que se utilicen en extracción o transporte de crudo y a su vez se encuentren en condiciones electroquímicamente similares al agua de mar deben contar con procesos térmicos de normalizado en cambio para condiciones ambientales electroquímicamente similares al cloruro de potasio KCl, las probetas en estado de

suministro llegan a ser las más óptimas para su utilización, cabe mencionar que un tratamiento térmico de recocido para este caso es muy favorable ya que incurre a la formación de perlita que presenta una protección a la superficie del acero y disminuye significativamente las tasas de corrosión y su velocidad de avance.

RECOMENDACIONES

Para que las curvas de polarización no se vean afectadas de manera significativa se recomienda que pueda utilizarse un regulador de voltaje en cada uno de los ensayos, si no se cuenta con esta herramienta puede producirse cambios en el análisis del OCP (Open Circuit Potencial).

Se recomienda que cada uno de los ensayos puedan ser realizados bajo supervisión controlada para obtener los resultados deseados, desde el inicio de todo el procedimiento con monitoreo en los diferentes campos del avance para el acero y su mejoramiento microestructural & químico.

Al conocer que las inclusiones son propiciadoras de generación de una rápida formación de corrosión, se recomienda que en ambos casos pueda analizarse cada probeta mediante EDS, así detectar con mayor eficiencia las inclusiones tratadas térmicamente, esto previo al ensayo de corrosión electroquímica y disminuir la tasa (avance) del proceso destructivo del acero (corrosión).

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, R. & REINA, A. "Evaluación de problemas de corrosión en tuberías de una central hidroeléctrica" [en línea], 2014, (Cuba) 34(1), pp. 2-10. [Consulta: 02 febrero 2021]. ISSN: 2224-6185. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852014000100001&lng=es&nrm=iso

AHMAD, Z. *Principles of corrosion Engineering and Corrosion Control* [en línea]. Burlington-USA: Elsevier Ltd., 2006. [Consulta: 12 febrero 2021]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=10U1CRPV_BUC&lpg=PP2&ots=GEp1EfgqvP&dq=Principles%20of%20corrosion%20Engineering%20and%20Corrosion%20Control&lr&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q=Principles%20of%20corrosion%20Engineering%20and%20Corrosion%20Control&f=false

ALVES, V., BRETT, C. & CAVALEIRO, A. "Influence of heat treatment on the corrosion of high speed steel." *Revista de Electroquímica Aplicada* [en línea], 2001, (Suiza) 31, p. 65-72 [Consulta: 10 febrero 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1023/A:1004157623466>.

MOROCHO ARROBA, Priscila Mercedes, & ORDOÑES LEÓN, Judith Patricia. Tratamiento de aguas subterráneas para consumo rural a través del análisis de la alternativa de desinfección con hipoclorito de sodio producido in situ. (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química. Guayaquil, Ecuador. 2020. pp. 48 [Consulta: 04 febrero 2021]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45799>

ASKELAND, D. & WRIGHT, W. *Ciencia e ingeniería de materiales* [en línea]. 7ma. Ciudad de México-México: Vacha, S.A., 2012. [Consulta: 05 febrero 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/42140323/Ciencia_e_ingenieria_de_materia_Askeland_Donald_R_Wright_We_Not_mine_

AVNER, S. *Introducción a la metalurgia física* [en línea]. 2da. México: Mc Graw Hill, 1988. [Consulta: 07 febrero 2021]. Disponible en: <https://fddocuments.in/document/avner-2ed-introduccion-a-la-metalurgia-fisica.html?page=3>

BENAMOR, A., GOMA, A., NASSER, M. & HUSSEIN I. "Effect of temperature and fluid speed on the corrosion behavior of carbon steel pipeline in Qatari oilfield produced water". Elsevier [en línea], 2018, (Qatar) 808, pp. 218-227. [Consulta: 5 febrero 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.12.009>

BURSTEIN, G., LIU, C., SOUTO, R. & VINES, S. "Origins of pitting corrosion". *Corrosion Engineering, Science and Technology* [en línea], 2013, (USA) 39, pp. 25-30. [Consulta: 09 febrero 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1179/147842204225016859>.

CALLISTER, W. *Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales* [en línea]. 2da. Barcelona-España: Reverte, S.A., 2016. [Consulta: 09 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.reverte.com/media/reverte/files/book-attachment-2717.pdf>

CASTRILLÓN, A. & TORRES, M. *Ensayo de dureza* [en línea]. Bogotá-Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2017 [Consulta: 02 febrero 2021]. Disponible en: https://issuu.com/pujaveriana/docs/ensayos_de_dureza_-_sampler

CORTE MORQUECHO, Daniel Estuardo. Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua a 3,5% de cloruro de Sodio (Trabajo de titulación). [en línea]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil-Ecuador. 2010. pp. 25-37. [Consulta 13 febrero 2021]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31453>

CHULCO YANCHA, Jaime Enrique & TACURI TROYA, Jefferson Miguel. Efectos del carbonato y bicarbonato en la resistencia a la corrosión en aceros API 5L con tratamientos térmicos de recocido, normalizado y bonificado (Trabajo de titulación). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica. Riobamba-Ecuador, 2021. pp. 56-64. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: <http://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/15099>

CUETO, Esther García. Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado. (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad de Cantabria, Escuela técnica y superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, Cantabria, Madrid. 2016. pp. 25-30.[Consulta: 15 febrero 2021].Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9156/386972.pdf?sequence=1>

DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias Químicas. Mexico. 2008. pp. 42-53. [Consulta 11 marzo 2021]. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/principios%20de%20electrolisis.pdf

DÍAZ, Melvin, SÁNCHEZ, Ervinxon & GARCÍA, Emilio. *Libro de corrosión* [blog]. Venezuela: 31 julio 2014. [Consulta: 16 febrero 2021]. Disponible en: <https://librodecorrosion.wordpress.com/>.

DÍEZ SILANES, José, VARA SALAZAR, Gemma & VEGA VEGA, Jesús. *Evaluación de la corrosión mediante métodos electroquímicos como alternativa a la niebla salina* [blog]. Francia: Asociación de industrias de acabados de superficies, 17 julio de 2019. [Consulta 10

marzo 2021]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/251996-Evaluacion-corrosion-mediante-metodos-electroquimicos-como-alternativa-niebla-salina.html>

FLORES MALDONADO, Luis José. Los aceros y sus aplicaciones (Trabajo de titulación). (Maestría). [en línea]. Universidad Autónoma Nuevo León, Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica. Nuevo Leon, Mexico: 1996. pp. 31-35 [Consulta: 17 febrero 2021]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>

GORDO, A. & PIRIS, N. *Ciencia de materiales para ingenieros* [en línea]. Madrid-España: Pearson Educación, S.A., 2012. [Consulta: 20 febrero 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/39486152/Ciencia_de_materiales_para_ingenieros

JIMENEZ SALAZAR, J. "Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)". *Tecnología en Marcha* [en línea], 2015, (Costa Rica) 28(3), pp 137-133. [Consulta: 25 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>

LÓPEZ CARGUA, Carlos Vinicio. Optimización de la resistencia a la corrosión de un bronce al aluminio en un ambiente corrosivo controlado (Trabajo de titulación). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2019. Riobamba-Ecuador. 2019. pp. 25-36 [Consulta: 17 febrero 2021]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/13538/1/15T00723.pdf>

MONTES, O., SALDAÑA, R., REYES, F., ZAMBRANO, P., ESTUPIÑÁN, F. & ALMERAYA, F. "Comportamiento a la corrosión del acero API X70 soldado por el proceso de doble arco sumergido inmerso en diferentes medios corrosivos". *Soldagem & Inspeção* [en línea], 2016, (México) 21(2), pp. 172-184. [Consulta: 13 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/si/a/VfSFvkcpvHBwncpFKYjkVxK/?format=pdf&lang=es>

MONTGOMERY, D. *Diseño y análisis de experimentos* [en línea]. 2da. México: Limusa Wiley, 2004. [Consulta 24 febrero 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/9101936/Dise%C3%B1o_y_an%C3%A1lisis_de_experimentos_Douglas_C_Montgomery

NEWELL, J. *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería* [en línea]. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A., 2011. [Consulta 26 febrero 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/42972509/Ciencia_de_Materiales_Aplicaciones_en_ingenier%C3%ADa_James_Newell

OLVERA, E., GENESCA, J. & FLORES, J. "Efecto del flujo turbulento sobre el proceso de corrosión por CO₂ y la determinación de la eficiencia de inhibidores de corrosión". *Omnia Science*

[en línea], 2015, (España). pp. 103-109. [Consulta 03 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ed037p14>. DOI: 10.1021 / ed037p14.

OSPINA LOPEZ, R., AGUIRRE CORRALES, H. y PARRA, H. "Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles". *Scientia Et Technica* [en línea], 2007, (Colombia) 1(34), pp. 273-278. [Consulta 19 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.22517/23447214.5571>

PEREZ PATIÑO, Juan Antonio. Tratamientos térmicos de los aceros (Trabajo de titulación) (Maestría). [en línea] Universidad Autonoma Nuevo Leon, San Nicolas de la Garza, N. L. 1996. pp. 45-56. [Consulta 15 marzo 2021]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>

PINZON, William Alexander & ROSERO, Gustavo. Análisis de las propiedades Mecánicas de tensión, tenacidad y dureza de un acero SAE 1045 mediante los procesos de tratamiento térmico de temple, criogenia y revenido (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Bogotá-Ecuador. 2017. pp. 22-36. [Consulta 07 marzo 2021]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6032/PinzonWilliamAlexander2017RamosRoseroGustavo2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

POPOV, B. *Corrosion Engineering Principles and Solved Problems* [en línea]. South Carolina-USA: Elsevier, 2015. [Consulta 01 marzo 2021]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=FiAtBAAAQBAJ&lpg=PP1&ots=ogTT6P4MtR&dq=Popov%2C%20B.N.%202015.%20Basics%20of%20Corrosion%20Measurements&lr&hl=es&pg=PR3#v=onepage&q=Popov,%20B.N.%202015.%20Basics%20of%20Corrosion%20Measurements&f=false>

REGALADO, V. *Temas selectos de química 2* [en línea]. México: Grupo Editorial Patria, 2016. [Consulta 09 marzo 2021]. Disponible en: <https://idoc.pub/documents/temas-selectos-de-quimica-2-victor-manuel-ramirez-regalado-143gydv2qjnj>

SÁENZ RODRÍGUEZ, Juan Carlos & CIFUENTES CASTILLO, Jorge Iván. Conceptos básicos de tratamientos superficiales aplicados al mantenimiento (Trabajo de titulación) (Maestría). [en línea] Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Estudio de Postgrado de Ingeniería. Guatemala. 2017. pp. 10-15. [Consulta 18 marzo 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/34356366/Conceptos_B%C3%A1sicos_de_Tratamientos_Superficiales_Aplicados_al_Mantenimiento_2_-_Ing._Juan_Carlos_S%C3%A1enz_Rodr%C3%ADguez

SANTOS, E., YENQUE, J., ROJAS, W. & ROSALES, V. "Acerca del ensayo de dureza". *Industrial Data* [en línea], 2001, (Perú) 4(2), pp. 36-49. [Consulta 22 marzo 2021]. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6768>

SMITH, W. & HASHEMI, J. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* [en línea]. 4ta. México: Mc Graw - Hill Interamericana editores, 2006. [Consulta 09 marzo 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/39261016/Fundamentos_de_la_ciencia_e_ingenier%C3%ADa_de_materiales_4th_Edition_Fundamentos_de_la_ciencia_e_ingenier%C3%ADa_de_materiales_P%C3%A1gina_1_de_5_Troud

SZUMMER, A., JANIK-CZACHOR, M. & HOFMANN, S. "Discontinuity of the passivating film at nonmetallic inclusions in stainless steels". *Materials Chemistry and Physics* [en línea], 1993, (Polonia) 34(2), pp. 181-183. [Consulta 16 marzo 2021]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(93\)90210-D](https://doi.org/10.1016/0254-0584(93)90210-D)

VÁZQUEZ, Marcela. *La corrosión, El peor de los villanos cuando dominan los metales* [en línea]. Mar de Plata-Argentina: EUDEM, 2018. [Consulta 16 marzo 2021]. Disponible en: http://www2.mdp.edu.ar/attachments/article/281/la_corrosion.pdf

VILLAVICENCIO, J., ULLOA, N., LOZADA, L., MORENO, M. & CASTRO, L. "The role of heat treatments, non-metallic inclusions, and microstructure on the corrosion resistance of an API 5L X42 steel". *Journal of Materials Research and Technology* [en línea], 2020, (Ecuador) 9(3), pp. 5894-5911. [Consulta 11 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.116>

VILORIA RIVAS, Luis Carlos & BOHÓRQUEZ PETRO, Luis Fernando. Efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero AISI 4140 (Trabajo de titulación). [en línea]. Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecánica. Córdoba-Colombia, 2018. pp. 25-41. [Consulta: 06 marzo 2021]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/666/TRABAJO%20DE%20GRADO-%20VILORIA-BOHORQUEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>