

Caracterización mecánica de defectos en las Unidades de Líneas de Acero (ULA) operativas en pozos petroleros

Mechanical characterization of defects in slickline units (LSUs) operating in oil wells

Mauricio Arellano Pastrana¹, Jesus Bermúdez Vilchiz², Apolinar Albiter Hernández³,
Víctor Augusto Castellanos Escamilla⁴, Iván Enrique Martínez Merlín⁵

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla,
División de Estudios de Posgrado e Investigación, Estado de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0001-5445-8258 | M18250512@tlalnepantla.tecnm.mx

² ORCID: 0009-0000-0137-0458 | M18250511@tlalnepantla.tecnm.mx

³ ORCID: 0000-0002-9097-5981 | aalbiter@imp.mx

⁴ ORCID: 0000-0001-8511-4477 | victor.ce@tlalnepantla.tecnm.mx

⁵ ORCID: 0000-0001-9030-5024 | iemerlin@hotmail.com

Recibido 07/11/2024, aceptado 20/12/2024.

Resumen

Las actividades en pozos petroleros se ven afectadas con fallos catastróficos desencadenados por el deterioro en las líneas de acero en diferentes operaciones mecánicas, inspeccionarías y de rastreo. Es por ello que en este trabajo se prueban diferentes tipos de daños en las líneas de acero (con profundidades de 0.5, 1 y 1.5 mm y anchuras de 1, 4 y 6.5 mm, además de perforaciones circulares de 2.5 mm de diámetro a las mismas profundidades) las cuales serán sometidas a cargas de tensión controladas, con el propósito de caracterizar las respuestas mecánicas de estas estructuras bajo condiciones operativas en pozo. Se realizaron ensayos de tensión para evaluar la resistencia y el comportamiento de las líneas de acero en condiciones de esfuerzo tensil. Estos ensayos permiten determinar los límites de elasticidad, la resistencia máxima y alargamiento máximo, que son indicadores cruciales para entender el rendimiento estructural de los materiales.

El objetivo principal de caracterizar defectos en una Unidad de Línea de Acero (ULA) es desarrollar un sistema eficiente para la detección de anomalías durante la operación de estas por medio de un sensor. Los hallazgos revelan que los defectos más profundos y anchos funcionan como amplificadores de estrés, comprometiendo enormemente la resistencia estructural de la ULA. Las muestras sin defectos alcanzaron tensiones máximas de 2,317 MPa, mientras que las que presentaban defectos severos exhiben valores inferiores a 1,800 MPa. Realizar un análisis detallado de la pérdida de material y evaluar la resistencia estructural de las líneas apoya en la determinación de la aptitud de la unidad para ejecutar maniobras seguras y efectivas en pozos de hidrocarburos.

Palabras clave: pozos petroleros, concentrador de esfuerzos, pruebas de tensión, caracterización de daños, ULA, SAF 2205.

Abstract

Oil well activities are affected with catastrophic failures triggered by the deterioration of slickline in different mechanical, inspection and tracing operations. That is why in this work different types of steel line damage (with depths of 0.5, 1 and 1.5 mm and widths of 1, 4 and 6.5 mm, in addition to circular perforations of 2.5 mm diameter at the same depths) are tested and subjected to controlled tensile loads, with the purpose of characterizing the mechanical responses of these structures under downhole operating conditions. Tensile tests were performed to evaluate the strength and behavior of the steel lines under tensile stress conditions. These tests allow the determination of yield strength, ultimate strength and maximum elongation, which are crucial indicators to understand the structural performance of the materials.

The main objective of characterizing defects in a Steel Line Unit (SLU) is to develop an efficient system for the detection of anomalies during operation by means of a sensor. The findings reveal that deeper and wider defects function as stress amplifiers, greatly compromising the structural strength of the ALU. Samples without defects reached maximum stresses of 2,317 MPa, while those with severe defects exhibit values below 1,800 MPa. Performing a detailed analysis of material loss and evaluating the structural strength of the lines supports the determination of the unit's suitability to perform safe and effective maneuvers in hydrocarbon wells.

Index terms: oil wells, stress concentrator, stress tests, damage characterization, ULA, SAF 2205.

I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera hoy en día utiliza una multiplicidad de procesos y herramientas para gestionar la terminación de pozos, la reparación y la optimización de la vida operativa de los pozos petroleros en diferentes etapas. Estas etapas son muy importantes para maximizar la producción y aumentar el ciclo de vida operativo del pozo, lo que a su vez impacta directamente en la rentabilidad de las operaciones.

Se caracterizan operaciones comunes, como el bombeo, métodos neumáticos y procedimientos de configuración, adaptados a problemas que podrían ocurrir en relación con las operaciones [1]. Las Unidades de Línea de Acero (ULA) se utilizan para llevar a cabo estas operaciones [1]. Estas unidades son una parte esencial para realizar trabajos cuando se necesita alambre de acero especializado, optimizando el rendimiento del pozo y manteniendo la seguridad en las operaciones.

Sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión han sido estudiadas anteriormente. Un ejemplo destacado es el SAF 2205, que es el dúplex más utilizado, presentando un equilibrio perfecto de fases ferríticas y austeníticas que proporciona buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión para un rango amplio de entornos [2], [3], [4], [5].

Sin embargo, solo unos pocos estudios informaron sobre ULA con tales características, operando bajo condiciones extremas utilizadas para simular los procesos de formación de fallas, como fatiga y envejecimiento [2], [3], [4].

El objetivo del presente trabajo es caracterizar la respuesta mecánica de las ULA sometidas a defectos controlados que replican los daños más típicamente reportados en operaciones de pozos petroleros. El objetivo es entender cómo esto afecta la resistencia estructural de las líneas a diferentes geometrías y profundidades de defectos mediante ensayos de tracción y un cambio en la comprensión de la geometría y profundidad del defecto.

Este sistema tiene un contador para medir la longitud del alambre que se desenrolla del carrete, porque si falla, podría costar enormemente al proyecto, así como mucho trabajo potencial y tal vez incluso una gran explosión, lo que justifica mucha atención en validar una longitud adecuada.

El diseño del sistema de carrete que muestra los componentes principales y su disposición funcional se muestra en la Fig. 1 [1].



Fig. 1. Carrete de unidad de línea de acero fuera de servicio.

Además, se deben monitorear los parámetros operativos, como la tensión de la línea y la duración del despliegue, para asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad. La creación de sistemas de monitoreo en tiempo real ha sido posible gracias a los desarrollos en sensores que proporcionan información adicional al proceso y al área que permite ajustes en el ULA (Unidad de levantamiento artificial).

Por lo tanto, el ULA acompañado de tecnología hidráulica y sistemas de medición avanzados es uno de los componentes más importantes que asegura la eficiencia y seguridad de las operaciones petroleras.

En la Fig. 2 podemos observar un diagrama donde nos especifica como son las fuerzas que se aplican en las ULA en operaciones, la flecha azul indica las fuerzas de tensión, el vector rojo es el peso de la herramienta que está en uso en operaciones, el vector verde son fuerzas dinámicas, que esto representa las vibraciones e impacto mecánico típicos en operaciones. Lo cual se destaca el ambiente en el que están como la temperatura de ($\leq 120^{\circ}\text{C}$) y la exposición a la corrosión (H_2S , CO_2) el cual afecta significativamente el comportamiento de las ULA.

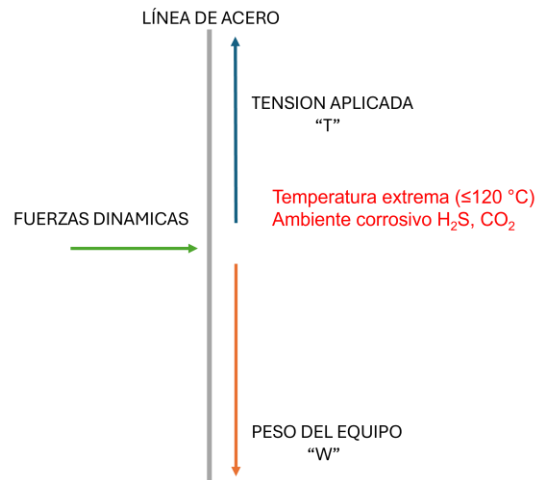


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre de la línea de acero.

Con esto en mente las ULA están alojadas para afrontar las cargas que actúan sobre ellas en los pozos de petróleo. Tales tensiones axiales son creadas por el peso del equipo asociado, el cual puede incluso alcanzar más de 500 kg [1].

Las ULA son cruciales para el negocio de hidrocarburos, llevando a cabo una variedad de operaciones que se pueden agrupar en mecánicas, recolección de información y muestreo PVT (Presión, Volumen y Temperatura) [1]:

- Operaciones mecánicas: Contra los impactos que sus herramientas de percusión, como las cizallas, generan para la activación y recuperación de dispositivos mecánicos, la verificación de las condiciones de las tuberías productivas y la recuperación de fluidos o sólidos.
- Recolección de información: — Registro de temperatura; — Monitoreo de producción; — Calibración de tuberías; — Recolección de muestras PVT (necesarias para el análisis de las condiciones del pozo).
- Muestreo PVT: Comprender el comportamiento de los fluidos en el reservorio y optimizar la producción.

Además, las ULA necesitan propiedades específicas, tales como resistencia a la corrosión y a la flexión, que requieren seleccionar aceros inoxidable apropiados para resistir ambientes hostiles en pozos profundos donde son susceptibles tanto a ataques corrosivos como a esfuerzos mecánicos. Tales aceros son importantes cuando se usan en pozos que incluyen gas y petróleo [1], [5], [6].

Las ULA que se utilizan para Petróleos Mexicanos (PEMEX) están hechas principalmente con aceros SANICRO 28 y DUPLEX SAF 2205. Estos aceros son ampliamente empleados no solo en líneas de acero, sino también en tuberías flexibles. Su resistencia a ambientes con azufre de hidrógeno (H_2S) los hace altamente efectivos frente a la corrosión [1], [10].

El **acero inoxidable dúplex SAF 2205** (UNS S31803/S32205) es una aleación ampliamente utilizada debido a su excelente resistencia a la corrosión y altas propiedades mecánicas [3], [7], [8], [9]. Se clasifica como un acero inoxidable dúplex porque tiene una estructura equilibrada de fases ferrítica y austenítica, lo que le confiere una combinación de propiedades de ambos tipos de aceros. A continuación, se muestra en la Tabla 1 la información sobre sus propiedades mecánicas, químicas.

TABLA 1. COMPOSICIONES QUÍMICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE SAF 2205 [7], [3].

Composición química (%)	
Composición química	valores típicos
Cromo	21-23%
Níquel	4.5-6.5%
Molibdeno	2.5-3.5%
Manganeso	máx. 2%
Nitrógeno	0.08-0.2%
Carbono	máx. 0.03%
Silicio	máx. 1%
Azufre	máx. 0.02%
Fósforo	máx. 0.03%
Hierro	balance
Propiedades mecánicas	
resistencia a la tracción	620-850 Mpa
límite elástico	≥ 450 Mpa
alargamiento	25-30%
dureza brinell (hb)	máx. 290 hb
módulo elástico	200 gpa

4

Debido a la naturaleza de las ULA de estar sujetas a fuerzas constantes que tienden a causar que las ULA se fracturen en puntos críticos a lo largo de los esqueletos de estas estructuras, al igual que con la mayoría de los defectos estructurales y los concentradores de esfuerzo como muescas o factores de concentración de esfuerzos conocidos, se determinó que se realizarían pruebas de tensión.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar daños controlados con dimensiones y profundidades específicas, para realizar pruebas de tensión, estas pruebas permiten evaluar el comportamiento mecánico con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de las ULA mediante pruebas de tensión esto para poder detectar los daños cuando la ULA este en operación y así poder detectar, verificar y garantizar si es útil que pueda estar en pozo en operaciones.

II. METODOLOGÍA

El estudio actual se realizó en muestras de acero inoxidable SAF 2205, que se emplea comúnmente en la producción de ULA debido a la alta resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión que proporciona. A continuación, se presenta el procedimiento organizado en etapas clave del proceso en la Fig. 3.

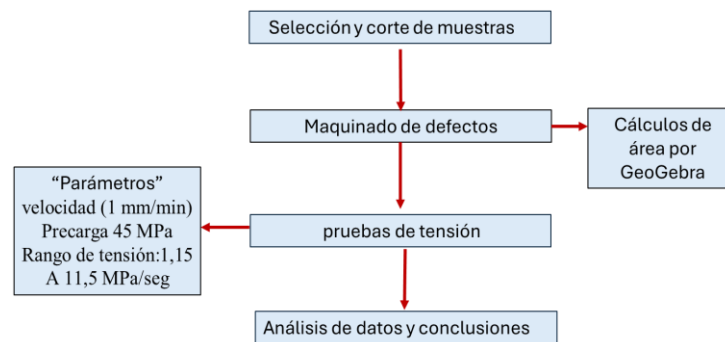


Fig. 3. Diagrama de bloques de metodología.

Para este estudio en este caso se definen las condiciones experimentales utilizadas para proporcionar datos de prueba sobre la efectividad de la Línea de Acero en ULA bajo condiciones representativas de laboratorio y de campo. Por último, las muestras fueron cortadas de un nuevo carrete de línea de acero (sin usar), de modo que las propiedades iniciales del material no se vean alteradas por una vida útil previa o por acciones ambientales.

El defecto no solo hizo que las muestras entalladas variaran en profundidad (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) y ancho (1 mm, 4 mm, 6,5 mm), sino también con puntos circulares con un diámetro de 2,5 mm, las pruebas de tracción se realizaron usando una máquina universal INSTRON 4482, basada en las recomendaciones de ASTM E8/E8M [10], [11]. Se aplicaron velocidades de desplazamiento según el tipo de texturizado, las dimensiones de la muestra y el propósito; la velocidad utilizada fue de 1 mm/min y con una precarga de 45 MPa con rango de tensión de 1,15 a 11,5 Mpa/s.

Bajo condiciones simuladas, se estudió la resistencia mecánica de la ULA diseñada con variaciones de propiedades, verificadas por área efectiva y funciones geométricas, por configuración, con cuatro pruebas realizadas de cada daño [7], [12].

A. Preparación de muestras

Para llevar a cabo este análisis, se tomaron varias muestras del carrete de ULA SAF 2205, cada una con una longitud de 50 cm. A estas muestras se les realizaron dobleces de 4.5 cm en forma de gancho en sus extremos para que las mordazas de la máquina de tensión tengan una mejor sujeción, como se ilustra en la Fig. 4. Este procedimiento nos permitirá evaluar de manera más precisa los efectos del esfuerzo mecánico en el material, así como identificar las características específicas de cada tipo de daño.

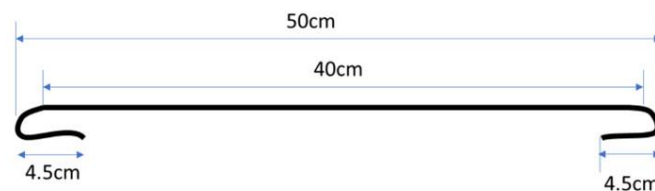


Fig. 4. Muestra de líneas de acero.

Los daños aplicados en ULA SAF 2205 fueron elegidos intencionadamente para permitir una investigación sistemática y permitir la medición precisa de cada tipo de defecto. Dado que los daños reales no permitirían mediciones exactas, estos defectos se simularon para modelar condiciones reales con más control sobre sus características.

Los daños se registraron de manera sistemática y se codificaron con un sistema de colores (véase Fig. 5), para facilitar su identificación y seguimiento en evaluaciones posteriores.

La clasificación incluyó profundidad, anchura y, en casos más serios, la geometría de la línea cambió. Forman la base para evaluar la influencia del desgaste y la fatiga en el material, así como la integridad estructural a largo plazo del material. Cuando sea necesario, se incluye también información relacionada con el período de exposición a condiciones operativas extremas o las tensiones mecánicas experimentadas, para proporcionar una comprensión más completa del desempeño del SAF 2205 en aplicaciones relevantes.

Esta estrategia estructurada no solo mejorará nuestra capacidad para el reconocimiento y clasificación de daños a todos los niveles, sino que también proporcionará ideas importantes para desarrollar un plan estratégico y optimizar el rendimiento del material de la ULA durante la operación en pozos petroleros.

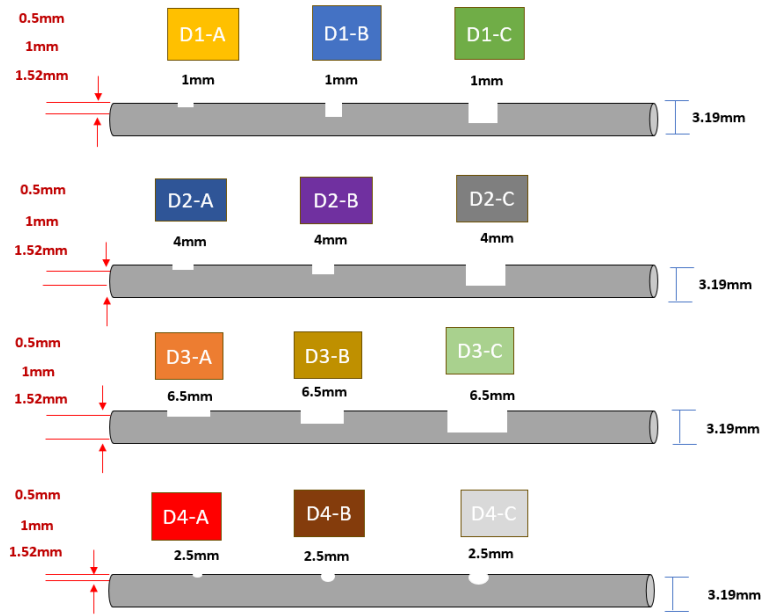


Fig. 5. Daños de muestras de líneas de acero.

Se cortaron ubicaciones concretas (correctamente) utilizando máquinas fresadoras de 3 ejes DIMSA FUX-I20 con cortadores de disco, como se ve en la Fig. 6a, anchuras de 1, 4 y 6.5 mm, así como profundidades que van desde 0.5 a 1 y 1.5 mm. Luego, se propuso centrar las muestras en la cama de la fresadora (véase Fig. 6b), para realizar los cortes con precisión.

La cama de la fresadora permite ajustar la profundidad de cualquier corte, que se puede realizar y mostrar a las profundidades deseadas en la Fig. 6c, permitiendo realizar el defecto en la ULA SAF 2205 puede alcanzar en un entorno real. Con estos cortes sistemáticos, los defectos generados no solo imitan daños reales, sino que también permiten una visión estructural exhaustiva y una evaluación del rendimiento de los materiales bajo ciertos escenarios de carga.



Fig. 6. Preparación de las muestras de ULA. a) Discos de corte y herramientas para realizar pruebas, b) Preparación de muestras, c) Realización de muesca a las muestras, d) Muestras realizadas.

Después de eso, se realizaron daños circulares con el taladro central, como se ve en la Fig. 7. Esto se hizo con un tornillo de banco en el que las piezas estaban correctamente centradas para asegurar que el corte fuera perpendicular.

Esta perforación se realizó a diferentes profundidades para entender el efecto del diámetro y la profundidad de los cortes en la integridad del material.

Estas pruebas y análisis nos ayudarán a proporcionar una comprensión del comportamiento del material, así como a definir estrategias de mantenimiento y mejora para su uso industrial.

7



Fig. 7. Realización de defecto circulares.

Tras la creación de daños, ilustrada en la Fig. 8, se aplicaron 12 tipos de daños a las muestras de ULA, tal como se indica en la Fig. 6.

B. Cálculo de áreas transversales

La sección transversal de cada una de las muescas se calculó utilizando métodos de cálculo integral en GeoGebra para determinar las áreas con mayor precisión y menor variabilidad, como se observa en la Fig. 8. Hay varios programas resumidos que muestran una representación gráfica y realizan un análisis matemático exacto que permite el cálculo correcto de las áreas a partir de las geometrías derivadas del corte.

Usando GeoGebra como herramienta para el cálculo integral, fue posible determinar el área de las secciones transversales de cada uno de los defectos estudiados. Este proceso permitió establecer la función correspondiente que se describe en la Ecuación 2.

GeoGebra se empleó para visualizar gráficamente el escenario y derivar los cálculos requeridos, asegurando precisión y facilidad de análisis.

Al evitar extremos en la deformación en los extremos, este método representa una representación más robusta y realista de los cálculos de tensión, proporcionando una evaluación más precisa del comportamiento del material bajo condiciones de carga.

∞

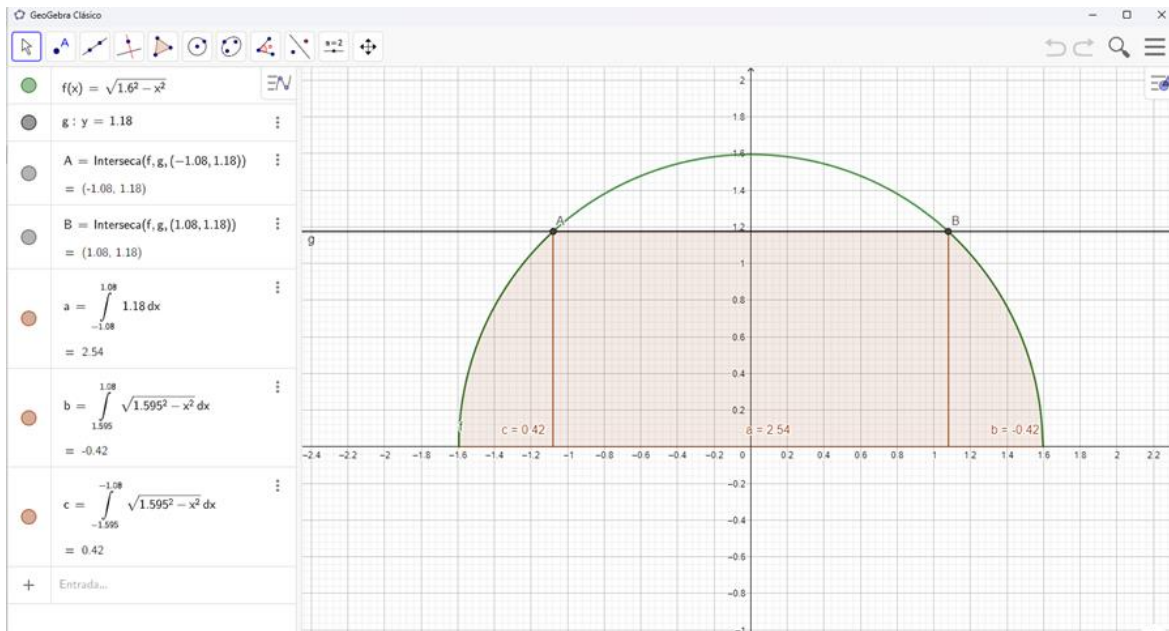


Fig. 8. Cálculo de áreas de muescas.














Iniciando el análisis en la función, tenemos el rango original del ULA SAF 2205, que tiene un diámetro de 3.19 mm, y al calcular, tenemos un radio de 1.59 mm. A partir de esto, establecimos la función gráfica correspondiente, identificada en la ecuación 2.

Paralelamente, tenemos una línea que es la muesca. En este caso, tenemos la definición de 2.36 mm porque está relacionada con las características geométricas del material o las tolerancias permitidas por el proceso. Cabe señalar que: "La profundidad de 2.36 mm puede considerarse como un límite establecido según los parámetros limitantes destinados al material, ya que, con esta, se asegura que la integridad estructural del material no está en riesgo". Esta recta se puede expresar como $g(x) = 1.8$. lo que se asume como una simplificación del comportamiento de la profundidad a lo largo de la pieza, permitiendo un cálculo más sencillo basado en aproximaciones empíricas o consideraciones geométricas prácticas.

$$f(x) = \sqrt{1.6^2 - x^2} \quad (1)$$

Posteriormente, se identificó los puntos de intersección entre la recta y la circunferencia, donde se utilizaron estos puntos para calcular la integral de las funciones en el intervalo determinado por dichos puntos de intersección. Este procedimiento permite determinar el área de la sección transversal resultante como se describe en la Tabla 2.

TABLA 2.
ÁREAS DE LAS DIFERENTES MUESCAS EN ULA.

Defectos	Tipo de defecto	Área (mm ²)
	S/D	7.99
	D1-A	6.76
	D1-B	5.48
	D1-C	4.38
	D2-A	7
	D2-B	4.66
	D2-C	1.76
	D3-A	6.34
	D3-B	4.06
	D3-C	1.02
	D4-A	7.76
	D4-B	7.64
	D4-C	7.24

En lo estipulado en la norma ASTM E8 [10], realizamos una longitud calibrada de 100 mm. A partir de esta longitud, calculamos la deformación unitaria utilizando la ecuación 2 [9]. Posteriormente, se procede a determinar el esfuerzo para cada una de las pruebas realizadas. Finalmente, se promediaron los resultados obtenidos para cada uno de los defectos analizado como se muestra en la Tabla 3.

$$e = \frac{\Delta L}{l} \quad (2)$$

C. Pruebas de tensión

Las propiedades mecánicas se caracterizaron mediante ensayos de tracción utilizando una máquina de ensayos universal INSTRON 4482 (véase Fig. 9). Se probó cada una de las muestras con los diversos daños realizados.

Se realizaron 4 ensayos para cada tipo de muestra, se considera estas 4 muestras, ya que estos resultados fueron repetitivos, por ende, se decidió tomar en cuenta esos modelos el cual nos proporcionaron datos representativos sobre las cargas máximas alcanzadas durante el ensayo. El enfoque experimental proporciona información sobre la resistencia del SAF 2205 a varios tipos de daños y también, cuando se definen las características de carga, el comportamiento del SAF 2205 bajo condiciones aplicadas.

Estas pruebas proporcionarán datos esenciales para informar sobre la durabilidad a largo plazo de este material en aplicaciones de pozos petroleros, así como para establecer modelos predictivos de su rendimiento a largo plazo [13], [14].



Fig. 9. Ensayo de tensión en máquina universal INSTRON 4482.

La máquina universal INSTRON 4482 está equipada con varios tipos de mordazas, dependiendo del tipo de prueba. Específicamente, se utilizaron mordazas que sujetaban firmemente los hilos de acero de línea durante las pruebas de tensión.

Se seleccionaron intermediarios que evitan el deslizamiento y permiten una distribución uniforme de fuerzas para obtener resultados estables como se observa en la Fig. 10 se muestra el montaje utilizado.



Fig. 10. Preparación de la máquina para pruebas de tensión.

El esfuerzo de tracción se obtuvo a partir de estos datos utilizando la ecuación de esfuerzo de acuerdo con la carga máxima y el área de superficie de las muestras, como se muestra en la ecuación 3 [15]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

La tensión máxima σ es proporcional a una fuerza aplicada P por el área A donde se aplica esta carga (1).

Si se pierde anchura durante el proceso de corte del material en muestras, el área de la sección transversal cambia y eso puede afectar mucho a los resultados del esfuerzo de tracción.

Como ejemplo realizamos las primeras muestras con defecto D1-A el cual obtuvimos carga de 18,518 N y tiene un área de 6.76 mm², el cual vamos a realizar el cálculo de esfuerzo con la ecuación 3 de igual forma se realizó el cálculo de las elongaciones con la ecuación 2:

$$\sigma = \frac{12,073 \text{ N}}{6.76 \text{ mm}^2} = 1,785 \text{ MPa} \quad e = \frac{100.52-100}{100} = 0.0052 \text{ mm/mm}$$

11

D. Concentrador de esfuerzos

En este contexto, es relevante mencionar la propiedad de la mecánica de concentración de esfuerzos. Según esta propiedad, en estructuras sometidas a tensión o compresión, los cambios geométricos generan áreas de concentración donde se acumulan los esfuerzos, resultando en una reducción del área efectiva [3], [13], [16], [17], [18], [19]. Por lo tanto, los resultados obtenidos para las muescas más profundas indican una mayor acumulación de carga.

Para analizar con mayor detalle este fenómeno, se emplea la siguiente ecuación, donde K representa el factor de concentración de esfuerzos se divide el esfuerzo máximo en probeta con daño entre el esfuerzo en la muestra sin daño:

$$K = \frac{\text{Esfuerzo Maximo en la probeta con muesca}}{\text{esfuerzo en la probeta sin muesca}} \quad (4)$$

Este enfoque permite cuantificar cómo las variaciones en la geometría de los defectos afectan la distribución del esfuerzo en el material, brindando una mejor comprensión de su comportamiento estructural bajo cargas [4].

III. RESULTADOS

La Fig. 11 muestra los defectos realizados sobre el material, como podemos observar las dimensiones ya proporcionadas de 1, 4, 6.5 mm de anchura en el caso de las muescas con profundidades de 0.5, 1.0, 1.52 mm en el caso de los defectos de tipo circular (D4) tienen un diámetro de 2.5 mm con las mismas profundidades que las otras muestras, el cual tenemos por cuatuplicado cada una de los defectos.

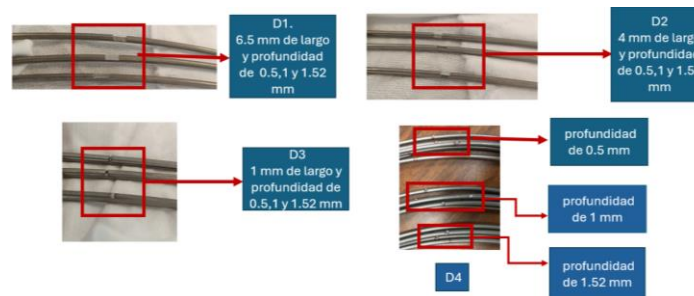


Fig. 11. Defectos realizados.

En la siguiente tabla se muestra las cargas aplicadas de cada uno de los defectos promediado de cada una de las muestras de los diferentes defectos realizados.

TABLA 3.
CARGAS DE CADA MUESTRA DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

Muestra	Cargas
S/D	18,518.50
D1-A	12,073.29
D1-B	10,488.06
D1-C	9,313.98
D2-A	12,501.93
D2-B	10,507.08
D2-C	7,051.17
D3-A	11,661.28
D3-B	9,669.70
D3-C	6,770.84
D4-A	12,558.86
D4-B	11,175.86
D4-C	9,635.28

12

A. Ensayos de tensión

Las siguientes tres gráficas presentadas muestran el comportamiento esfuerzo-deformación de diferentes muestras (D1, D2, D3, D4) en distintas condiciones (A, B y C).

1. **Gráfico A:** Las tensiones máximas para las muestras estuvieron entre 1500 MPa y 1800 MPa. Todas muestran un comportamiento dúctil: la tensión aumenta con el aumento de la deformación hasta valores de deformación superiores a 0.25 mm/mm hasta la fractura. (Cuando los materiales están en esta condición, puede influir significativamente en la noción de deformación y en su mayoría sobreviven al efecto de un uso indebido/proceso hasta cierto punto).
2. **Gráfico B:** Por el contrario, en este caso, la tensión máxima disminuye aproximadamente de 1000 MPa a 1200 MPa. Las muestras aquí presentan un comportamiento más frágil, lo cual se puede observar a través de las pronunciadas pendientes de la curva y una fractura repentina a niveles de deformación más bajos (es notable que tiende a romperse como máximo con ~0.16 mm/mm). Todavía corresponde a una ruptura muy repentina y esta tensión alcanza su límite mucho más rápidamente que en la serie A, lo que sugiere una menor capacidad de deformación.
3. **Gráfico C:** Este gráfico muestra nuestras tensiones más altas, donde la muestra D3-C alcanza un valor máximo de 4500 MPa y las otras muestras entre 1000 MPa y 3000 MPa. Sin embargo, estas altas tensiones (considerablemente más de lo que se esperaría en condiciones in vivo) son comprensiblemente demasiado para muchas de las curvas, que muestran rupturas bruscas a deformaciones relativamente bajas (más de 0.14 mm/mm parecería ser el límite del tejido blando). Para los especímenes en la serie C, hay muy poca deformación plástica y en ciertos casos, como el espécimen D3-C, el espécimen falla de una manera casi explosiva después de alcanzar su tensión máxima.

Estas tres series revelan una clara evolución del comportamiento; las muestras de la serie A son más dúctiles, sufren mayores deformaciones, mientras que las de las series B y C tienen un comportamiento más frágil, con fracturas más bruscas y menos deformación antes de la rotura de la pieza.

Los resultados del perfilado de las muestras indican que hay diferencias en el rendimiento mecánico en función de la carga.

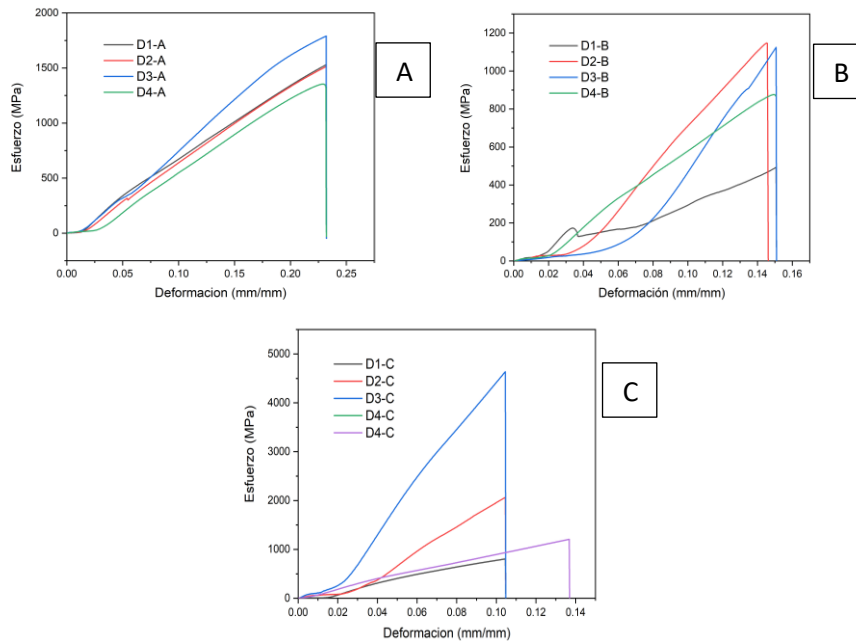


Fig. 12. Gráficas Deformación-Esfuerzo A). Defectos tipo A, B). Defectos tipo B, C). Defecto tipo C.

Luego, se llevaron a cabo pruebas de tensión en las muestras con una máquina INSTRON 4482 (véase Fig. 9), que permitiría evaluar el comportamiento del material bajo tensión y la recuperación de las propiedades mecánicas del material.

TABLA 4.
TABLA DE ESFUERZO, DESPLAZAMIENTOS Y ELONGACIONES.

Defectos	Tipo de defecto	Esfuerzo MPa	Desplazamiento mm	Elongación (e) mm/mm
	S/D	2,317.71	100.2	0.002
	D1-A	1,785.99	100.52	0.005
	D1-B	1,913.88	100.19	0.0019
	D1-C	2,126.48	100.19	0.0019
	D2-A	1,785.99	100.2	0.002
	D2-B	2,254.74	100.25	0.0025
	D2-C	4,006.35	100.4	0.004
	D3-A	1,839.32	100.14	0.001
	D3-B	2,381.70	100.6	0.006
	D3-C	6,638.08	100.3	0.003
	D4-A	1,618.41	10.33	0.013
	D4-B	1,462.81	101.33	0.013
	D4-C	1,330.84	100.2	0.002

B. Resultados de concentrador de esfuerzos

Este cálculo se llevó a cabo para cada una de las muescas, lo que permite observar el factor de concentración de esfuerzos específico para cada defecto, como se presenta en la Tabla 5. En esta tabla, se parte de un valor de este factor de 1 para condiciones sin defectos. Sin embargo, se puede apreciar que, en las muescas con mayor profundidad, tales como los defectos, D2-C y D3-C, los valores del concentrador de esfuerzos son significativamente superiores a 1. Esto indica que la presencia de defectos profundos en la geometría de las muescas provoca una acumulación considerable de esfuerzos en esas regiones, reflejando un comportamiento mecánico que debe ser considerado en el análisis estructural. Los altos valores de K en estas muescas subrayan que la fragilidad del material cuando tiene una pérdida significativa de esta [3].

14

TABLA 5. CONCENTRADOR DE ESFUERZOS.

Tipo de defecto	Concentrador de esfuerzos
S/D	1.00
D1-A	0.77
D1-B	0.82
D1-C	0.91
D2-A	0.76
D2-B	0.97
D2-C	1.72
D3-A	0.79
D3-B	1.02
D3-C	2.86
D4-A	0.69
D4-B	0.63
D4-C	0.57

En la Fig. 3 se observa en la grafica un aumento progresivo en la severidad de cada defecto con mayor profundidad. Por ejemplo, la línea negra representa los tres primeros defectos, todos con una anchura de muesca de 1 mm, cuyas profundidades son de 0.5mm, 1mm y 1.5 mm. En relación con las diferentes anchuras de 4 mm, 6.5 m y 2.5 mm, se evidencia que los defectos D1-C, D2-C Y D3-C presentan un incremento significativo en los concentradores de esfuerzos ya que estas muestras cuenta con daños mayores.

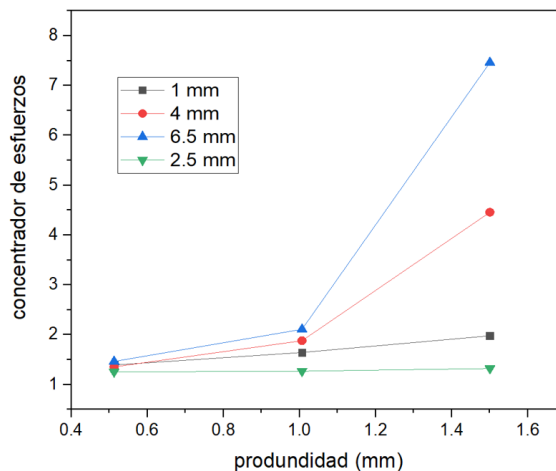


Fig. 13. Concentrador de esfuerzos.

C. Análisis de pérdida de material

Para realizar una correcta caracterización de estos defectos, el área de la línea de acero debe ser continua y no tener pérdida del material de la propia línea de acero. Además, se analizaron detalladamente el material y las áreas dañadas para definir una comparación precisa de resistencia. Esto permite evaluar el impacto de los cambios en el área y la integridad estructural del acero sobre su comportamiento mecánico y capacidad de carga.

La clasificación de las muestras y los daños asociados se puede ver en la esquina superior de cada gráfico (3, 4, 5, 6, 7). Esta clasificación se proporciona con una nomenclatura particular para que la identificación de cada muestra y su relación con los datos de los gráficos sea más sencilla. Ayuda a los espectadores a analizar e interpretar la información de manera más efectiva y a extraer patrones o tendencias relacionadas con los daños.

En la Fig. 14 presenta barras del esfuerzo necesario para fracturar cada una de las muestras. Para las dos muestras analizadas, hay una proporcionalidad inversa entre el área de material perdido y el esfuerzo de ingeniería necesario para romperlas. Los estudios metalográficos para corroborar este hecho muestran que dentro de las muestras de solidificación por láser selectivo (SLM) no hay macrodefectos o porosidad observable. Esto, en particular en las muestras SLM sin defectos, muestra el mayor esfuerzo y el mecanismo de integridad del material, lo cual es clave para mantener el factor de resistencia mecánica. Por el contrario, las muestras con suficientes defectos (D2, D3 y D4) son mucho más fáciles de fracturar debido a la pérdida de material (véase Fig. 4).

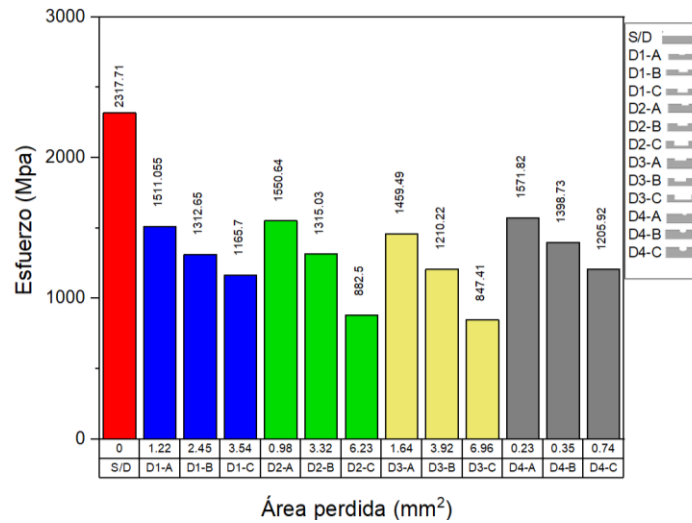


Fig. 14. Esfuerzo con área total / área perdida.

Los esfuerzos reales, calculados al tener en cuenta la presencia de defectos en el material, tienden a ser significativamente más altos que los esfuerzos ingenieriles convencionales. Esto se debe a que los esfuerzos ingenieriles no consideran la reducción en el área efectiva provocada por los defectos, lo que puede llevar a una subestimación del esfuerzo necesario para la fractura (véase Fig. 15)

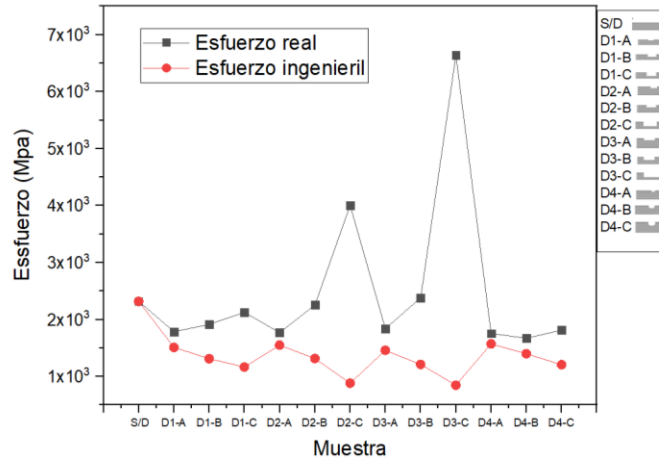


Fig. 15. Comparativa de esfuerzo ingenieril y esfuerzo real.

Los tipos de defectos (1, 2.5, 4, 6,5 mm) en las muestras observadas (véase Fig. 16) afectarán significativamente la resistencia a la tracción de estas, la resistencia de Muestras Sin Defectos (S/D) con una Fuerza Promedio de 2,31771 MPa en S/D, y Disminución de Resistencia con el Aumento del Tamaño del Defecto.

La muestra D1-A presenta un defecto de 1 mm y en la D4-A se observa un defecto de 2,5 mm en el centro del espacio, para los defectos de 4 mm (como en las muestras D1-B y D4-B), la resistencia cae hasta 1816,37 MPa a 884,41 MPa, perdiendo aún más resistencia.

Por último, los defectos máximos de 6,5 mm en las muestras D1-C, D2-C, D3-C y D4-C muestran capacidades de fuerza mínimas entre 1635,84 MPa y 882,45 MPa, y se puede decir que cuanto mayor es el defecto, menor es la resistencia a la tracción, haciendo la muestra susceptible a fracturas bajo cargas de publicidad.

Estamos particularmente interesados en correlacionar nuestros resultados con aquellos extraídos de la pérdida de valor conocida debido a pérdida de material, lo que en nuestro escenario experimental permite una definición precisa de los parámetros involucrados, donde el desgaste también se mide en el experimento con defectos más finos observados en el experimento.

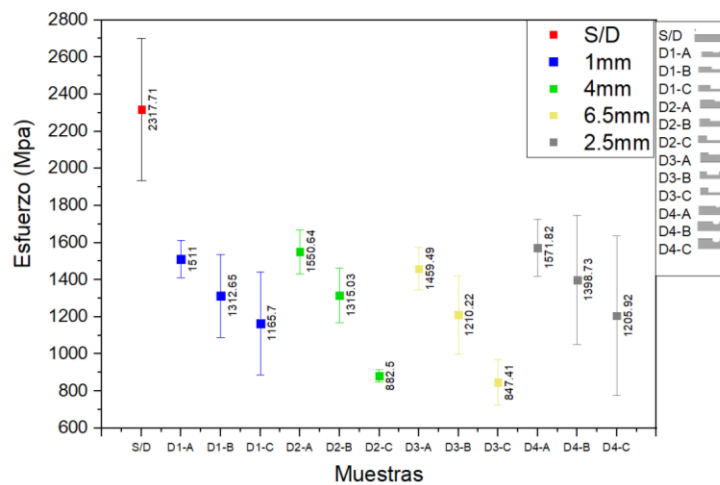


Fig. 16. Desviación estándar.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el tipo y la severidad de los defectos tienen un gran impacto en la resistencia mecánica de las Unidades de Línea de Acero (ULA). Se encontró que el esfuerzo máximo de las muestras sin defectos era de 2,317.71 MPa, mientras que las muestras con defectos de tipo A, B y C carecían de una resistencia progresiva correspondiente de acuerdo con el grado de daño, para las muestras de tipo A, la resistencia retenida varió, oscilando entre 1,785.99 y 2,126.48 MPa, indicando un comportamiento dúctil que permitió una mayor deformación antes de la falla, por el contrario, el tipo B alcanzó 1,462.81 y 2,254.74 MPa con menos deformabilidad y un comportamiento más frágil. Aunque las muestras de tipo C revelaron valores incluso en proporciones más estrictas, como en el caso D3-C, donde D3-C tuvo valores de resistencia que varían de 1,330.84 a 6,638.08 MPa, estos especímenes presentan rupturas repentinas y comportamiento frágil en presencia de condiciones de carga.

Los resultados indican una relación inversa entre el área y el volumen del material perdido y el esfuerzo de ingeniería necesario para lograr la fractura. Muestras con defectos más grandes, como D2-C o D3-C, requirieron menos esfuerzo de ingeniería para fracturarse, ya que la pérdida de material en la sección transversal causa una reducción en la capacidad estructural.

Este fenómeno se evidencia por el aumento de concentraciones de esfuerzo de hasta 7.83 veces en comparación con los valores en muestras sin defectos, porque el área efectiva se reduce en esos defectos y, por lo tanto, actúa como un concentrador de tensión, aumentando el potencial de fractura bajo condiciones operativas.

La magnitud de esta acumulación de tensión es particularmente importante en las estructuras de pozos de petróleo debido a la variabilidad de las cargas y las condiciones extremas a las que se exponen los ULA.

En defectos profundos, incluidos los especímenes de tipo C, es interesante observar que los valores de tensión verdadera son mucho mayores que los valores de tensión de ingeniería.

Esto significa que la carga sentida por las porciones defectuosas se subestima en los cálculos de ingeniería cuando el daño no se ve como parte de la estructura, y, potencialmente, se genera una falsa sensación de seguridad estructural en el uso real.

Esto enfatiza la importancia de considerar también que la tensión de ingeniería debe ser calculada de acuerdo con el área efectiva de la sección dañada, lo que conduce a evaluaciones más precisas de la resistencia utilizando las condiciones operativas.

Una limitación importante de este estudio es que las pruebas se realizaron en un entorno de laboratorio, a diferencia de las variables de energía cinética y ambientales adicionales del entorno de un pozo petrolero, incluidas las variaciones de presión y temperatura.

Debido al alcance sugerido no se realizaron pruebas de fatiga por razones de tiempo y; por lo tanto, no se estudió el comportamiento del ULA bajo carga cíclica durante períodos de tiempo significativos, lo cual es una parte esencial de su rendimiento operativo.

Trabajos futuros, incluidas las pruebas de fatiga, permitirán cuantificar los efectos acumulativos de cargas repetidas sobre la integridad estructural de las líneas, así como estudiar su respuesta en condiciones más cercanas al entorno real.

V. CONCLUSIONES

El impacto de los defectos en la cantidad de tensión de tracción que las líneas de acero podían soportar, lo que reduce la resistencia de la estructura en función del tamaño y forma del defecto, fue significativo.

Los defectos hicieron que las muestras funcionaran peor: la tensión máxima en muestras sin defectos fue de hasta 2,317.71 MPa, mientras que con diferentes defectos los valores disminuyeron a entre 1,330.84 y 663.808 MPa, dependiendo del defecto.

Así, defectos como el D3-C, que son más grandes y profundos, pueden concentrar tensiones hasta 7.83 veces más que en condiciones sin defectos.

Las porciones de esfuerzo muestran que, debido a la presencia de defectos con mayor anchura y profundidad, se produce una mayor acumulación de tensión en las zonas dañadas, lo que lleva a una menor vida útil de las ULA expuestas a condiciones operativas. Además, los valores de tensión reales en especímenes con defectos considerables superan las tensiones de ingeniería convencionales, lo que indica que los cálculos de tensión deben corregirse en función de la magnitud de la pérdida de material para lograr una estimación realista de la seguridad estructural.

Este estudio subraya la importancia de una caracterización precisa de los defectos y de implementar sistemas de monitoreo en tiempo real en las ULA para anticipar posibles fallas. La detección oportuna de defectos y el ajuste de cálculos de esfuerzo en base al área efectiva permitirían optimizar la integridad de las operaciones y mejorar la seguridad en la industria petrolera.

REFERENCIAS

- [1] PEMEX, *Manual de línea de acero*, 2011, available: https://www.academia.edu/36153661/Manual_Linea_de_Acero_Pemex_bueno
- [2] A. Albitzer Hernández, *Reporte final del proyecto N.62004. Diseño y construcción de un equipo para inspección mecánica integral de la línea de acero y tubería flexible para la prevención de fallas por ruptura*, Jefe de Proyecto.
- [3] R. G. Budynas, J. Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9a ed., México: McGrawHill, 2012.
- [4] A. Yaseen Aljubory, A. Yaseen Burjes, A. Ayuob Sulaiman, H. Yahya Najm, "Stress Study by the Finite Element Analysis of a Plate with a Central Hole," *Journal of Global Scientific Research*, vol. 7, no. 8, pp. 2022-2542, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7023016>
- [5] C. R. de Lima Lessa *et al.*, "Microstructure, mechanical properties, and pitting corrosion resistance of SAF 2205 duplex stainless steel after friction hydro-pillar processing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 3-4, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08899-6>
- [6] "Acero Inoxidable Duplex 2205 | SAF 2205 | UNS S31803 - Mega Mex." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://megamex.com/es/acero-inoxidable-duplex-2205/>
- [7] "Acero Inoxidable Duplex 2205 | SAF 2205 | UNS S31803 - Mega Mex." Accessed: Oct. 07, 2023. [Online]. Available: <https://megamex.com/es/acero-inoxidable-duplex-2205/>
- [8] "Alleima — Home." Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.alleima.com/en/>
- [9] X. Cao, X. Hu, "The investigation of micro-galvanic corrosion of SAF 2205 duplex stainless steel based on numerical simulation model and immersion test," *Corros Sci*, vol. 207, oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110601>
- [10] ASTM International, "Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications," ASTM A240/A240M-11, West Conshohocken, PA, USA, 2011, doi: https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-11
- [11] "ASTM E8 Ensayo de tracción de materiales metálicos | Instron." Accessed: oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/the-definitive-guide-to-astm-e8-e8mb>
- [12] E. Rodríguez, A. Rivas, M. Suárez, W. González, "Caracterización de un acero inoxidable dúplex SAF 2205 tratado térmicamente a 475°C utilizando técnicas ultrasónicas y electroquímicas," 2021.
- [13] S. H. Xu, G. C. Qin, Z. X. Zhang, "Experimental Research on Hysteretic Characteristics of Steel Plates Artificially Corroded by Neutral Salt Spray," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/7645763>
- [14] J. L. Herrera Bernal, *Análisis de las diferencias entre la tensión de un acero astm 572 habitual y sometido a los tratamientos térmicos de criogenia temple y revenido a altas temperaturas*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019, available: <http://hdl.handle.net/11349/16017>
- [15] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 6a ed., México: Limusa, 2011.
- [16] E. Nadal, J. J. Ródenas, E. M. Sánchez-Orgaz, S. López-Real, J. Martí-Pellicera, "Sobre la utilización de códigos de elementos finitos basado en mallados cartesianos en optimización estructural," *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, no. 3, pp. 155-165, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.009>
- [17] J. J. Rodríguez Castro, "Simulación en Ansys APDL de una placa a tensión con cinco tipos de mallado," 2021, available: https://www.researchgate.net/publication/355186434_Simulacion_en_Ansys_APDL_de_una_placa_a_tension_con_cinco_tipos_de_mallado

- [18] J. Kisija, J. Kacmarcik, A. Karac, "Determination of Stress Concentration Factors Via Numerical Methods: Bar of Circular Cross Section with U-Shaped Groove Subjected to Tension and Bending," 13th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet, Tunisia, 16-21 Oct. 2009. Available:
https://www.academia.edu/35287146/DETERMINATION_OF_STRESS_CONCENTRATION_FACTORS_VIA_NUMERICAL_METHODS_BAR_OF_CIRCULAR_CROSS_SECTION_WITH_U_SHAPED_GROOVE_SUBJECTED_TO_TENSION_AND_BENDING
- [19] J. J. Rodríguez Jurado, "Análisis de concentradores de esfuerzos con diferentes geometrías y materiales en pruebas de tensión, Tesis Licenciatura," Universidad de los Andes, Depto. de Ingeniería Mecánica, 2004. Available:
<http://hdl.handle.net/1992/21738>