



**Análisis y caracterización de causas de falla en tubería de serpentines de tanques
tipo reactor para planta de aceites y grasas vegetales.**

William Alberto Londoño Beltrán.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

**Análisis y caracterización de causas de falla en tubería de serpentines de tanque
tipo reactor para planta de aceites y grasas vegetales.**

William Alberto Londoño Beltrán.

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
Ing., John Ríos

Línea de Investigación:
Caracterización de Materiales

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, Noviembre 2023.

Contenido

Pág.

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
Antecedentes	17
Objetivos	23
<i>Objetivos específicos</i>	23
<i>Justificación</i>	23
Capítulo I.	25
Marco teorico	25
1.1 Marco conceptual	25
1.1.1 Composición química - Espectrometría de emisión atómica	25
1.1.2 Ensayo de tensión para materiales metálicos	26
1.1.3 Porcentaje de elongación.....	28
1.1.4 Análisis metalográfico.....	29
1.1.5 Microscopia electrónica de barrido SEM	30
1.1.6 Dureza Vickers	31
1.1.7 Prueba de magnetismo y reacción con ácido clorhídrico	31
1.1.8 Difracción por rayos X	32
1.1.9 Causantes de corrosión	32
1.2 Estado del arte	33
1.2.1 Ensayo de Composición química aleaciones metálicas.....	34
1.3 Ensayo de macrografía	35
1.4 Ensayo de micro dureza	37
1.5 Fallas en tubería por corrosión	38
Capitulo II.	47
Diseño Metodologico	47
2.1 Diagnóstico inicial.....	49
2.1.1 Primer - Aspectos técnicos	49
2.1.2 Segundo - Aspectos ambientales	51
2.1.3 Tercer - Aspectos administrativos	51
Capitulo III.	54

Resultados y análisis	54
3.1 Resultados del ensayo espectrometría de emisión atómica.....	54
3.1.1 Análisis de resultados de la espectrometría.....	55
3.2 Resultados del ensayo de tensión.....	57
3.2.1 Análisis de resultados del ensayo de tracción.....	58
3.2.2 Porcentaje de elongación.....	59
3.3 Resultados del análisis metalográfico.....	62
3.4 Resultados por Dureza Vickers.....	63
3.5 Resultados y análisis morfológico de la superficie del daño.....	64
3.6 Análisis metalográfico transversal.....	67
3.7 Prueba de magnetismo y reacción con ácido clorhídrico.....	68
3.8 Resultados de la difracción por rayos X.....	69
3.9 Corrosión influenciada microbiológicamente.....	74
Conclusiones	78
Anexos	79
5.1 Anexo 01. Reporte de servicio- Análisis de agua.....	79
Referencias Bibliográficas.....	81

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1- 1 Sección para localizar area de corte para prueba de tensión	27
Figura 1- 2 Dimensiones para probeta según norma ASTM E8.....	27
Figura 1- 3 Modelos de microscopia electrónica para elemento Ti y Co.	34
Figura 1- 4 Macrografía de la sección longitudinal.	36
Figura 1- 5 Detección de penetración para la varilla de succión.	40
Figura 2- 1 Ruptura de tubería de serpentín en uso.	51
Figura 2- 2 Daño externo en tubería de serpentín.....	52
Figura 2- 3 Corrosión interna en la tubería de serpentín.	52
Figura 2- 4 Reparaciones en los daños de las curvas de la tubería.	53
Figura 3- 1 Curva de fuerza vs elongación	57
Figura 3- 2 Diagrama esfuerzo vs Deformación por Tracción	58
Figura 3- 3 Microestructura ferrita y perlita (a) a 200X y (b) a 400X.....	62
Figura 3- 4 Análisis fractográficos en zona de falla	64
Figura 3- 5 SEM en el interior de las picaduras.....	66
Figura 3- 6 SEM microestructura de la tubería.....	67
Figura 3- 7 Macrografía en zonas de daño por picadura	67
Figura 3- 8 Campo magnéticos y ácido	69
Figura 3- 9 Difractograma de productos de corrosión adheridos a la tubería.....	70
Figura 3- 10 Comparación de compuestos.....	71
Figura 3- 11 Superposición.....	72
Figura 3- 12 Corrosión del tubo cara interior.	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1- 1 Dureza Vickers (HV).....	35
Tabla 1- 2 Resultados de dureza (VC).....	41
Tabla 3- 1 Resultados de composición química	54
Tabla 3- 2 Composición del acero ASTM A213	57
Tabla 3- 3 Resultados del ensayo de tensión	58
Tabla 3- 4 Dimensiones	58
Tabla 3- 5 Propiedades mecánicas	59
Tabla 3- 6 Requerimientos de tensión	59
Tabla 3- 7 Micro Dureza Vickers	63
Tabla 3- 8 Análisis fractográficos en zona de falla.....	65
Tabla 3- 9 Tabla de Resultados de difracción de rayos X	70
Tabla 3- 10 Resultados de análisis de agua positivo para bacteria sulfato reductoras	75

(Dedicatoria)

Dedicaré este proyecto a Dios, a mi hermosa esposa que me ha respaldado siempre, a mis hijos por su motivación y los docentes de la universidad por compartir su conocimiento.

William Londoño

Resumen

Con el propósito de obtener un mejor diagnóstico a este tipo de fallas, se llevó a cabo, pruebas de composición química en aleaciones metálicas, ensayos de micro dureza, pruebas de metalografía, pruebas de tensión a temperatura ambiente, pruebas de difracción de rayos; culminando con una interpretación de resultados para caracterizar los causantes de las fallas en la tubería. Las anteriores pruebas y ensayos estarán basados en la normatividad ASME E15, ASTM E384, ASTM A370, ASTM E415 y metalográfica E2.

Las anteriores pruebas y ensayos permitieron determinar la causante de falla que se presentan en la tubería debido a su operación, temperatura, corrosión, erosión y fricción. Los resultados del trabajo permitieron realizar un diagnóstico de aspectos que afectan la tubería y elaborar recomendaciones basados en el estudio de falla para brindar una mayor vida útil a estos equipos, así como evitar paradas en la planta por desconocimientos de los síntomas que presenta la tubería antes de su rotura permitiendo obtener criterios técnicos.

PALABRAS CLAVE: Investigación, Análisis De Falla, Defectología, Corrosión.

Abstract

In order to obtain a better diagnosis of this type of failures, chemical composition tests on metallic alloys, micro hardness tests, metallography tests, tension tests at room temperature, ray diffraction tests were carried out, culminating with an interpretation of the results to characterize the causes of the failures in the piping. The above tests and trials will be based on ASME E15, ASTM E384, ASTM A370, ASTM E415 and metallographic E2 standards.

The above tests and trials allowed to determine the cause of failure that occur in the pipe due to its operation, temperature, corrosion, erosion and friction. The results of the work allowed to make a diagnosis of aspects that affect the piping and to elaborate recommendations based on the failure study to provide a longer useful life to these equipments, as well as to avoid stops in the plant due to ignorance of the symptoms that the piping presents before its breakage.

KEYWORDS: Research, Failure Analysis, Defectology, Corrosion.

Introducción

Como investigación dentro de la línea de materiales y como enfoque para la investigación desde la Ingeniería Mecánica, se elaboró una investigación basada en el Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME (BPVC) es un código que establece directrices para el diseño, la fabricación y la inspección de las calderas y los recipientes a presión. Un componente a presión diseñado y fabricado de acuerdo con esta norma tendrá una larga vida de servicio útil que asegura la protección de la vida humana y la propiedad privada como lo son las plantas de proceso y los equipos que le rodean [1]. El código ASME BPVC está escrito por voluntarios, que son nombrados en base a su experiencia, estudios, conocimientos técnicos y su capacidad para contribuir a la redacción, revisión, interpretación y administración del documento.

En la actualidad, los casos de fallas han ocasionado pérdidas económicas, lo que ha generado que se utilice el análisis de falla como una herramienta fundamental en el desarrollo del conocimiento en cuanto a determinar la vida útil de los elementos y saber las causas que ocasionó las diferentes fallas en los sistemas.

Los estándares ASTM son un conjunto de principios elaborados por consenso con el objetivo de brindar un marco de calidad y competitividad aplicada a la investigación, desarrollo y fabricación de productos de diversa índole. Actualmente los lineamientos básicos para realizar ensayos mecánicos a materiales ferrosos se encuentran en los estándares:

ASTM A370/ASME SA-370 Métodos de ensayo normalizados y definiciones para los ensayos mecánicos de productos de acero [2].

ASTM E23 Métodos de ensayo normalizados para el ensayo de impacto de barra entallada de materiales metálico [3].

ASTM E8/E8M Métodos de ensayo normalizados para la comprobación de la tensión de materiales metálicos [4].

ASTM A1058 Métodos de ensayo para pruebas mecánicas de productos de acero métricos [5].

ASTM A106 Especificación estándar para sin soldadura [6]

Como un primer capítulo se define los conceptos, sobre los ensayos y pruebas a realizar, se recopiló información sobre las fallas de tubería con alta presión.

Dentro de un segundo capítulo se realizó un diagnóstico de las causas que provocan rupturas y puntos de fuga en la tubería, del cual se originó varios análisis en el material de estudio, del cual se hizo análisis de laboratorio sobre ensayo mecánico, análisis metalográfico, prueba de dureza Vickers, análisis morfológico, magnetismo y difracción por rayos X.

Como un tercer capítulo, se indican los ensayos y pruebas realizadas, complementándose con los resultados de laboratorio. En este capítulo se presenta la simulación de una sección del tanque con la finalidad de observar el comportamiento de la sustancia a ciertos rangos de presión y temperatura.

Un capítulo cuatro, el cual corresponde al análisis y resultado obtenido de los ensayos y pruebas de laboratorio.

Antecedentes

Para la construcción de los antecedentes, se hizo una búsqueda de información a nivel nacional y algunas investigaciones a nivel internacional.

Antecedentes Nacionales

Los autores Tellez Harold y Rengifo Jorge 2018, por medio de la observación y análisis detallado y con metodologías basadas en metalografías con unas receptivas pruebas de dureza, logró diagnosticar fallas existentes en la tubería usada en la caldera de café, para ello se identificó las causas a raíz desde la microestructura de una sección del tubo y unas sin operar, comparación que permite definir el estado actual de la tubería y cuánto sería su afectación en dureza, dentro de las fallas localizadas se determinó las siguientes: fallas por corrosión por picaduras, intergranular, oxidación, corrosión y erosión. Concluyendo que la mayoría de fallas son producto del sobrecalentamiento de la tubería, el cual provocaba la expansión del material, permitiendo que se incrustaran algunas partículas que luego ocasionaban las grietas [7].

Castro y Ladino 2017, presentó un análisis de causa raíz del tipo RCA, de donde surge diversas anomalías que se presentaban en la tubería por el cual pasa gas y este, debido a su temperatura ocasionaba corrosión en codos y juntas sobre la superficie interna, en las partes soldadas se evidenciaba adelgazamiento de los cordones soldados [8]. Los autores usaron una metodología basada en caracterizar las muestras por micrografía, fractografía y un análisis por elementos finitos, todo lo anterior permitió disminuir costos en mantenimientos y operaciones técnicas para aumentar la vida útil de la tubería.

Espejo y J.C. Martinez, (2017), Ingenieros mecánicos de la universidad nacional de Colombia, analizaron la falla por agrietamiento experimentada en tuberías del evaporador

de una caldera acuotubular de una planta generadora de electricidad; han estudiado una serie de agrietamientos que se presentaban en los tubos del generador de vapor, que causaban fugas de vapor y paradas no programadas de mantenimiento, donde se examinó con base a esto y se llevó a laboratorio una serie de tubos de muestras las cuales presentaban fallas y otros tubos retirados de zonas similares de la caldera, sometiéndolos a estudios de composición química, metalografía, fractografía y difracción de rayos x [9]. Se encontró que la fisura se generó por corrosión bajo tensión; en las zonas del codo de las tuberías, las picaduras eran bastante severas en comparación a las zonas rectas, lo que quiere decir que los esfuerzos residuales causados por la deformación plástica aumentaron el problema, pero no fue la causa raíz, llegando a la conclusión que la causa más probable del fallo fue la utilización de la caldera con tuberías de dureza superior a lo recomendado por el código ASME.

Por otra parte, Y. ACUÑA P; et al. (2016) de la Universidad tecnológica de Bolívar, a partir del análisis de fallas en los tubos de calderas, se detectó una serie de causas que afectan el correcto funcionamiento de los fluidos que circulan dentro de la tubería, se les transmite calor, el cual, los hace más sensibles a una degradación potencial a causa de diversas tensiones mecánicas y térmicas, además de ataques potenciales del ambiente tanto en la parte de los fluidos como en la parte fuego/gas de los tubos [10]. De tal forma que se realizó un análisis metalográfico junto con ensayos de dureza mediante el método Vickers, donde se halló que la falla se produjo por termofluencia causada por el sobrecalentamiento de larga duración ocasionando así un adelgazamiento en las paredes del tubo en las zonas próximas a la ruptura.

El autor Velandia. (2022) De la Universidad ECCI, generó una propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para la caldera piro tubular de la empresa Frigorífico Valle De Tenza S.A, donde evaluó los tipos de mantenimientos realizados a la misma, para así poder definir una estrategia de mantenimiento preventivo basado en el historial de las fallas, de tal forma un mantenimiento específico a cada componente con el objetivo de dar mayor garantía del funcionamiento de la caldera; es así que por medio de la herramienta de análisis de modos y efectos de falla (AMEF) se aseguró el correcto funcionamiento de la caldera y, por ende, se disminuyó los elevados costos de mantenimiento [11]. También se pudo evidenciar la necesidad de modificar la hoja de vida del equipo donde se incluyó datos técnicos más detallados que permitieran hacer un análisis más minucioso para así poder desarrollar mejoras y posteriormente retroalimentar el AMEF.

Así mismo, [7], de la Fundación Universitaria Los Libertadores, en su tesis, Análisis de causa raíz de falla de un tubo de cobre y un racor de bronce perteneciente a una caldera de una máquina de café, se determinó algunas causas y efectos que venía presentando una sección de tubería junto al racor, por medio de un análisis detallado de estudios metalográficos y pruebas de dureza se llegó a la conclusión de que las fallas en las tuberías eran ocasionados por la inadecuada operación de la caldera, ya que se comprobó que los materiales utilizados en el sistema eran los adecuados para su correcto funcionamiento gracias a sus excelentes propiedades de resistencia a la corrosión y el desgaste, adicional a esto la soldadura aplicada no era la más adecuada impidiendo así el buen funcionamiento de la misma.

Antecedentes Internacionales

En Madrid, el autor Javier Diez 2015, en su proyecto de investigación hizo un gran aporte al definir según el proceso que se tiene de la tubería en categorías, con la finalidad de identificar qué tipos de presión y temperatura debe emplear y cuál de ellas presentará alguna falla; ya con una determinada categoría se define que análisis o procedimientos son requeridos y con ellos establecer su respectivo diagnóstico [12]. De la investigación se obtiene unos criterios que recomienda el autor como lo son: condiciones de operación, estudios realizados a la tubería antes de entrar en operación, normas que debe cumplir, fichas características de tubería empleada, ya con estos datos consolidados se establece la categoría para la tubería y así realizar su estudio de fallas.

En Cuba, el autor Diaz – Cedré 2018, realizó un estudio para determinar las fallas en un codo de acero inoxidable 316, donde determinó que esta pieza al ser ubicada en la zona de enfriamiento cerca al reactor, se presentaban fallas por sensibilidad a la corrosión intercrystalina, la corrosión por baja tensión y fatiga del material provocada por la presión, [13]. El análisis realizado parte de metalografía, mediciones de dureza y microscopia de barrido, permitiendo dar puntos de vista según el tamaño de grano, precipitados y grietas sobre las zonas a evaluar. Todo concluía en que la mayoría de cordones soldados no eran de calidad.

L. Contreras. Et al; 2015 De la Universidad Simón Bolívar de Venezuela, en su trabajo de análisis causa raíz de un sistema de generación de vapor, se estudió las fallas que estaba presentando una caldera de la planta de producción de MTBE y Metanol, que venía generando grandes pérdidas en la empresa ya que presentaban fugas internas debido a ruptura de tubos [14]. Se analizó estadísticamente las fallas del sistema de generación de

vapor para detectar los equipos críticos con alto índice de falla y así aplicar la metodología de análisis causa raíz para evaluar las fallas más importantes, de esta forma se construyó un árbol lógico basado en hechos y no en suposiciones, donde se evidenció la falta de mecanismos para la intervención del soplador de la caldera como también la falta de capacitación para el personal de mecánica.

El autor [15], del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en su Análisis de falla de un tubo colapsado del generador de vapor en la CTE Felton, estudió las causas que originan el fallo en las superficies de intercambio del generador de vapor y las paredes del mismo; donde se utilizó los métodos de diagnóstico y control de los metales preparando ocho muestras, seis de las cuales contenían material de las superficies averiadas y dos de ellas como muestras patrón, las cuales se le realizó análisis químicos y microestructurales teniendo en cuenta el régimen de trabajo al cual son sometidos, demostrando así por medio del análisis metalográfico la reducción del tamaño del grano, como también variaciones en la dureza de 130HV hasta 150HV en la zona colapsada, además, de la presencia de grietas internas y la formación de fases secundarias, igualmente se pudo observar el desplazamiento del material por deformación plástica debido a los cambios bruscos de temperaturas de operación disminuyendo exponencialmente sus propiedades elástico - plásticas del material y favoreciendo la generación de grietas durante los procesos de soldaduras.

Igualmente [16], De la Universidad Salesiana, en su tesis, Detección de fallas superficiales e internas en tuberías de alta presión para motores estacionarios por el método de ultrasonido, demostró que a través del tiempo se han generado técnicas y/o procesos que nos permiten evitar posibles daños o mal funcionamiento de los equipos, es así como la técnica del ultrasonido industrial ha resultado beneficiosa al encontrar defectos en las

tuberías de conducción de vapor, siendo los ensayos no destructivos una forma eficiente de comprobación de las condiciones en las que se encuentran las tuberías, estructuras y elementos de las máquinas. En el estudio se evidenció un mayor desgaste de las tuberías de conducción de agua que en las de vapor, a causa de un mayor tiempo de exposición que han sufrido las tuberías al fluido y también a la calidad del mismo. Se concluyó que la obtención de estos resultados mediante el método del ultrasonido es únicamente un paso para la valoración del material sometido a estudio; así mismo, los criterios de aceptación o rechazo establecen los límites para catalogar un elemento como desechable o utilizable.

Objetivos

Analizar y caracterizar las causas de falla en tubería de serpentines del tanque reactor para la planta de aceites y grasas vegetales de la empresa SIGRA S.A.S.

Objetivos específicos

1. Diagnosticar las fallas existentes en la tubería de serpentines del tanque reactor.
2. Realizar la caracterización de la tubería, composición química del material por medio de la norma ASTM E415 espectrometría de emisión atómica por chispa de acero al carbono de baja aleación.
3. Establecer fallas en el diseño de la tubería del reactor a partir de las condiciones de operación, el tipo de tubería y Schedule idóneo de la misma.
4. Realizar un análisis elemental del metal para determinar los posibles elementos presentes que estén favoreciendo la corrosión de la tubería.
5. Establecer las causas que ocasionan fallas en la tubería del tanque del reactor.

Justificación

Una mirada a las plantas de fabricación de productos alimenticios reflejó una gran cantidad de ocasiones en las cuales se debe realizar paradas de planta por rotura de tubería y posterior reparación. Los ingenieros de mantenimiento se esfuerzan en mitigar los daños que pueda causar un reventón, pero no en el estudio de la ingeniería del material deteriorado.

Por lo tanto, se proporcionó a la industria los resultados de la investigación, determinar las causas que pueden afectar al material y generar acciones que prolonguen la vida útil de los equipos.

El diagnóstico y estudio generado con la investigación permitió a los dueños de la planta SIGRA tomar decisiones que no contaminen o alteren las condiciones ambientales del entorno de trabajo, por lo que evitar estas fugas evitan el derrame de aceites y a su vez evitar algún accidente del personal que transite por las zonas cercanas a tuberías de la planta.

Llevar a cabo el uso de normas como las ASTM permitió realizar análisis de calidad que aportó al desarrollo de la investigación sobre los fallos en tubería que emplean altas presiones y temperaturas.

Capítulo I.

Marco teorico

1.1 Marco conceptual

Para comprender los términos usados se requiere calderas fabricadas con tubería de acero al carbono diseñadas y construidas para soportar altas presiones y temperaturas; a su vez, resistir los cambios físicos y químicos a los cuales se expone el material debido a:

Corrosión: Es la única causa que provoca que el material de los tubos se desprenda y contamine el fluido de transporte, además adelgaza la pared del tubo y provoca el agrietamiento, rupturas y puntos de paso; generando fugas del material transportado [17].

Debido a su origen, un equipo a presión puede presentar fallas que se clasifican en: Defectos inherentes son aquellos que se generan en el material durante la fase de producción inicial en estado de fundición. Inadecuado proceso de fundición incluyendo la fabricación. Uso del producto final por condiciones de carga o ambientales.

1.1.1 Composición química - Espectrometría de emisión atómica

Para este ensayo, se prepara los constituyentes del tramo de tubería son identificados mediante espectrometría de emisión óptica, una técnica que opera al excitar los átomos presentes en la muestra mediante un arco eléctrico. Este arco surge de la separación de los electrodos cuando se introduce una corriente eléctrica. Los átomos excitados liberan energía en forma de radiación, que luego es dispersada por un prisma de difracción o una rejilla. El resultado es la obtención de un espectro luminoso que exhibe características únicas para cada elemento.

Para el análisis cuantitativo, la intensidad de radiación representa la concentración del elemento presente en la muestra, obteniendo como resultado el contenido porcentual en masa para cada elemento.

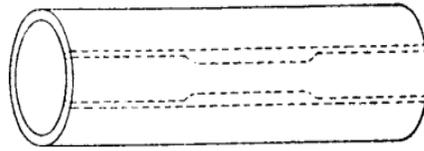
1.1.2 **Ensayo de tensión para materiales metálicos**

La prueba de tracción es una piedra angular de la caracterización de materiales y ofrece conocimientos profundos sobre el comportamiento mecánico y la integridad estructural de los materiales, particularmente en el contexto de las tuberías de acero. Las tuberías de acero, ampliamente utilizadas en diversas industrias que van desde la construcción hasta la energía, deben exhibir propiedades mecánicas robustas para soportar las tensiones y presiones que enfrentan durante el servicio. La prueba de tracción de tubos de acero proporciona un enfoque sistemático y estandarizado para evaluar atributos mecánicos clave, lo que permite a ingenieros, fabricantes e investigadores tomar decisiones informadas sobre la selección y el diseño de materiales.

El ensayo de tensión consiste en aplicar un esfuerzo axial de tracción, con velocidad de deformación constante a una probeta estandarizada hasta producir la rotura de esta. Mediante esta prueba se busca identificar diferentes características propias de cada material como la resistencia última, el límite de fluencia, módulo de elasticidad entre otros.

Para tomar las muestras, se debe extraer los especímenes con las dimensiones y ubicación del espécimen se deben cortar como se muestra a continuación.

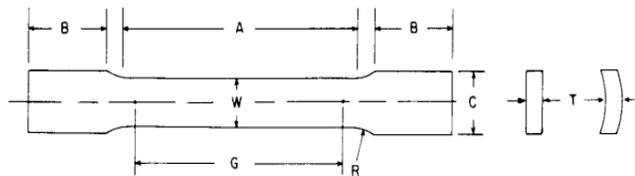
Figura 1- 1 Sección para localizar area de corte para prueba de tensión



Nota: Tomado de la norma ASTM E8.

Con la ayuda de la normativa ASTM E8 es posible establecer las dimensiones mínimas a las cuales se debe cortar un espécimen que va a ser sometido a ensayos de tracción, el cumplimiento de las dimensiones de corte serán de gran utilidad ya que se obtendrán datos estandarizados de esfuerzo y deformación, así como porcentajes de elongación mínimos requeridos por los estándares de fabricación de tubería de acero al carbono. Para usar la norma ASTM E8, se requiere de las siguientes dimensiones (ver figura 1-2):

Figura 1- 2 Dimensiones para probeta según norma ASTM E8.



	Dimensions						
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Specimen 6	Specimen 7
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	40.0 ± 2.0 [1.5 ± 0.125-0.25]	40.0 ± 0.2 [1.5 ± 0.125,-0.25]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]
T—Thickness	measured thickness of specimen						
R—Radius of fillet, min	12.5 [0.5]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]
A—Length of reduced section, min	60 [2.25]	60 [2.25]	230 [9]	60 [2.25]	120 [4.5]	60 [2.25]	120 [4.5]
B—Length of grip section, min (Note 2)	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	20 [0.75]	50 [2]	50 [2]	25 [1]	25 [1]	40 [1.5]	40 [1.5]

Nota: Tomado de la norma ASTM E8.

Luego, de realizada la prueba con las dimensiones anteriores, se obtiene los resultados de la curva stress/strain (tensión/deformación). Además, se puede obtener la siguiente información sobre las siguientes características del material de prueba:

- Límite proporcional.
- Módulo de elasticidad.
- Tensión módulo de endurecimiento.
- Última fuerza.
- Tensión máxima.
- Alargamiento de uniforme.
- Alargamiento porcentual.
- Porcentaje área.

1.1.3 Porcentaje de elongación.

Cálculo del % de elongación y reducción del área para cada tipo de material metálico.

$$\% \text{ elongación} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

Ecuación 1.1

$$\% \text{ Reduction in Area} = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} \times 100$$

Ecuación 1.2

Con las ecuaciones 1.1 y 1.2 se determina el porcentaje de elongación, el cual emplea galgas milimétricas el cual permiten obtener un valor con exactitud y con la reducción de área se considera el área original y la final luego de aplicada una carga.

1.1.4 Análisis metalográfico

El análisis metalográfico consiste en observar y determinar, mediante microscopía óptica, el tamaño de grano, forma y distribución de las fases y microconstituyentes, además de inclusiones no metálicas y precipitados de segunda fase, los cuales son componentes estructurales que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales; para esto, el ensayo se realiza siguiendo las especificaciones de ASTM E3-01 “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”.

En el ámbito de la ciencia de los materiales y la metalurgia, el acero es una aleación indispensable reconocida por su versatilidad, resistencia y adaptabilidad a una multitud de aplicaciones. Un aspecto fascinante del acero reside en su microestructura, que gobierna sus propiedades mecánicas y características de rendimiento. Dentro de este tapiz microestructural, dos fases distintas, a saber, ferrita y perlita, desempeñan papeles fundamentales en la configuración del comportamiento y la funcionalidad de la aleación

La ferrita, a menudo denominada hierro alfa, es un componente fundamental de las microestructuras de acero. Se caracteriza por una disposición de red cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC), que confiere cualidades de ductilidad y maleabilidad al acero.

Por su parte, la perlita representa una mezcla eutectoide de ferrita y cementita, que se forma como resultado del enfriamiento controlado o la transformación de la austenita. Esta microestructura laminar, que comprende capas alternas de ferrita y cementita, dota a la perlita de un equilibrio único entre resistencia y ductilidad. Su presencia tiene un gran impacto en la dureza, la resistencia a la tracción y la resistencia al desgaste del acero, lo que

lo convierte en una consideración fundamental en el diseño y la ingeniería de diversos productos de acero.

1.1.5 Microscopia electrónica de barrido SEM

Es difícil explicar las causas que se producen en un material, pero con la ayuda del microscopio electrónico de barrido se puede encontrar información que aporte al diagnóstico y origen de falla.

El microscopio electrónico de barrido (MEB) utiliza un haz de electrones de alta energía, que interactúa con la superficie de una muestra, para generar varias señales, estas definen la superficie con una imagen, el MEB utiliza electrones para generar una imagen de la superficie con medidas desde nanómetros hasta micrómetros [18].

El MEB utiliza un cañón que dispara un haz de electrones donde pasan por un anodo quien los ioniza para que su trayectoria sea como la de un haz, un lente magnético convierte el flujo de electrones en un haz más preciso, pasándolos por una bobina de barrido que posiciona los electrones sobre la superficie de la muestra.

El haz de electrones interactúa con la muestra una parte de esta muestra se refracta y se dirige al detector de electrones secundarios donde son analizados por el software para generar una imagen de la muestra.

El segundo detector es el de electrones retro dispersados este captura los electrones que provienen del cañón de electrones y se recuperan inmediatamente después de interactuar con la muestra generando una imagen, tanto los electrones secundarios como los de retro dispersión, el cual ayudan a producir una imagen de superficie y cuando se cuenta con EDS este puede medir la composición elemental del compuesto[19].

1.1.6 Dureza Vickers

A través de las pruebas de micro dureza, los metalúrgicos e ingenieros obtienen una comprensión más profunda de cómo factores como la composición de la aleación, los métodos de procesamiento y los tratamientos térmicos afectan las propiedades mecánicas del acero. Este conocimiento, a su vez, guía la selección de materiales, la optimización de procesos y el control de calidad en diversas industrias, incluidas la automotriz, aeroespacial, de construcción y manufacturera.

El ensayo de dureza Vickers consiste en la aplicación de una carga constante, que varía entre 1gf y 1Kgf, empleando un indentador piramidal con ángulo base de 136° . La carga es sostenida por un tiempo específico (entre 15 y 30 segundos), requeridos para garantizar que el flujo plástico del material permanezca constante.

1.1.7 Prueba de magnetismo y reacción con ácido clorhídrico

La realización de pruebas de magnetismo y reacciones con ácido clorhídrico en productos de corrosión puede proporcionar información valiosa sobre la naturaleza y composición de los productos de corrosión y ayudar en el diagnóstico del tipo de corrosión que se ha producido.

Estas pruebas son parte de un conjunto más amplio de técnicas utilizadas para caracterizar los productos de corrosión y comprender el proceso de corrosión. Al examinar las propiedades magnéticas y la reactividad ácida de los productos de corrosión, es posible

recopilar información sobre la composición, la naturaleza y posiblemente el mecanismo de corrosión subyacente.

1.1.8 Difracción por rayos X

La difracción de rayos x se da en materiales cristalinos, por presentar una estructura atómica repetitiva y periódica, los rayos x inciden sobre los átomos del primer plano de la red cristalina para luego ser dispersados un segundo rayo incide sobre los átomos del plano inferior o segundo plano para ser también dispersados, como los rayos x son una onda con longitud de onda características las ondas dispersadas deberán tener interferencia constructiva los picos máximos y los mínimos deben estar en fase, donde la amplitud de la onda resultante es la sumatoria de la amplitud de las ondas incidentes, por lo tanto para que las ondas estén en fase, los rayos forman un ángulo de incidencia el cual es igual que el ángulo de refracción.

Se analizarán las muestras de productos de corrosión adheridos a las paredes internas de la tubería para identificar especies o compuestos que conforman esa muestra y puedan ser causantes de corrosión, los patrones obtenidos con la difracción por rayos x se evaluarán usando el software HighScore Plus el cual cuenta con un gran número de cartas cristalográficas en su base de datos de fases posibles que se pueden encontrar en una muestra.

1.1.9 Causantes de corrosión

Se puede formar corrosión por picaduras bajo un depósito de alta adherencia debido a una combinación de factores relacionados con el depósito y el entorno local. Algunos ejemplos se muestran a continuación:

Celdas electroquímicas: la corrosión por picaduras es un proceso electroquímico. Ocurre cuando se forman pequeñas células electroquímicas localizadas en la superficie del metal. Estas células tienen áreas de regiones anódicas (corroídas) y catódicas (protegidas). En el contexto de un depósito de alta adherencia sobre acero, este depósito puede actuar como una barrera, creando celdas de aireación diferencial donde algunas áreas están expuestas al oxígeno y otras privadas de él.

Actividad microbiana: en algunos casos, la actividad microbiana puede estar asociada con depósitos. Los microorganismos pueden producir subproductos corrosivos o crear condiciones localizadas que promuevan la corrosión por picaduras.

Variación local en los niveles de oxígeno: los depósitos de alta adherencia pueden crear grietas o áreas con acceso restringido al oxígeno u otros oxidantes. Esto puede dar lugar a variaciones locales en los niveles de oxígeno en la superficie del acero debajo del depósito. Las áreas debajo del depósito que están privadas de oxígeno se vuelven anódicas, haciéndolas más susceptibles a la corrosión.

Iones de cloruro: se sabe que los iones de cloruro son particularmente agresivos al promover la corrosión por picaduras. Si el depósito contiene o atrapa iones de cloruro, puede acelerar significativamente el proceso de corrosión debajo del depósito. Los cloruros pueden penetrar las grietas e iniciar picaduras.

1.2 Estado del arte

En lo que compete al estado del arte, se hizo una investigación con relación a estudios relacionados con los temas tratados en la investigación, desde su composición química.

1.2.1 Ensayo de Composición química aleaciones metálicas.

En los últimos años se han investigado aleaciones metálicas que reemplacen las más comunes Oro-Platino, Titanio-Aluminio y Cobalto-Cromo. En donde, actualmente se usan aleaciones forjadas con granos alargados y pequeños.

Los autores como I. Ramírez et al., (1998) De la Universidad Estadual Paulista, en su trabajo “Caracterización metalográfica de aleaciones metálicas utilizadas como biomateriales”, determinó la composición química de las aleaciones de Ti-6AL-4V Y Co-Cr-Mo disolviendo limaduras del material en el reactivo de Kroll para su análisis, encontrándose que las aleaciones cumplían con las normas ASTM.

Además por medio del análisis metalográfico se logró identificar que estas aleaciones poseían una distribución superficial homogénea de sus elementos y microestructuras como la cantidad, tamaño y forma de las fases[20]. Ver (fig. 1-3):

Figura 1- 3 Modelos de microscopía electrónica para elemento Ti y Co.



Fig. 4: Microscopía electrónica de barrido (MEB).
Mapeamento elemental del Ti en Ti-6Al-4V.



Fig. 9: Microscopía electrónica de barrido (MEB).
Mapeamento elemental del Co en Co-Cr-Mo.

Nota: Tomado de, Tecnológica, 1998.

Por medio de la prueba de dureza Vickers, la cual es de gran importancia debido a que proporciona información asociada a las propiedades físicas dinámicas y funcionales de

los materiales muestra; siendo esta normalmente utilizada para probar la templabilidad del material y poder predecir otras propiedades.

El principio de esta prueba de dureza es encontrar que tan bien soporta el material aplicando hendiduras para indagar sobre la superficie de la muestra y así medir la impresión resultante, de igual forma sus números se expresan en términos de carga y área de impresión de la superficie, determinando así la dureza del material [21].

Es así que se encontró con que la aleación de Ti-6AL-4V presentaba valores de dureza superior al esmalte dental mientras que la aleación Co-Cr-Mo presentaba valores más altos que el esmalte, pero con una dureza inferior a la apatita (Tabla 1-1).

Concluyendo que la aleación de titanio es más compatible en reparaciones donde las tenciones son más localizadas.

Tabla 1- 1 Dureza Vickers (HV).

Biomateriales	Dureza (HV)	Desviación Estandard
Ti-6Al-4V	332	13
Co-Cr-Mo	362	25
Esmalte del diente	290	-
Apatita	430	-

Nota: Tomado de, Tecnológica, 1998.

1.3 Ensayo de macrografía

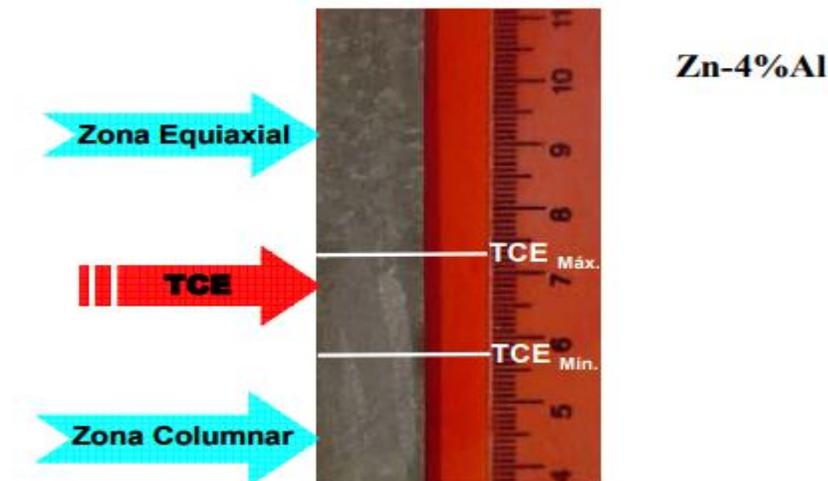
En el proceso de obtención de aleaciones metálicas, la estructura en la que solidifican los componentes es de vital importancia, entre los parámetros más importantes encontramos el tamaño y la dirección de los granos [22].

De este modo, por medio de su artículo “Parámetros de solidificación versus resistencia a la corrosión de aleaciones ZA4 Y ZA27” con el objetivo de obtener dicha transición de estructuras, funden y solidifican las aleaciones en moldes de alúmina, una vez

cortadas longitudinalmente fue lijadas y pulidas para posteriormente ser atacadas con ácido clorhídrico concentrado durante 2 a 3 segundos a temperatura ambiente (25°C) luego fue limpiadas revelando así su macroestructura Ver (fig. 1) [22].

El tamaño del grano se obtuvo mediante un histograma típico de frecuencias donde se halló que el tamaño de los granos equiaxiales es de 0,4 mm en la región de transición con un valor que llega hasta 1.5 mm y con el ancho de los granos de la columna se observó un tamaño entre uno y 1.2 mm del área de transición.

Figura 1- 4 Macrografía de la sección longitudinal.



Nota: Tomado de SCI, 2020.

En la determinación de los parámetros estructurales se obtuvo que el tamaño del grano equiaxial es más pequeño en la región de transición de estructura columnar (TCE) y va aumentando o se mantiene constante en la parte superior de la probeta; también el espaciamiento dendrítico secundario sube con el aumento de Al en la aleación [23].

1.4 Ensayo de micro dureza

Las pruebas de micro dureza esta normalmente utilizada para probar la templabilidad del material y predecir otras propiedades como la resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia al impacto y a la tracción [24]. El principio de esta prueba de dureza es encontrar que tan bien soporta el material, aplicando hendiduras para indagar sobre la superficie de la muestra y así medir la impresión resultante.

C. X. Ren et al., (2021) estudió “La naturaleza de la máxima micro dureza y espesor de la capa de gradiente en aleaciones de Cu-Al reforzadas superficialmente” donde analizó las aleaciones de Cu-Al con diferentes contenidos de Al y microestructuras, estas fue procesadas mediante el fortalecimiento de hilatura superficial (3S) donde también fue examinadas las microestructuras de gradiente y las distribuciones de la micro dureza de las aleaciones de Cu-Al 3S [25].

Se logró comprobar que en cada grupo de las aleaciones de Cu-Al 3S que tienen igual contenido de Al su micro dureza máxima es similar en la capa superficial superior y esta aumentaba con el aumento del contenido de Al, por otra parte, se notó que el espesor de la capa de gradiente en las aleaciones 3S Cu-Al aumentaba con la disminución del límite elástico y hubo un aumento en el exponente de endurecimiento por trabajo respectivamente (Ren et al., 2021). En conclusión, se confirmó que la micro dureza máxima de la capa de gradiente depende principalmente de la composición química, mientras que el espesor de la capa de gradiente depende principalmente tanto de la resistencia como de la capacidad de endurecimiento por trabajo, estando estas estrechamente relacionadas con la microestructura e independientemente de la composición química.

Concluyendo que al combinar el diseño compositivo y la optimización de las microestructuras de los materiales y al mejorar la intensidad de fortalecimiento de la superficie, se logró una capa de gradiente de los materiales reforzados con una micro dureza máxima mejorada y un espesor más extendido.

1.5 Fallas en tubería por corrosión

Las tuberías compuestas bimetálicas están compuestas de acero de baja aleación de alta resistencia (HSLA) en su parte exterior y una capa interna de acero aleado resistente a la corrosión (CRA) estas tuberías son ampliamente utilizadas en la industria de la petroquímica de tuberías por su alta resistencia a la corrosión y economía; adoptando en su interior acero inoxidable con aleaciones a base de hierro y níquel que lo hacen resistente a la corrosión y erosión de la misma, aunque este tipo de tuberías bimetálicas mecánicas resuelven el problema de la corrosión han surgido algunos problemas nuevos, Li et al., dicen que el principal modo de falla de la tubería revestida bimetálica mecánica es el colapso y la corrosión de la capa (CRA) y la falla de la junta, FU et al., analizó las fallas del agrietamiento por soldadura de circunferencia de tuberías revestidas hallando que la causa del daño era por una soldadura deficiente debido a las grandes diferencias en las propiedades físicas y químicas de los HSLA y CRA, lo que lo hace difícil de soldar además de la falta de homogeneidad en la microestructura que pueden promover el inicio y propagación de fallas en las tuberías.

En la actualidad se investiga principalmente el pandeo y la inestabilidad del revestimiento bajo diferentes cargas externas en las tuberías bimetálicas, siendo el colapso del revestimiento una falla común en las tuberías compuestas. Shuxin Zhang et al., (2022).

Analizó la causa raíz del colapso del revestimiento y la grieta de la tubería compuesta bimetálica utilizada para la transmisión de gas, donde realizó experimentos sistemáticos en las soldaduras de circunferencia en ambos lados de las tuberías las cuales se examinó por medio de una inspección radiográfica de acuerdo con la norma ASTM E94-2017 [26]. Haciendo una inspección visual se notó que después de la prueba de presión interna, la tubería tubo un colapso que se localizó en el centro del segmento, también apareció una grieta axial en medio del colapso, además de microgrietas en ambos lados de la misma. Haciendo un análisis de las grietas del revestimiento se notó que se originó en la pared exterior y son perpendiculares a la dirección de la textura, al mismo tiempo se notó un adelgazamiento de espesor de la pared cerca a la fractura donde también se notó hoyuelos largos y redondos lo que indica que la muestra está bajo esfuerzo cortante.

En conclusión, la superficie de fractura tiene las características del agrietamiento de la pared exterior de múltiples fuentes con la presencia de estrías de fatiga gruesas en la zona de propagación, Li et al., afirman que la dirección de propagación de la grieta juega un papel importante en la fuerza de fractura, ya que la fuerza en la muesca inicial de la grieta cuando estas pasan a través de la zona interfacial facilita la propagación inestable de grietas, los hoyuelos largos y redondos en la superficie de la fractura indican también el sometimiento a tensión de cizallamiento lo que concuerda con que el revestimiento fue sometido a una fuerza de flexión produciendo la deformación de la estructura y el adelgazamiento del espesor de la pared en las grietas; diferentes estudios demuestran que cuando un material sufre fatiga de ciclo bajo, aparecen múltiples grietas en la superficie de la muestra lo que se ajusta a las características que presenta el tubo de ensayo.

H. Ding et al., (2020). En el “Análisis de craqueo de una tubería de acero de transmisión de gas de nueva construcción” estudió las causas del agrietamiento de las tuberías utilizadas en el transporte de gas y petróleo recién construidas, fallas que se deben principalmente a los defectos internos; es así como llevó a cabo una serie de experimentos en la tubería, la cual y por medio de una prueba no destructiva (NDT) de detección de partículas magnéticas fluorescentes (FMPT) que se adoptó cerca de la grieta [27], mostró una indicación lineal axial con una longitud de 60mm que se encontraba cerca del material base de la soldadura donde no se encontró grietas o defectos en dicha área. Ver (fig. 1-5):

Figura 1- 5 Detección de penetración para la varilla de succión.



Nota: Tomado de autor Ding, 2020.

La composición química fue detectada por ARL4460 espectrómetro fotoeléctrico de lectura directa quien comprobó que los tubos cumplían con los requisitos de GB/T 9711-2011 para tubos de acero L245NS. También utilizó la máquina de prueba mecánica UTM-5305 para probar la resistencia a la tracción y el límite elástico del lado de la grieta de las muestras a temperatura ambiente con la máquina de impacto PIT752D-2 (300J), arrojando que ambos cumplían con los requisitos del GB/T 9711-2011 como también los cumplía en la prueba de impacto para la tubería L245NS.

La máquina de prueba de dureza KB30BVZ-FA Vickers fue utilizada para probar el HV₁₀ dureza del material base, soldadura y la base afectada por el calor (HAZ) del lado de

la grieta de la muestra, mostrando que la dureza aumentaba gradual mente, pero que también cumplía con el requisito del GB/T 9711-2011. Ver (tabla 1-2).

Tabla 1- 2 Resultados de dureza (VC)

Posición	Medir				Valor medio
Metal base	170	190	160	183	176
HAZ	181	187	197	193	190
Soldar	179	187	218	225	202
GB / T 9711-2011	≤250				

Nota: Tomado de Ding, 2020.

Además, usó el microscopio laser confocal OLS-4100 para observar la microestructura del material base desde la fractura o grieta, se observó, que la superficie ubicada en el exterior de la tubería es relativamente plana caracterizándose por grietas frágiles y grietas dúctiles cerca de la superficie interna, señalando que la grieta se propaga desde el exterior hacia el interior de la sección transversal de la tubería de acero donde según la teoría del análisis de agrietamiento, el centro del arco es la fuente de la fisura, al mismo tiempo se halló defectos en la fuente de la grieta verificando que se originó en la superficie exterior de la tubería de acero. En la costura de la soldadura se vió defectos obvios en su morfología ya que la superficie externa tenía características “azuladas” y fijados productos de oxidación indicando que la fractura ha sufrido oxidación a alta temperatura y agrietado durante mucho tiempo; infiriendo que las grietas aparecieran antes del tratamiento térmico de la tubería de acero.

Finalmente analizó la grieta y la superficie con el microscopio óptico (OM), mostró que la estructura metalográfica con evidencia de perlita y ferrita y su estructura fracturada y deforma localmente. Además, se notó una adherencia de materia gris en la superficie de la fractura y dentro de la misma por lo que se puede decir que esta materia gris existía mucho antes de que la tubería de acero se agrietara y el análisis del microscopio electrónico de

barrido (SEM) se pudo ver una capa de óxido denso en la superficie agrietada y una apariencia gris, donde esta fue analizada por EDS mostrando contenidos elementales principalmente de C, K, Fe, Cl y Si, mientras que la materia gris en la punta de la grieta contenía C, O, K, Fe, Na, Mn y Si. En conclusión H. Ding et al., dicen que el agrietamiento de la sección de la tubería es debido a la inclusión de escoria en la tubería de acero conllevándola al agrietamiento.

M. Portella et al., (2022) en su estudio de “Composición química y efectos del tiempo de enfriamiento de la soldadura en la dureza de la zona afectada por el calor de los aceros para tubos” estableció la correlación entre la composición química del acero y la dureza HAZ en soldaduras de circunferencias de producción típicas y una gama de simulaciones térmicas de soldaduras, el ensayo lo dividió en dos etapas, la primera etapa consistió en calibrar la influencia de la velocidad de enfriamiento de la soldadura tanto de las simulaciones térmicas como de las soldaduras reales en aceros en una alta gama de composición química, típica de la tubería API comercial de alta resistencia y en la segunda etapa determinó la influencia del Pcm y el tiempo de enfriamiento en términos de dureza mínima y máxima.

En la comparación entre HAZ simuladas y soldaduras reales se encontró que la dureza final en el HAZ está directamente relacionada con las composición química del acero en términos de Pcm y velocidad de enfriamiento de soldadura, pero también fue evidente que el cambio porcentual relativo en la dureza de la tubería original (% de ablandamiento HAZ) que es importante para determinar la capacidad de deformación de la unión de soldadura, depende principalmente del procesamiento del acero, especialmente el grado y la gravedad del procesamiento termo mecánico siendo esto notable por el hecho de que los

mismos grados de tubería API tienen una amplia gama en composición química y lo que es más importante Pcm y las repuestas a las condiciones de soldadura de campo puede ser bastante diferente dependiendo de la entrada de calor de soldadura, el espesor de la pared de la tubería y el precalentamiento, todos los cuales determinan la velocidad de enfriamiento de la soldadura [28].

Zilong Xia et al., (2023) realizó un análisis de fallas de agrietamientos en una tubería de soldadura por resistencia eléctrica de alta frecuencia en una tubería de agua contra incendios enterrada, donde se analizó muestras de la tubería fallida para un análisis metalográfico y revelar la morfología inicial y la distribución de la microestructura dentro del material de la tubería además de un análisis microscópico eléctrico de barrido (SEM) donde en este último se pudo ver claramente un contraste entre la parte superior rugosa y la parte inferior plana, en la parte rugosa se encontró hoyuelos lo que indica que el mecanismo de fractura final de la pared exterior es una fractura por sobre carga. En la determinación de la composición química de la tubería fallida se comprobó que esta cumplía con los requisitos del acero Q235B, como también cumplía con los requisitos de sus propiedades mecánicas.

El análisis metalográfico mostró que la superficie lisa de la grieta tiene una zona más oscura afectada por el calor (HAZ) y habían algunas protuberancias irregulares cerca de la pared exterior o zona de fractura donde se encontró que la estructura metalográfica es férrica y una pequeña cantidad perlita siendo esta estructura metalográfica normal; en la zona más oscura afectada por el calor se pudo ver que una sección corta de defecto no fusionada se separa después del agrietamiento, llegando a la conclusión de que se utilizó el método de soldadura por auto fusión donde se halló imperfecciones en la mayor parte del espesor de la

pared, cerca de la pared interior sin alcanzar la profundidad crítica de fractura. El análisis sobre la unión soldada se debió a la entrada insuficiente de calor; siendo esta la causa raíz del agrietamiento de la tubería, además la corrosión selectiva de la soldadura de costura también tuvo un efecto no despreciable cuando la presión de la red de tuberías es demasiado alta junto con la soldadura, produciendo un agrietamiento por sobre carga a lo largo de la parte afectada por HAZ.

En una planta de energía nuclear china tipo M310 se presentó una fuga de agua primaria bórica causada por grietas penetradas después de 19 años de servicio, En-Hou Han y Zhiming Zhangjianqiu Wang (2023) realizó un “Análisis de causa raíz para tubería agrietada en sistema auxiliar en central nuclear” donde estudió los fallos de los codos agrietados en la planta, dividió el codo en 3 grandes regiones, región agrietada (C), región media (M) y región no agrietada (NC) luego, cada región fue cortado en varios trozos pequeños.

A causa del servicio prolongado, la superficie interna del codo y la superficie de la grieta estaban cubiertas por óxido radioactivo y debido a que ese trabajo no se realizó en celda caliente, la parte con grietas fue eliminadas y no se analizó, las superficies internas de las piezas pequeñas se molieron primero antes de la prueba para eliminar el óxido radioactivo.

Para el método de análisis de la causa raíz del agrietamiento realizó un análisis de composición química, midió la dureza con un durómetro portátil Richter, observó las microestructuras del codo mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) [29]. En el análisis de la composición química de la pieza se analizó los resultados en este trabajo con los proporcionados por el fabricante encontrándose que ambos son muy

consistentes con el valor estándar, excepto que el contenido de N, 0.08, era inferior al valor normal, 0.10~0.16.

En el análisis de dureza las dos piezas alrededor de las grietas fue designadas como C1 y C2 donde las grietas se encuentran en la región entre las 3 y las 6 en punto, se pudo ver que los valores de dureza cercanos a la parte del agrietamiento eliminado son mayores que los de otras áreas, y los valores de dureza en la superficie exterior fue mayores que los de la superficie interior del suelo, la mayor dureza de la superficie interna alrededor de la parte del agrietamiento eliminada es más de 580 HL(~300HV).

D. Bedoya et al., (2021) ejecutó un “análisis de fallos de un sistema de tuberías de acero inoxidable soldado con picaduras prematuras”, donde estudió las fallas de tuberías soldadas (ASTM A312 grado TP 316L) de una planta de tratamiento de agua que fue detectada por fugas de agua causadas por corrosión por picaduras, las muestras fue estudiadas mediante inspección visual, un examen radiográfico, espectrometría de emisión óptica, examen metalográfico y microscopia electrónica de barrido (SEM), junto con espectrometría de dispersión de energía (EDS).

El resultado muestra que la tasa de corrosión eran muy alta y los hoyuelos que estaban en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor (HAZ) de las soldaduras circunferenciales eran por falta de un gas de purga durante la soldadura de campo que generó zonas teñidas con calor alrededor de las soldaduras, la inspección (SEM) mostró la presencia de estructuras compatibles con bacterias reductoras de sulfato y bacterias oxidantes de hierro confirmando que la falla fue causada por corrosión ejecutada microbiológicamente (MIC) también se pudo identificar que el agua utilizada en las pruebas hidrostáticas debió ser tratada antes de la prueba o debió haberse drenado y secado profundamente las tuberías

concluyendo que el estancamiento del agua contribuyó en la proliferación de la actividad microbiana y por ende la aparición de la corrosión [30].

H. Liu et al., (2021) Analizó la fractura en la zona de soldadura de metales diferentes de la tubería de energía CPP del recipiente, donde la tubería de aceite de potencia de una hélice de paso ajustable de un buque se fracturó al funcionar durante 25.000 h, las causas de fractura se analizó mediante la morfología de micro y macro fractura, composición química, análisis metalográfico, propiedades mecánicas y pruebas de dureza, donde se concluyó que el modo de falla de la tubería de aceite es por la fatiga de alto ciclo donde la fractura y la grieta por fatiga se originó en la grieta intergranular por HAZ, proveniente de la soldadura lateral del acero Q345A causado por la penetración del cobre de soldadura, la formación de grietas intergranulares se remonta a la difusión del fluido de soldadura fuerte de bajo punto de fusión a los granos del acero en soldadura metálica diferente, lo que reduce en gran medida la fuerza de unión del límite del grano del acero y conduce a un agrietamiento frágil en servicio [31].

Capítulo II.

Diseño Metodológico

Por medio de investigación teórica y experimental se hará un análisis progresivo de los aspectos principales cuantitativo y cualitativo de los ensayos realizados a los especímenes de prueba, se observó el comportamiento, reacción y resistencia de los especímenes a las diferentes pruebas para recopilar información suficiente que pueda conducir a las conclusiones de las causas de falla de tubería.

En el desarrollo de la investigación se buscó el apoyo de personal con experiencia en el uso de equipos de análisis y ensayo de materiales y el acceso a servicios técnicos en laboratorios que disponen de los equipos necesarios para realización de las pruebas propuestas en el proyecto.

En el desarrollo del proyecto se llevó a cabo las siguientes etapas:

Etapa 1. Preparación de muestras

Para la etapa 1, se debe realizar las siguientes actividades:

Corte, mecanizado y preparación de especímenes.

Los especímenes serán maquinados, preparados y probados según las recomendaciones y lineamientos de los estándares de la “*American Society for Testing and Materials o ASTM International*” aplicable.

Para asegurar la confiabilidad de la investigación se buscarán laboratorios de ensayos de materiales a nivel nacional.

Etapa 2. Ensayos de espectrometría de emisión atómica

Este ensayo se realiza bajo las especificaciones técnicas de la norma ASTM E415 – 15 “Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry”, empleando el espectrómetro de emisión óptica de alta gama para análisis de metales Q8 MAGELLAN.

Etapa 3. Realizar observación y análisis por medio de SEM.

Se utilizarán equipos de microscopía electrónica de barrido y análisis elemental.

De los resultados se permitió observar a través de la micrografía los diferentes tamaños o acumulaciones de partículas incrustadas, provenientes de los materiales que se tiene contacto las piezas de estudio, obteniendo la composición atómica de las muestras, que surge, después de aplicarse los rayos X en la superficie. Además, se determina que nanocristales se encuentran en las muestras por medio de los espectros EDS.

Etapa 4. Ensayo Mecánico

Se realizaron las siguientes actividades:

Se desarrollo procedimiento bajo estándares ASTM y código ASME BPVC.

Realización de ensayo mecánico.

Este ensayo se realiza bajo las especificaciones técnicas de ASTM E8 - 16 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, mediante una maquina universal de ensayos Electroneumática EM2/500/FR marca MICROTTEST.

Análisis de resultados obtenidos, elaboración de reportes.

Etapa 5. Elaborar el análisis y caracterización de resultados.

Se elaboró un capítulo en el cual se describe las características encontradas en las partes a evaluar, los resultados obtenidos y como se debe interpretar dichos resultados.

2.1 Diagnóstico inicial

Ahora, como base de estudio en la industria de la producción de aceites y grasas alimenticias ha tenido que lidiar con varios aspectos como lo son: el desgaste y degradación de material, fugas por porosidades en la tubería y paradas obligatorias por reparación; ocasionando pérdidas económicas por dejar de vender productos grasos. De lo anterior, la empresa SIGRA S.A.S, posee falencias en los componentes de transporte de fluidos del cual se derivan sus fallas.

Al existir las fallas y de manera múltiple, sin conocer sus causas por las cuales una tubería puede fallar, se deben realizar planes de inspección de integridad de tubería.

Por lo que se tiene como problemáticas tres aspectos.

2.1.1 Primer - Aspectos técnicos

Con frecuencia los estudios se limitan a realizar medición de espesores de la pared del material comparando los datos tomados con el espesor mínimo calculado.

La tubería puede llegar a romperse aun teniendo el espesor nominal de fabricación del tubo.

Roturas en la tubería especialmente en los serpentines, en los cuales la tubería debe estar expuesta a altas presiones para poder generar el vapor necesario para producir la temperatura de funcionamiento requerida.

Perdida del material, por lo que ha realizado medición de espesores monitoreando los espesores más bajos y realizando soldaduras de recargue para mitigar la perdida de espesor de material.

Se evidencian pitting por desprendimiento de acero debido a sobrecalentamientos y en otras partes se tiene algún tipo de incrustaciones.

Con la tubería expuesta temperaturas de 210°C y con la variación del tipo de flujo al interior del tubo, se provocó desgaste sobre la pared de los tubos, lo cual genera perdida en el espesor de pared, ocasionando que la presión existente debilite estas pequeñas zonas y se lleve a cabo una perforación en el material.

Aspectos Operacionales: Dentro de los problemas implícitos y desconocidos en la operación técnica del reactor que pueden causar daño en los equipos están los siguientes.

Operar equipos a una presión mayor a la cual fue diseñado causa deformaciones permanentes en el material al superar la zona elástica quitando propiedades físicas del material y restando resistencia a la presión interna.

Una mala selección del fluido de desoxigenación del agua y/o el PH del mismo termina en deterioro de los equipos ya que pueden provocar pares galvánicos generando corrosión por picado [32].

Se pueden presentar transiciones dúctiles a frágiles del material de la tubería debido a sobrecalentamientos del material expuesto a las altas temperaturas.

Ahora la patología de las fallas de estudio, se presenta filtración desde la parte interna del tubo hacia la parte externa, estas roturas no presentan indicios de que exista un a elongación del material antes de crearse la perforación en el metal base.

2.1.2 Segundo - Aspectos ambientales

Como el material de tubería se desprende en partículas muy pequeñas, estas al momento de encontrar una salida por fisura en tubo se liberan a gran presión, como se puede apreciar en la figura 2-1:

Figura 2- 1 Ruptura de tubería de serpentín en uso.



Nota: Tomado por el autor.

2.1.3 Tercer - Aspectos administrativos

Para la empresa, SIGRA S.A.S, no es viable efectuar constantemente cambios y paradas por mantenimiento en la tubería, ya que son constantes los momentos que se presentan estas fallas, así como se evidencian en las figuras 2-1, figura 2-2 y figura 2-3.

En la figura 2-2, se presenta corrosión del material, y por lo que se disminuye el material del área afectada.

En la figura 2-3, se presenta, corrosión y afectación del área interna de los tubos.

Figura 2- 2 Daño externo en tubería de serpentín.



Nota: Tomado por el autor.

Realizando una inspección mediante boroscopio al interior de la tubería se pudo observar un tipo de huecos dentro de la tubería que sugieren la presencia de algún tipo de corrosión aun sin determinar

Figura 2- 3 Corrosión interna en la tubería de serpentín.



Nota: Tomado por el autor.

Figura 2- 4 Reparaciones en los daños de las curvas de la tubería.



Nota: Tomado por el autor.

En la figura 2-4, se presenta parches realizados para cubrir los poros causados debido a algún tipo de corrosión ocasionando paso de fluido al exterior de la tubería.

Capítulo III.

Resultados y análisis

3.1 Resultados del ensayo espectrometría de emisión atómica

Este ensayo se realizó bajo las especificaciones técnicas de la norma ASTM E415 –

15. Se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 3- 1 Resultados de composición química

Etapas 5. Elaborar el análisis y caracterización de resultados.

DATOS OBTENIDOS EN LA MUESTRA MEDIANTE OES		REQUERIMIENTOS QUIMICOS DE ASTM A 106		
ELEMENTOS	MUESTRA PROMEDIO	GRADO A	GRADO B	GRADO C
%C	0,186	0,25	0,3	0,35
%Mn	0,809	0,27-0,93	0,29-1,06	0,29-1,06
%P	0,011	0,035	0,035	0,035
%S	0,008	0,035	0,035	0,035
, %Si	0,189	0,21	0,10	0,10
%Cr	0,103	0,40	0,40	0,40
%Ni	0,044	0,40	0,40	0,40
%Mo	<0,010	0,15	0,15	0,08

Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Al obtener los datos de composición química de la muestra de tubería se comparan los resultados con los requerimientos químicos de los estándares para los siguientes tipos de material ASTM A 179, ASTM A106, ASTM A 210 y ASTM A 214, ya que estos materiales mencionados son los autorizados por el código ASME para la fabricación de calderas, sobre calentadores e intercambiadores de calor.

El resultado de composición química, de una muestra de tubería presentado en la Tabla 3-1 evidencia que el material de la tubería cumple con los parámetros establecidos por la norma ASTM A 106 grado A.

3.1.1 Análisis de resultados de la espectrometría.

El material no presenta elementos de aleación que incrementen la resistencia a la corrosión como el cromo y el níquel. Así mismo, el porcentaje de molibdeno es menor a 0,01 lo cual disminuye las propiedades del material a altas temperaturas.

Los datos encontrados como se muestra en la Tabla 3-1, la mayoría de elementos encontrados según su porcentaje es inferior al establecido por la norma ASTM, lo cual indica que el acero a estado perdiendo porcentaje en peso de componentes aleantes al parecer por la presencia de alguna reacción química con su entorno, la cual puede ser por aire o por oxidación electroquímica, ya que este tipo de reacción tiene una alta presencia de óxidos de hierros.

Como se evidencia existen una baja cantidad de cromo en comparación el requerido por norma, se puede decir que la baja presencia de este componente empleado para crear capas o películas protectoras capaces de disminuir la corrosión pudo funcionar cuando la tubería estaba nueva, pero en momento actual, es posible que ese porcentaje de cromo no sea lo suficientemente eficaz como para mitigar el daño de la tubería debido a la corrosión.

Este mismo valor en reducción de materiales usados para crear capas protectoras para la corrosión se plantearía para el Níquel ya que su porcentaje de 0,041 es un valor muy bajo al establecido de 0,4. El Níquel es usado para crear películas protectoras para evitar el desgaste y resistir a la corrosión. Permite promover la limpieza de los metales y liberar las suciedades que se quieran adherir.

Del resultado de compasión química del material y estado actual de la tubería se puede deducir que la elección de material de tubería del serpentín fue inadecuada, porque, aunque el acero al carbono ASTM A106 tiene muy buenas características de resistencia a

las altas temperaturas y altas presiones su interacción con procesos alimenticios permite la formación de ácidos que facilitan el proceso corrosivo y contaminan el proceso de fabricación de productos alimenticios [13].

El acero recomendado para la fabricación del serpentín es el ASTM A213 ya que por sus componentes aleantes es más resistente a la corrosión y es más higiénico para el proceso.

El tubo en acero ASTM A213 se usa por su gran resistencia a la corrosión, permitiéndolo conservar su estructura por un tiempo prologando hasta que se debilite su capa protectora anticorrosiva, al poseer una capa robusta le permite salvaguardar su uso e integridad estructural [33]. La recomendación de emplear el acero ASTM A213 corresponde con llevar a cabo una adecuada selección del material de tubería, que presente un mejor desempeño en la condición de operación del equipo.

La tubería en acero ASTM A 213, al ser del tipo acero inoxidable austenítico, se usa especialmente para intercambiadores de calor y calderas en las cuales se requiere tubería sin costura, adicionalmente esta tubería es probada bajo el estándar ASTM A 262/E comprobando que su reacción ante agentes corrosivos proporciona a la tubería, una alta resistencia a la corrosión intergranular [34].

Tabla 3- 2 Composición del acero ASTM A213

ASTM A213 Chemical Composition %

Grade	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
	Max, %	Max, %	Max, %	%	%	%	Max, %	Max, %	%
TP304	0,08	1,0	2	18 – 20	8 – 11	–	0,03	0,045	Bal
TP304L	0,035	1,0	2	18 – 20	8 – 12	–	0,03	0,045	Bal
TP316	0,08	1,0	2	16 – 18	11 – 14	2 – 3	0,03	0,045	Bal
TP316L	0,035	1,0	2	16 – 18	10 – 14	2 – 3	0,03	0,045	Bal
TP321	0,08	1,0	2	17 – 19	9 – 12	–	0,03	0,045	Bal

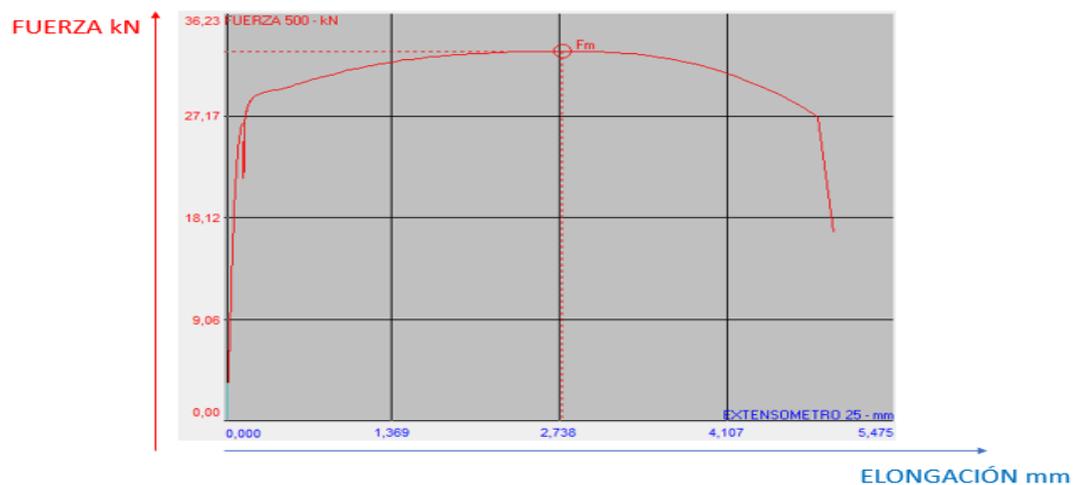
Nota: Tomado de Stainless Steel [35].

Ahora al revisar nuevamente los componentes de cromo y níquel el cual dio paso a disminuir la barrera de protección de la tubería del acero A106, el acero ASTM A 213 posee unos valores altos en Cromo desde el 16% hasta el 20 y de níquel desde el 8% al 14 según el grado del acero, datos que se pueden verificar en la tabla 3-9.

3.2 Resultados del ensayo de tensión

Al realizar el ensayo de tensión bajo la Norma ASTM E8- 16 se obtiene:

Figura 3- 1 Curva de fuerza vs elongación



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Tabla 3- 3 Resultados del ensayo de tensión

Resistencia a la tracción	Resistencia a la Fluencia	Resistencia a la tracción	Resistencia a la Fluencia
		ASTM A 106	ASTM A 106
582,2 MPa	495,5 MPa	485 MPa mínimo	240 MPa mínimo

Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Los valores obtenidos durante el ensayo de tracción, permiten establecer que el material del tramo de tubería cumple con los parámetros de la norma ASTM A 106 para un grado C.

3.2.1 Análisis de resultados del ensayo de tracción.

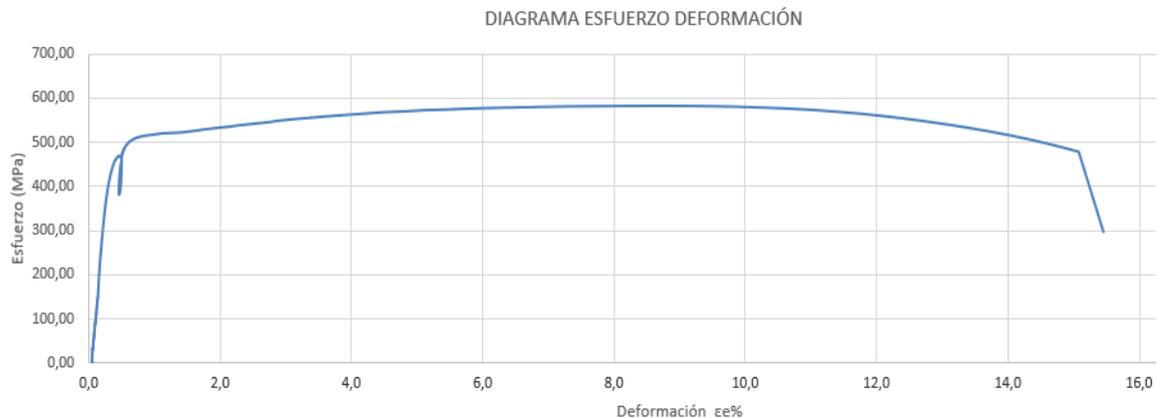
Se preparó el espécimen de tracción según directrices del ASTM E8 dando como resultado las siguientes dimensiones:

Tabla 3- 4 Dimensiones

Ancho	mm	12,300
Espesor	mm	4,600
Area	mm ²	56,580

Nota. Dimensiones de área de sección reducida del espécimen.

Figura 3- 2 Diagrama esfuerzo vs Deformación por Tracción



Nota: Elaboración por el autor

Se realiza el ensayo de tracción y se obtuvo el siguiente diagrama de esfuerzo deformación.

Una vez realizado el ensayo de tensión se tienen los siguientes datos:

Tabla 3- 5 Propiedades mecánicas

Resistencia a la tracción	582,176 MPa	84437 PSI
Resistencia a la fluencia	495,479 MPa	71416 PSI
Fuerza máxima	32,49 KN	

Nota. Resultado de ensayo mecánico.

Los requerimientos de tensión para el ASTM A 106 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3- 6 Requerimientos de tensión

<i>REQUERIMIENTOS DE TENSION (TABLA 2 DE ESTANDAR ASTM A106)</i>			
	<i>GRADO A</i>	<i>GRADO B</i>	<i>GRADO C</i>
<i>Esfuerzo de tensión, min, PSI(MPa)</i>	<i>48000 (330)</i>	<i>60000 (415)</i>	<i>70000 (485)</i>
<i>Esfuerzo de fluencia, min, PSI (MPa)</i>	<i>30000 (205)</i>	<i>35000 (240)</i>	<i>40000 (275)</i>
<i>% de longación mínima permitida en 2" o en 50 mm</i>	<i>35</i>	<i>30</i>	<i>30</i>

La elongación mínima deberá ser calculada con la siguiente ecuación

$$e = \frac{625000A^{0.2}}{U^{0.9}}$$

Donde:

e= Elongación mínima en 2 pulg. (50,8 mm), %, redondeado al 0,5 % más cercano

A= Área de la sección transversal de la muestra de prueba de tensión, pulg.2, basado en el diámetro exterior especificado o el ancho nominal de la muestra y el espesor de pared especificado redondeado a la 0,01 pulgada más cercana 2 (si el área así calculada es mayor que el valor se utilizará 0,75 pulg. 2)

U= Resistencia a la tracción especificada

Nota. Tomado de norma ASTM A106

3.2.2 Porcentaje de elongación

Tomando los valores de las tablas 3-4 y 3-5 los cuales fueron entregados por el laboratorio de la UPTC y reemplazando los valores de A y U en la ecuación dada por la normativa donde:

$$A = 0,0876 \text{ inch}^2$$

$$U = 84437 \text{ PSI}$$

Se tiene que:

$$e = 14,14\%$$

Según el requerimiento de elongación mínimo dado en la tabla 3-6, el porcentaje mínimo de elongación permitido usando la ecuación de la normativa debería ser del 35%, realizado el cálculo se tiene un porcentaje de elongación de 14,14% demostrando que el material se ha endurecido reduciendo su ductilidad.

Por lo tanto, el material de la tubería del serpentín se acerca a la zona de fragilización y es posible que se comiencen a evidenciar problemas de agrietamientos y fractura frágil.

Con el módulo de Young o módulo de elasticidad se puede determinar cuánto se puede estirar un material, y equivale a la fuerza por la longitud dividido el área transversal por el estiramiento, cada material tiene un valor de módulo de elasticidad por lo cual no es necesario calcularlo. A partir de los datos obtenidos se tiene el siguiente diagrama de fuerza Vs elongación.

EL módulo de Young se representa por la letra “E” y es el valor de la recta en que el comportamiento del material es elástico y lineal para cualquier tensión que se aplique el material, este tiene la capacidad de volver a su longitud inicial, y es la tensión sobre la deformación.

La ley de Hooke indica que el esfuerzo es igual al módulo de elasticidad por la deformación:

$$\sigma = E\epsilon$$

esfuerzo es igual a fuerza sobre área

$$\frac{P}{A} = E\epsilon$$

Elongación es igual a deformación sobre longitud inicial

$$\frac{P}{A} = E \frac{\delta}{L}$$

Se tiene:

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

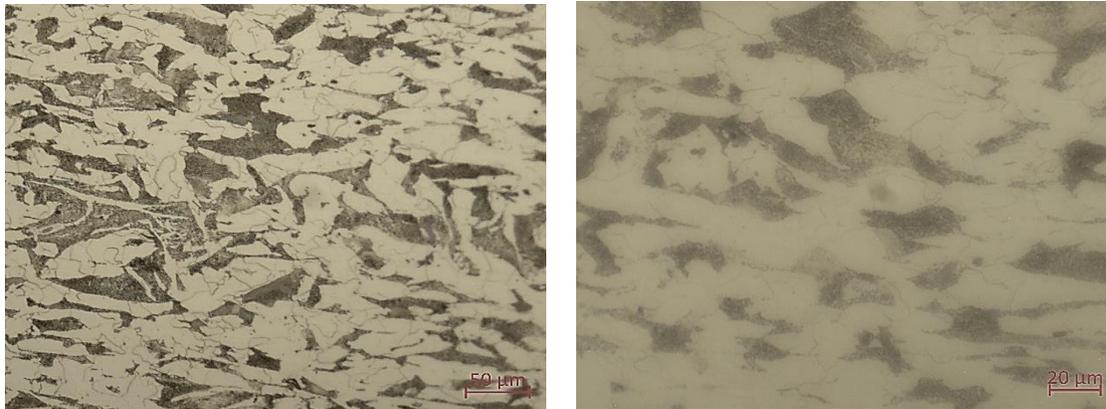
El límite elástico, es el valor de la tensión al que se hace evidente la deformación plástica. Se producen, las dislocaciones provocan deformaciones permanentes en el material.

Por lo tanto, el resultado final de una prueba de tracción realizada sobre una muestra sometida a ensayos de tracción representativa de la sección de tubería indica que el material del componente cumple con los requisitos mecánicos propuestos por ASTM A 106 para un acero al carbono de grado C. Sin embargo contrastando los datos obtenidos en la Tabla 3-1, mediante espectrometría los cuales caracterizan al material como grado A y con la Tabla 3-7 micro dureza Vickers en donde se evidencia un aumento de dureza con respecto a los requerimientos normativos significa que el material se ha endurecido, los materiales dúctiles cuando empiezan a fluir, se vuelven más duros, registran cierta dureza por eso resisten mayores esfuerzos en menores condiciones de área cuando ya han superado el límite de elástico, por lo tanto se pueden presentar fracturas frágiles en la tubería del serpentín, es decir rupturas en donde no se evidencia deformación en el material.

3.3 Resultados del análisis metalográfico

Las imágenes metalográficas obtenidas con el microscopio óptico de marca CARL ZEIS S I, modelo AXIOTECH VARIO, son:

Figura 3- 3 Microestructura ferrita y perlita (a) a 200X y (b) a 400X



(a)

(b)

Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

La microestructura revelada para el material del tramo de tubería, representadas en las imágenes (a) y (b) a diferentes aumentos, poseen una microestructura compuesta por granos finos de ferrita (blanco) y perlita (negro), con una distribución homogénea. Dichas fases son coherentes con el tipo de acero, el porcentaje de carbono. El tamaño de grano es de $G=8$, sin cambios en la morfología de los granos que puedan estar ligadas a tratamientos térmicos aplicados en la fabricación de la tubería.

Por otro lado, mediante examen microscópico y caracterización precisa, ASTM E45 ofrece un enfoque estandarizado para identificar varios tipos de inclusiones, como sulfuros, óxidos, silicatos y nitruros. Esta comprensión profunda de los tipos de inclusiones y su concentración es crucial para evaluar la susceptibilidad del acero a los defectos, su respuesta

a técnicas de procesamiento específicas y su potencial de desempeño en diversas condiciones ambientales.

3.4 Resultados por Dureza Vickers

La medición de las diagonales se realiza mediante microscopía óptica bajo las especificaciones de ASTM E384 – 05 “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, y el valor de dureza reportado corresponde a la media de las lecturas obtenidas.

Para la medición de las durezas se usó un micro durómetro MICRO VICKERS HARDNESS TESTER modelo QV-1000DM.

Tabla 3- 7 Micro Dureza Vickers

Muestra	Lecturas de micro dureza Vickers (HV)					PROMEDIO
	1	2	3	4	5	
M1	176,8	188,0	177,7	178,5	195,4	183,3

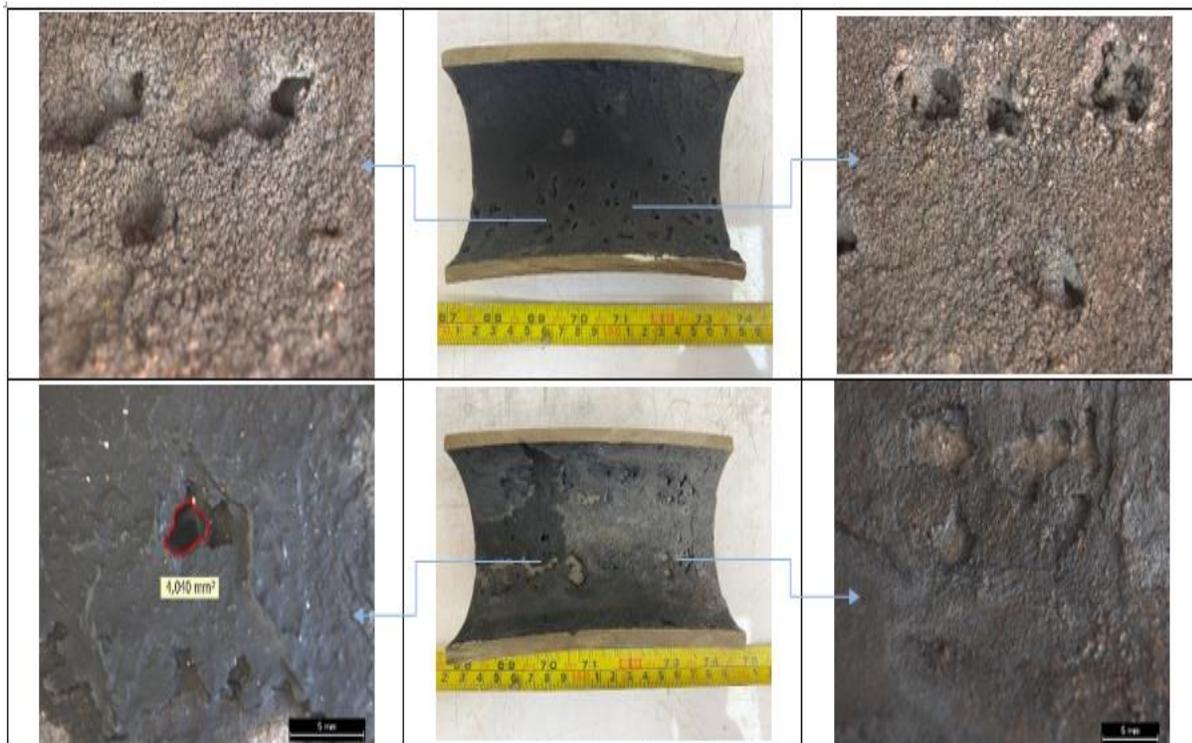
Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Como se observa en la tabla, los valores de micro dureza obtenidos son homogéneos en los puntos tomados para el ensayo en la matriz de la muestra evaluada, con un promedio de 183.3 Vickers. Los aceros al carbono con un contenido entre 0,25% al 0,30% de carbono en peso tienen un perfil de micro dureza Vickers promedio de 131 HV, al obtener una dureza de 183 HV se tiene como conclusión que el cambio de composición química del material, la pérdida de componentes como carbono y manganeso han generado que el material se endurezca perdiendo su ductilidad y resistencia a esfuerzos de tensión.

3.5 Resultados y análisis morfológico de la superficie del daño

El objetivo de realizar un estudio de la morfología de la corrosión en una superficie es obtener una comprensión integral de las características físicas, patrones y características de la corrosión que ocurren en la superficie de un material. Este estudio tiene varios propósitos importantes en el campo de la ciencia de los materiales, la ingeniería y el manejo de la corrosión. A continuación, se expone el registro fotográfico de la evaluación superficial.

Figura 3- 4 Análisis fractográfico en zona de falla

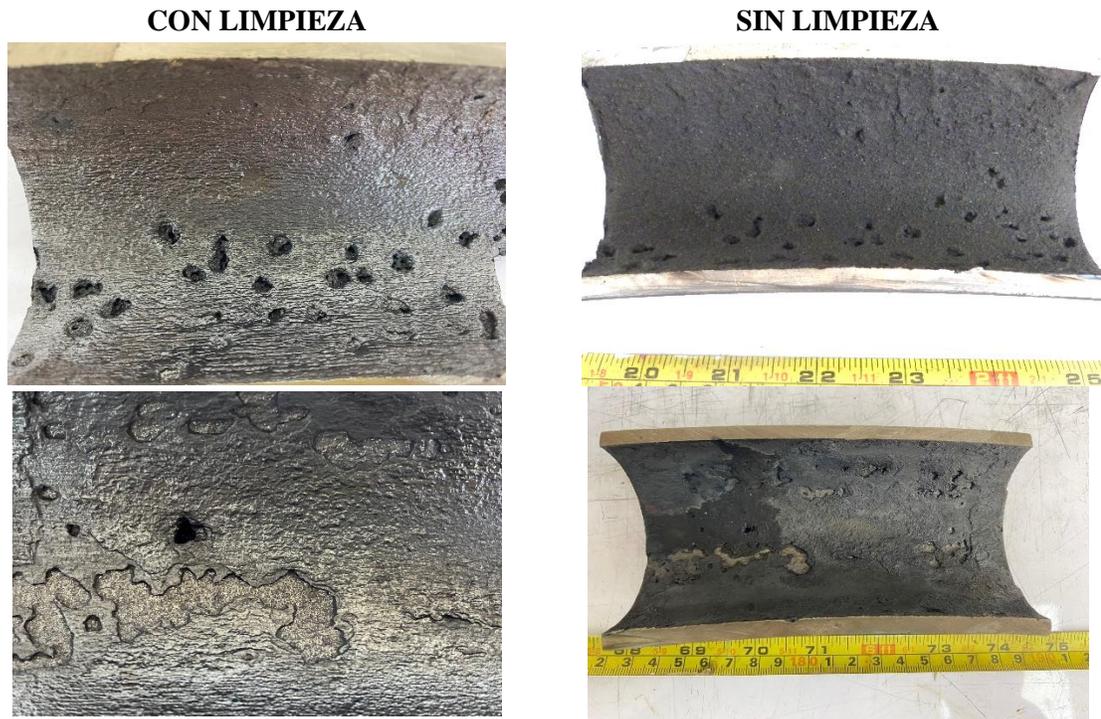


Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Sobre la superficie interna del tramo de tubería, se observa un recubrimiento de tonalidad oscura, de alta adherencia, que expone la formación de múltiples picaduras de morfología irregular y alta profundidad, una de las cuales, observada en la (figura 2-4)

inferior derecha, hace referencia al daño pasante, en el cual se instaló el parche metálico evidenciado en la parte interna del tramo recibido.

Tabla 3- 8 Análisis fractográficos en zona de falla



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

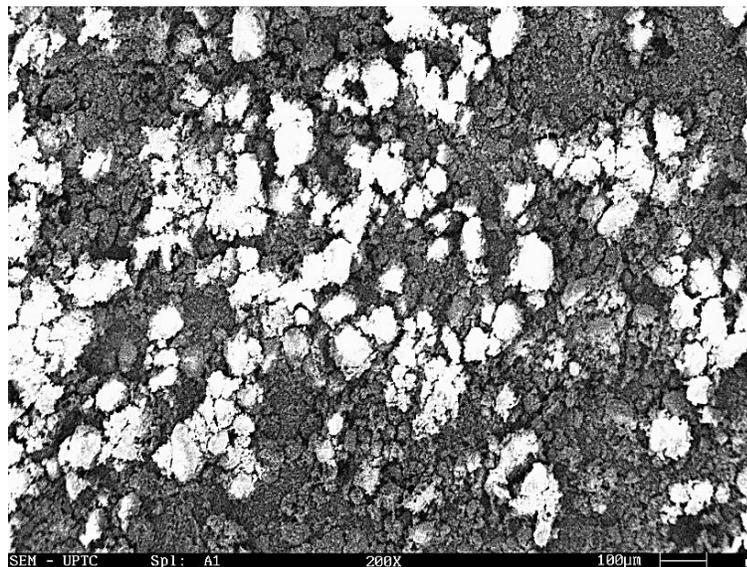
La limpieza realizada de forma manual en la superficie interna de la sección de tubería, arrojó una alta presencia de material severamente adherido a la pared interna del tramo, que después de ser removido de forma parcial, expuso las picaduras, pero de mayor tamaño en relación a lo observado sin limpieza, así como nuevas picaduras. Lo anterior indica que las picaduras se están formando bajo el depósito sólido presente en la pieza de estudio.

Caracterización del daño: Para poder establecer cambios de orden microestructural en la zona de falla, debido a que las picaduras se presentan de forma localizada, se realizó

el análisis de dos zonas. De igual forma, se realizó la evaluación composicional de los productos de corrosión sólidos recuperados y expuesto en la inspección visual.

Se evalúa el espécimen mediante espectroscopia electrónica de barrido SEM en el fondo de las inclusiones formadas a partir de la corrosión y en el corte transversal de la pieza para determinar profundidad del agente corrosivo y su interacción con el metal de base.

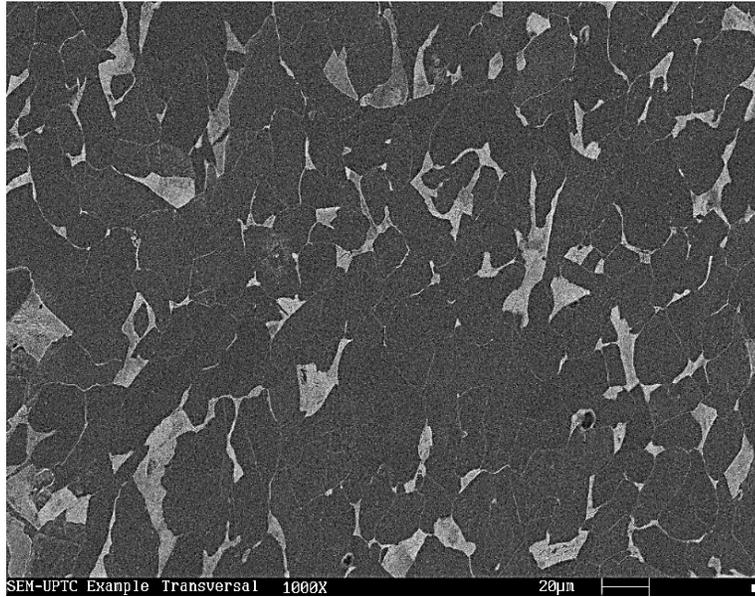
Figura 3- 5 SEM en el interior de las picaduras



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

En el fondo de las picaduras se puede observar residuos de componentes orgánicos que no están incrustados en el material solamente se puede ver superposición de producto corrosivo mas no interacción electroquímica.

Figura 3- 6 SEM microestructura de la tubería



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

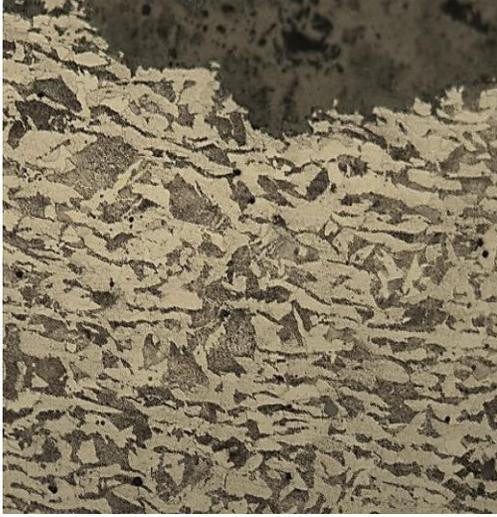
La microestructura de material en corte transversal no muestra alteraciones en el grano ni incrustaciones que puedan estar causando deterioro por corrosión.

3.6 Análisis metalográfico transversal

El estudio metalográfico se inició puliendo dos caras de las zonas donde se evidenció picaduras. Las siguientes fotografías muestran la propagación de dichos daños puntuales en el tramo.

Figura 3- 7 Macrografía en zonas de daño por picadura



a.: Macrografía de la zona del daño en muestra de las picaduras	b. Macrografía de la zona del daño en muestra de las picaduras
 <p data-bbox="282 884 841 947">c: Microestructura ferrita perlita a 200X, borde de la picadura</p>	 <p data-bbox="867 919 1417 982">d. Microestructura ferrita perlita a 200X, borde de la picadura</p>

Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

El borde de la picadura, muestra una microestructura sin afectaciones. El tamaño de grano y la distribución de fases es homogénea, descartando cambios de orden metalúrgico en inicio del daño. Se identifica el avance del daño desde la superficie interna a la externa, con picaduras de lados inclinados. Las picaduras poseen sólidos depositados.

3.7 Prueba de magnetismo y reacción con ácido clorhídrico

La realización de pruebas de magnetismo y reacciones con ácido clorhídrico se evidencia con alto contenido de material magnético:

Figura 3- 8 Campo magnéticos y ácido



e. Solidos ante la presencia de campos magnéticos



f. Solidos ante la presencia de ácido clorhídrico

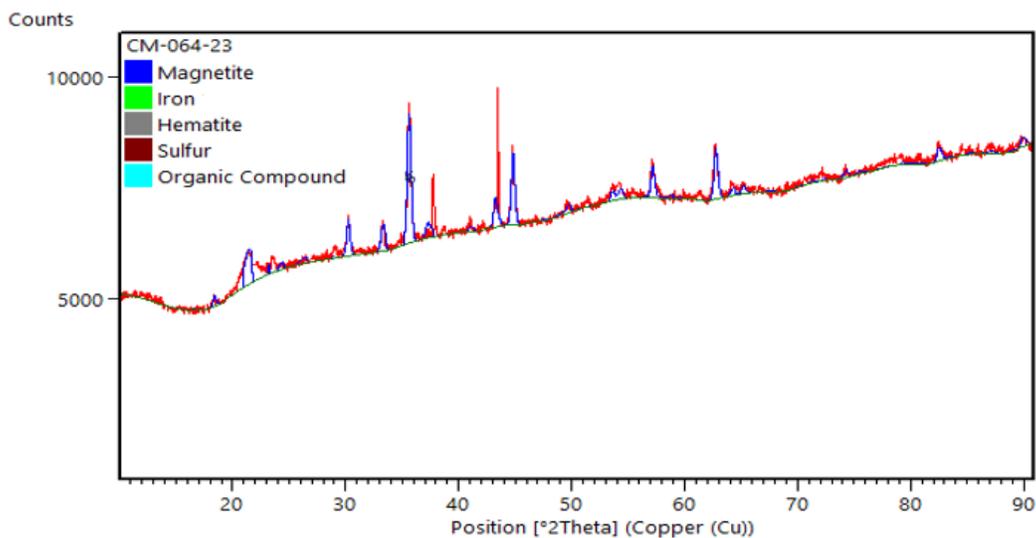
Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Como se puede observar, una fracción de los productos de corrosión son ferromagnéticos, los cuales se adhieren al imán, según la fotografía e., posiblemente relacionada con compuestos a base de hierro como la “Magnetita”. Por su parte, no se identificó reacción ante la presencia de ácido clorhídrico, descartando la presencia de carbonatos de hierro procesos de corrosión por CO_2 .

3.8 Resultados de la difracción por rayos X

Se sustraen por el método de rayado los productos de corrosión adheridos a la superficie interna del tubo, se procede a realizar la difracción de rayos x obteniendo el siguiente difractograma:

Figura 3- 9 Difractograma de productos de corrosión adheridos a la tubería



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

El software separa las fases y las identifica dándoles un código de componente, fórmula química y color propio de un patrón de difracción de muestras conocidas para buscar coincidencias con los compuestos encontrados.

Tabla 3- 9 Tabla de Resultados de difracción de rayos X

No.	Visi...	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Display Color	Database ID
1	<input checked="" type="checkbox"/>	96-900-5840	Magnetite	Fe ₂₄ O ₃₂	54	Blue	r:\Users\TUPTC\...
2	<input checked="" type="checkbox"/>	96-901-3415	Iron	Fe ₂	43	Lime	r:\Users\TUPTC\...
3	<input checked="" type="checkbox"/>	96-901-5066	Hematite	Fe ₁₂ O ₁₈	24	Gray	r:\Users\TUPTC\...
4	<input checked="" type="checkbox"/>	96-901-2362	Sulfur	S ₁₈	2	Maroon	r:\Users\TUPTC\...

Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

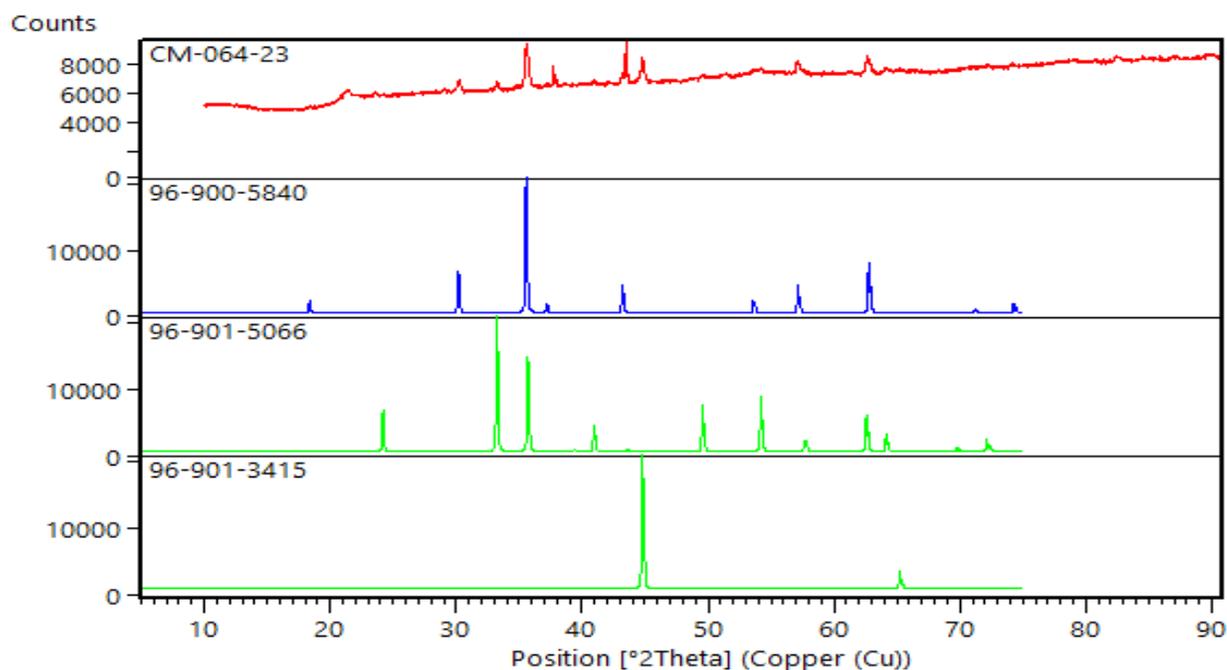
Cuan más alto es el score es más similar a la muestra patrón o perfil de difracción, en la figura 3-10 se muestra que las cartas cristalográficas usadas fueron la carta 96-900-5840 para la magnetita con un score de 54, la carta 96-901-34515 para el hierro con un score de 43, la carta 96-901-5066 para la hematita con un score de 24 y la carta 96-901-2362 para

los sulfuros con un score de 2, el pico de color azul el cual es el perfil de difracción que se está comparando y el pico de color rojo son los datos experimentales, los picos de difracción coinciden con los picos de la carta correspondiente, pero se diferencian en la intensidad, esa intensidad es obtenida mediante un ajuste realizado por el software HighScore Plus.

Con el software HighScore Plus, es posible realizar mejoras identificando las fases de los componentes encontrados durante las pruebas con este programa. La verificación de rango y los límites automáticos o manuales garantizan la estabilidad y repetibilidad de los ajustes. Esto lo maneja el software, por lo que no se requiere ninguna secuencia de activación de parámetros.

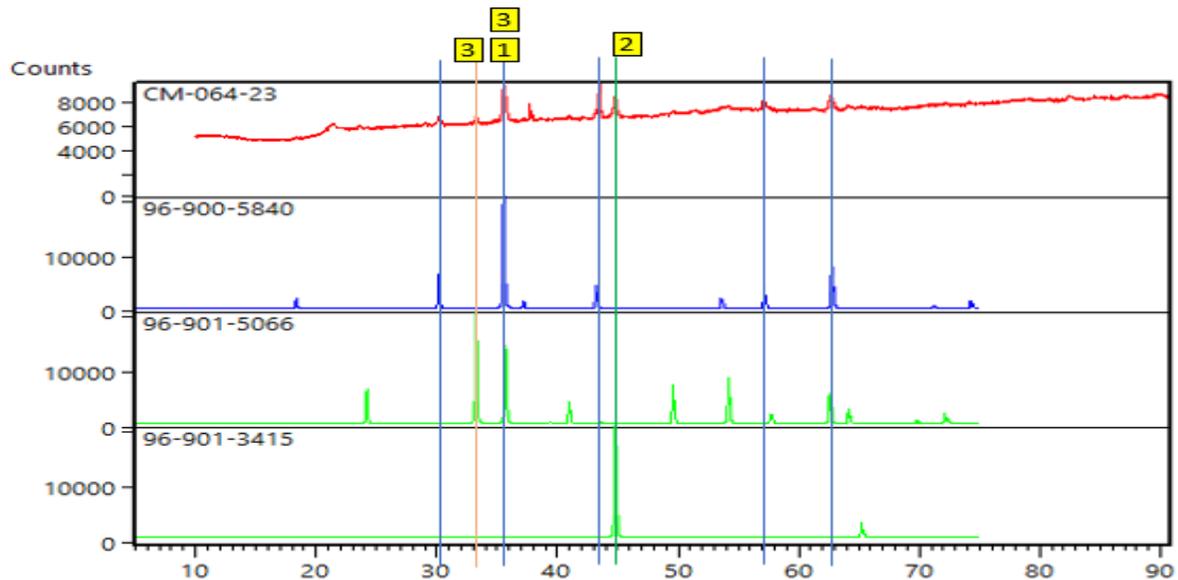
Por lo que se obtiene la tabla comparativa a continuación.

Figura 3- 10 Comparación de compuestos



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

Figura 3- 11 Superposición



Nota: Elaboración por laboratorio UPTC

La presencia de magnetita, hematita, compuestos orgánicos y azufre en los productos de corrosión de un intercambiador de calor o torre de enfriamiento puede proporcionar información sobre los tipos de mecanismos de corrosión y las condiciones ambientales a las que ha estado expuesto el intercambiador de calor. Sus componentes son:

Magnetita (Fe_3O_4): Es un producto de corrosión común en los intercambiadores de calor, especialmente en los fabricados de acero al carbono. Se forma como resultado del proceso de corrosión cuando el hierro reacciona con el oxígeno en presencia de agua (humedad) y puede acelerarse con temperaturas elevadas. La magnetita es causante de pérdida de eficiencia de transferencias de calor, capturando la temperatura impidiendo su transferencia por conducción, produciendo sobrecalentamiento en el material generando

pitting en una cara opuesta a la capa de magnetita formada en la tubería este pitting se evidencia por desprendimiento de material.

Hematita (Fe_2O_3): Es otro óxido de hierro que puede estar presente en los productos de corrosión. Puede formarse cuando las condiciones de corrosión son más severas o cuando la magnetita se expone a temperaturas más altas o ambientes químicos más agresivos.

Compuestos orgánicos: Pueden estar presentes en los productos de corrosión cuando el intercambiador de calor está expuesto a fluidos o ambientes ricos en orgánicos. Estos compuestos pueden originarse en los fluidos que se procesan, contaminantes o actividad microbiana.

Azufre (S) o sulfuros (p. ej., FeS): Los compuestos de azufre pueden estar presentes en los productos de corrosión cuando el intercambiador de calor se expone a gases, líquidos o microorganismos que contienen azufres capaces de producir sulfuros. Los sulfuros pueden reaccionar con el hierro para formar compuestos como el sulfuro de hierro (FeS).

Como se pudo determinar con los ensayos realizados a la muestra de tubería, el material ha perdido características mecánicas importantes como lo son ductilidad, dureza y resistencia a la tracción a causa de la degradación de sus componentes aleantes, con los ensayos se esperó obtener indicios determinantes que dieran señales de algún tipo de corrosión típico de calderas tal como se describió en el marco conceptual, como por ejemplo debilitamiento por hidrogeno el cual genera agrietamiento del metal, corrosión intergranular que genera micro picaduras que van volviéndose más agresivas con el paso de tiempo hasta perforar el material muchas veces también se puede encontrar compuestos provenientes de otros equipos como bombas, válvulas y filtros, estos componentes aportan un potencial electroquímico que junto con el agua generan corrosión galvánica, la aparición de elementos

como grafito y titanio hubieran sido evidencia de agente generador de corrosión, sin embargo, los resultados no fueron los esperados ya que no se detectó ningún agente mencionado anteriormente.

Los resultados de la difracción por rayos x mostraron productos de la corrosión muy relevantes como la magnetita, sulfuros de hierro y azufres, según la normativa NACE MR0175 /TM0194 estos componentes son productos típicos de un acero expuesto a un ambiente que contenga bacterias sulfato reductoras.

3.9 Corrosión influenciada microbiológicamente

El azufre está presente cuando se expone a microorganismos capaces de producir sulfuros, estos sulfuros pueden reaccionar con el hierro para formar compuestos como sulfuro de hierro y una morfología de las bacterias sulfato reductoras, el cual producen ácido sulfhídrico H_2S (*ácido sulfídrico*); siendo un ácido que aumenta el PH del agua y además es altamente toxico.

Otro producto, que se genera por las bacterias sulfato reductoras son las incrustaciones, las cuales son un depósito de mineral que cubre las superficies de las tuberías de torres de enfriamiento e intercambiadores de calor, cuando el agua se calienta, se genera un depósito de carbonato de calcio el cual se precipita bajo ciertas condiciones de calidad del agua produciendo dureza cálcica, se adhiere a la superficie del tubo cuando hay disminución del agua dentro del tubo.

Por lo tanto, se tomó una muestra de agua sobre la zona de la torre de enfriamiento del reactor y se llevó a realizar un análisis del agua para determinar la presencia de bacterias sulfato reductoras y dureza cálcica.

Tabla 3- 10 Resultados de análisis de agua positivo para bacteria sulfato reductoras

Microbiología									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGUNA NORMA	CONFORMIDAD
30/09/2023	Bacterias Sulfato reductoras	76	-	NO APLICA	UFC/100 ml ó cm3	Filtración por membrana	SM 9240D		NO APLICA
Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGUNA NORMA	CONFORMIDAD
3/10/2023	Dureza Total (A)	19,7	7,4	0,19	mg CaCO ₃ /L	EDTA Titrimetric Method	SM 2240 C. Ed 23de 2017	NO ESPECIFICA	NO APLICA
11/10/2023	Dureza Cálcica (A)	12,7	8	0,17	mg CaCO ₃ /L	EDTA Titrimetric Method	SM 2520-Ca. Ed 23de 2017	NO ESPECIFICA	NO APLICA
11/10/2023	Dureza Magnésica	7,37	4,21	NO APLICA	mg CaCO ₃ /L	Cálculo Method	SM 2520-Mg. L.	NO ESPECIFICA	NO APLICA
9/10/2023	Conductividad (A)	43,7	10	2,53	µS/cm	Eléctrométrica	SM 2510-B. Ed 23de 2017	NO ESPECIFICA	NO APLICA
6/10/2023	Sodio(A)	2,40	0,25	0,08	mg Na/L	Espectrofotométrica de absorción atómica con llama directa	SM 3030F-SM 3111.8. Ed 13	NO ESPECIFICA	NO APLICA

Nota: Tomado de resultados BioPolab

Al determinarse que existe bacterias sulfato reductoras, el cual provocan la pérdida de la protección superficial que se hace desde fabrica sobre las tuberías especiales, este tipo bacteria crea y genera corrosión y provoca paso de fluido al exterior de la tubería. Del cual, el tubo puede soportar agentes corrosivos para dar durabilidad en la tubería, pero con sustancia que posean contenidos de ambientes corrosivos, este ingresa a la microestructura del metal y se aumenta la dislocación del metal, aumentando la degradación del material[36].

En dicha investigación que realiza el autor Xie (2021), se evidencia que aparecen bacterias reductoras de sulfato debajo de la capa superficial anticorrosiva, por lo que se vuelve más dañino para el acero, lo más importante es que se evidencia la formación de

cráteres en la tubería y reduce la tensión en la tubería, provocando una tendencia a la ruptura.

Este tipo de mecanismo se puede evidenciar en la tubería, en las siguientes figuras:

Figura 3- 12 Corrosión del tubo cara interior.



Nota: Elaboración por el autor.

En la figura, se puede observar que el interior de la tubería ha perdido la protección de la tubería del material, es evidente que en el tramo de la curva existe esta falla.

La presencia de bacterias, SRB describe que esto se debe a presencia de partículas orgánicas que luego de crearse un ambiente anaeróbico y pasados los ocho días, la expansión de bacterias se propaga por el aumento de temperatura [37].

Para disminuir este tipo de crecimiento de picaduras ocasionadas por bacterias, la distribución de zonas afectadas por la temperatura ZAT, puede emplearse la disminución del valor del pH del líquido usado, con la finalidad de crear un ambiente adecuado para no fomentar el crecimiento de bacterias [38]. El tipo de pH recomendado por el autor Li 2021

para bacterias sulfato reductoras debe estar por debajo de 5,5 de pH o superiores a 8,5pH, con el fin de garantizar un ambiente que no permita la formación o inoculación de bacterias orgánicas, ya que el autor Galvin, comenta que este rango de pH, es el indicado para que las bacterias sulfato reductoras puedan colonizar el metal y ante un ambiente anaeróbico se esparza las bacterias dentro del tubo[39].

Análisis: Con los resultados obtenidos del anexo 1. Análisis químico del agua, se determinó que el fluido posee un pH cercano a los 10,79 del cual este ambiente no está provocando alteración de la superficie externa del tubo, pero dentro del tubo con pH de 8,5 se puede considerar que estaría en el ambiente para que la bacteria realice la desintegración de la capa superficial del tubo, por lo que se considera uno de los factores por los cuales afecte y se crean las picaduras en el interior de la tubería.

Conclusiones

Aunque el acero ASTM A106 es uno de los aceros aceptados por el código ASME para uso en sistemas de alta presión y altas temperaturas, es necesario utilizar un acero ASTM A213 el cual proporciona una mayor resistencia a la corrosión por el porcentaje de cromo y níquel en sus componentes aleantes.

Mantener el fluido en constante flujo para evitar acumulación de partículas y bacterias las cuales generen agentes corrosivos.

Aplicar inhibidor de corrosión para el tratamiento de los sistemas de agua de calderas, torres de enfriamiento, y sistemas cerrados que mantengan el líquido en rangos aceptables de PH, dureza, cloruros y sulfuros.

Realizar y aplicar una suavización del agua con el fin de mantener controlada la formación de incrustaciones.

Disponer de un sitio dentro de la planta para realizar pruebas de corrosión donde se puedan instalar testigos de corrosión con el fin de observar y vigilar el sistema de tuberías y determinar si es necesario aplicar químicos o cambios en el tratamiento.

Se debe garantizar un ambiente libre de las condiciones de pH entre los rangos de 5,5 a 8,5 pH para evitar la formación de ambientes corrosivos, además se debe considerar que se verifique constantemente los fluidos de trabajo entre los líquidos usados, verificando el pH.

Anexos

5.1 Anexo 01. Reporte de servicio- Análisis de agua



REPORTE DE SERVICIO
Agosto - 24 - 2023
Pagina 1 / 2
CONSECUTIVO #: 75899

Empresa	SIGRA SA	Cuenta	CALDERAS
Contacto	CALDERISTA	Cargo	MANTENIMIENTO
Teléfono		Correo	jairo.castaneda@sigra.com

CALDERA BOSCH			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación
ALCALINIDAD OH	150	ppm	100 - 600
ALCALINIDAD TOTAL	270	ppm	30 - 1.000
CONDUCTIVIDAD SISTEMA AGUA CALDERA	1.559	µS/cm	10 - 4.200
SILICE SISTEMA AGUA CALDERA	66	ppm	1 - 150
DUREZA TOTAL	2	ppm	0 - 10
HIERRO	0,30	ppm	0,00 - 3,00
FOSFATOS	23	ppm	10 - 30
PH	10,79		10,00 - 12,00
SULFITOS	25	ppm	10 - 30
ALCALINIDAD 8,2	210	Ppm	0 - 500
KS 8,2 MMOL/L	4,20	Mmol/l	1,00 - 12,00
DUREZA MMOL/L	0,020	Mmol/l	0,000 - 0,050
CLOURUOS	150	ppm	5 - 500
Dentro de parámetros			

AGUA SUAVIZADA			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación
CLOURUOS	30	ppm	0 - 300
CONDUCTIVIDAD	43	ms	0 - 3.500
DUREZA TOTAL	0	ppm	0 - 1
HIERRO	0,05	ppm	0,00 - 3,00
CLORO LIBRE	0,45	Ppm	0,00 - 0,50
Dentro de parámetros			

AGUA DESAIREADOR			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación
HIERRO	0,10	ppm	0,00 - 0,30
CONDUCTIVIDAD	34	µS/cm	10 - 4.200
DUREZA TOTAL	0	ppm	0 - 10
PH	8,50		7,00 - 11,00
CLOURUOS	20	Ppm	0 - 300
OXÍGENO DISUELTO	0,00	Ppm	0,00 - 0,05



REPORTE DE SERVICIO
Agosto - 24 - 2023
Pagina 2 / 2

CONSECUTIVO #: 75899

ALCALINIDAD 8,2	20	Ppm	0 - 50
KS 8,2 MMOL/L	0,40	Mmol/l	0,00 - 0,70
Dentro de parámetros			
CALDERA COLMAQUINAS			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación
CONDENSADO			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación
DESAIREADOR COLMAQUINAS			
Variable	Resultado	Unidades	Especificación

ELABORO
JAHIR GODOY
 REPRESENTANTE

APROBADO POR
CALDERISTA
MANTENIMIENTO

John Godoy
 24 Agosto 2023

Referencias Bibliográficas

- [1] ASME, «BPVC Sección VIII-1 Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión (Spanish) - ASME». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-viii-1_es-bpvc-section-viii-1-reglas-para-la-construccion-de-recipientes-presion
- [2] ASTM A370, «ASTM A370/ ASME SA-370». Accedido: 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.metalspiping.com/astm-a370-asme-sa-370.html>
- [3] ASTM E23, «Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/e0023-23a.html>
- [4] ASTM E8/E8M, «E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.astm.org/e0008_e0008m-22.html
- [5] ASTM A1058, «Standard Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products—Metric». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/a1058-19.html>
- [6] ASTM A0210, «Standard Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.astm.org/a0210_a0210m-19.html
- [7] H. N. T. Naranjo y J. L. R. Zambrano, «ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE FALLA EN UN TUBO DE COBRE Y UN RACOR DE BRONCE PERTENECIENTE A UNA CALDERA DE UNA MAQUINA DE CAFE», 2018.
- [8] J. D. C. Castro y E. D. C. Ladino, «Casos aplicados del análisis de causa raíz: revisión», *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 29, n.º 1, Art. n.º 1, ago. 2019, doi: 10.18359/rcin.3197.
- [9] E. Espejo y J. Martínez, «Análisis de la falla por agrietamiento experimentada en tuberías del evaporador de una caldera acuatubular | Scientia et Technica». Accedido: 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5153>
- [10] Y. Acuña, «ANÁLISIS_DE_FALLAS_EN_UN_TUBO_DE_CALDERA.pdf». 2016.
- [11] A. E. C. Velandia, M. A. R. Martín, y E. U. Castro, «Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para la caldera pirotubular de», 2022.
- [12] J. Riojo, «Diseño y Análisis de un sistema de tuberías en línea de antorcha», Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/288497884.pdf>
- [13] E. M. Díaz-Cedré, C. A. Sánchez-Pérez, A. Cruz-Crespo, J. I. Ruiz-Vela, M. Tello-Rico, y N. M. Pérez-Pino, «Causa de falla de un codo de acero inoxidable 316 en un circuito de enfriamiento de un reactor», *Min. Geol.*, vol. 34, n.º 4, pp. 456-469, dic. 2018.
- [14] L. Contreras, «ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.», 2015.
- [15] E. A. Espinosa, «Título: Análisis de falla de un tubo colapsado del Generador de vapor en La CTE Felton.», 2012.

- [16] M. Ávila y P. Fernando, «Detección de fallas superficiales e internas en tuberías de alta presión para motores estacionarios por el método de ultrasonido», 2015.
- [17] TLV, «La Corrosión en Tuberías | TLV - Compañía Especialista en Vapor (America Latina)». Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/corrosion.html>
- [18] «Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) | Universidad de Burgos». Accedido: 20 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>
- [19] «Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/FESEM) - Universidad de Almería». Accedido: 20 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido>
- [20] C. de I. Tecnológica, *Informacion Tecnologica*. Centro de Informacion Tecnologica, 1998.
- [21] C. Rangel y A. Guadalupe, «Diseño de laboratorio de materiales y aleaciones metálicas», bachelorThesis, San Pedro Garza García: UDEM, 1996. Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.udem.edu.mx/handle/61000/2474>
- [22] SCI, «Ensayo Macrográfico: el estudio del metal | SCI Control & Inspección». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://scisa.es/ensayo-macrografico/>
- [23] A. E. Ares, L. M. Gassa, S. F. Gueijman, y C. E. Schvezov, «Parámetros de solidificación versus resistencia a la corrosión de aleaciones ZA4 Y ZA27», *An. AFA*, vol. 19, n.º 1, 2008, Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/120798>
- [24] Innovatest, «ENSAYOS DE MICRODUREZA: PRINCIPIOS Y APLICACIONES - Durometros innovatest». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://innovatest-iberica.es/?p=354>
- [25] C. X. Ren, Q. Wang, J. P. Hou, Z. J. Zhang, Z. F. Zhang, y T. G. Langdon, «The nature of the maximum microhardness and thickness of the gradient layer in surface-strengthened Cu-Al alloys», *Acta Mater.*, vol. 215, p. 117073, ago. 2021, doi: 10.1016/j.actamat.2021.117073.
- [26] S. Zhang *et al.*, «Root cause analysis of liner collapse and crack of bi-metal composite pipe used for gas transmission», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 132, p. 105942, feb. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105942.
- [27] H. Ding *et al.*, «Cracking analysis of a newly built gas transmission steel pipe», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 118, p. 104868, dic. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104868.
- [28] M. P. Garcia, A. Gervasyev, C. Lu, y F. J. Barbaro, «Chemical composition and weld cooling time effects on heat-affected zone hardness of line pipe steels», *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 200, p. 104837, dic. 2022, doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104837.
- [29] E.-H. Han, Z. Zhang, y J. Wang, «Root cause analysis for cracked pipe in auxiliary system in nuclear power plant», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 150, p. 107386, ago. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107386.

- [30] Á. D. Bedoya-Zapata, C. M. Franco-Rendón, H. León-Henao, J. F. Santa, y J. E. G. Barrada, «Failure analysis of a welded stainless-steel piping system with premature pitting», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 119, p. 104986, ene. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104986.
- [31] H. Liu *et al.*, «Fracture analysis on dissimilar metal welding zone of vessel CPP power pipe», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 127, p. 105440, sep. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105440.
- [32] A. M. Valero, «CORROSIÓN GALVÁNICA», 2011.
- [33] Sunny Steel, «Tubería de acero anticorrosión, Tubería anticorrosión, Tubería 3PE». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sunnysteel.com/anti-corrosion-pipe.php>
- [34] ds916, «ASTM A213 Stainless Steel Tubing Specification», Dongshang Stainless. Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dsstainlesssteel.com/astm-a213-stainless-steel-tubing-specification/>
- [35] Dongshan, «ASTM A213 Stainless Steel Tubing Specification», Dongshang Stainless. Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dsstainlesssteel.com/astm-a213-stainless-steel-tubing-specification/>
- [36] F. Xie, J. Li, T. Zou, D. Wang, M. Wu, y X. Sun, «Stress corrosion cracking behavior induced by Sulfate-reducing bacteria and cathodic protection on X80 pipeline steel», *Constr. Build. Mater.*, vol. 308, p. 125093, nov. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125093.
- [37] F. Xie, X. Wang, D. Wang, M. Wu, C. Yu, y D. Sun, «Effect of strain rate and sulfate reducing bacteria on stress corrosion cracking behaviour of X70 pipeline steel in simulated sea mud solution», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 100, pp. 245-258, jun. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.009.
- [38] J. Li, F. Xie, D. Wang, C. Ma, M. Wu, y K. Gong, «Effect of magnetic field on stress corrosion cracking induced by Sulfate-reducing bacteria», *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, p. 124521, oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124521.
- [39] R. M. Galvín, «Corrosión y agresividad en aguas residuales».