

Estudio de las Propiedades Mecánicas de la Soldadura de un Acero API 5LX-65

Expuesto a Gas Natural

Angie Giselle Valbuena Avellaneda

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Codirector

Ivan Uribe Pérez

Ingeniero Metalúrgico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios y a la vida, por darme la fortaleza para seguir cuando las fuerzas parecían agotarse y por guiarme hasta este momento tan esperado.

*A mi madre, **Elicenia Avellaneda Aza**, mi amor más grande y mi motor. Fuiste madre y padre, y aunque la vida no te dio las mismas oportunidades, me enseñaste el valor del esfuerzo, la dignidad y la humildad. Este logro también es tuyo, porque todo lo que soy nace de tu ejemplo, tus desvelos y de tu amor infinito.*

*A mis hermanos, **Linh y Brayan**, mi motivación en silencio. Todo lo que hago es por ustedes, por el deseo de que nunca les falte nada y para que algún día seamos esa familia unida que tanto soñamos.*

*A mi **familia**, por su amor, orgullo y apoyo incondicional. Ser la primera ingeniera de la familia es un honor que dedico a todos ustedes.*

*A **Jhonatan Basto**, por su apoyo incondicional, por acompañarme en los días difíciles y en los más alegres, por escucharme y estar presente en cada paso de este camino.*

*A mis **compañeros**, que se convirtieron en una segunda familia. Gracias por las risas, por los días compartidos y por sanar mi alma sin saberlo.*

*Y a los **sueños**, porque incluso cuando el camino se volvió difícil y las fuerzas parecían flaquear, ellos me recordaron que sí podía, que nada es imposible cuando el corazón cree y ama lo que hace.*

*Att. **Angie Giselle Valbuena Avellaneda.***

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindar los recursos académicos, tecnológicos y bibliográficos necesarios para el desarrollo de este trabajo. A la Biblioteca UIS, por el acceso a bases de datos científicas que enriquecieron la investigación.

Al Dr. Darío Yesid Peña Ballesteros, director de este trabajo de grado, por su orientación, compromiso y valiosos aportes durante todo el proceso.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por facilitar la realización de los ensayos de tracción, metalografía y dureza, fundamentales para la caracterización del material estudiado.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), especialmente al Edificio INCITEMA, por su colaboración en el ensayo de impacto Charpy.

Al Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), por su apoyo en la determinación de la composición química del acero analizado.

A Escalar Ingeniería S.A.S., por suministrar la muestra de tubería y fabricar las probetas de impacto y tracción, contribuyendo de manera esencial al desarrollo experimental.

Finalmente, al Dr. Aníbal Serna Gil, por su valiosa asesoría y acompañamiento, cuya experiencia en la industria fortaleció los resultados de esta investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2. Fundamentación Teórica	14
2.1 Acero API 5L X65 y su Uso en Transporte de Gas Natural	14
2.2 Soldadura de API 5L X65: Zonas y Microestructura	14
2.3 Propiedades Mecánicas	15
2.4 Normativa Relevante	17
2.5 Estado del Arte	17
3. Metodología	19
3.1 Revisión Bibliografía	19
3.2 Muestra original de la tubería enviada al GIC-Guatiguará	19
3.3 Ensayo de Tenacidad (Charpy)	19
3.4 Ensayo de Tracción	20
3.5 Caracterización metalográfica y Dureza	20
3.6 Macroataque de la unión soldada y dureza transversal	21
3.7 Análisis de resultados	22
3.8 Escritura del libro	22
4. Resultados y Discusión	23
4.1 Análisis de la composición química del material	23

4.2 Caracterización microestructural del acero API 5LX-65	24
4.2.1 Inclusiones no metálicas	24
4.2.2 Análisis microestructural de las secciones SL y ST	25
4.2.3 Dureza en la sección Longitudinal	27
4.3 Macroataque	28
4.3.1 Perfil de dureza Rockwell B en la unión soldada	29
4.4 Ensayo de Tracción	31
4.5 Ensayo de Impacto Charpy	35
4.5.1 Metal base (sin soldadura)	35
4.5.2 Unión soldada	36
4.6 Análisis Global	38
5. Conclusiones	39
Referencias Bibliográficas	40

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros del ensayo de tracción.	20
Tabla 2. Parámetros de metalografía y dureza (EIMCM-UIS).	21
Tabla 3. Parámetros del macroataque y dureza transversal.	22
Tabla 4. Composición química de la tubería X65.	23
Tabla 5. Dureza del espécimen M1 en SL.	27
Tabla 6. Promedio de durezas en MB, ZAC y ZF.	30
Tabla 7. Propiedades mecánicas obtenidas en tracción.	33
Tabla 8. Tenacidad al impacto en metal base (INCITEMA-UPTC).	35
Tabla 9. Tenacidad al impacto en unión soldada (INCITEMA-UPTC).	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Muestra recibida - 20".	19
Figura 2. Muestra M1 con secciones SL y ST embutidas en baquelita.	24
Figura 3. Micrografías sin ataque a 100X de M1.....	25
Figura 4. Micrografías a 200X y 1000X de SL y ST de M1.....	26
Figura 5. Muestra de la unión soldada para análisis.....	28
Figura 6. Macroataque de la unión soldada.	29
Figura 7. Indentaciones del ensayo de dureza en la unión soldada.	30
Figura 8. Probetas para el ensayo de tracción.	31
Figura 9. Resistencia a la fluencia de las probetas.	32
Figura 10. Curvas esfuerzo-deformación de las probetas.	34
Figura 11. Superficie de fractura del metal base tras Charpy.	36
Figura 12. Fractura de probetas soldadas tras ensayo Charpy.	37

Lista de Apéndices

Apéndice A. Dimensiones de las probetas antes y después del ensayo de tracción.....43

Apéndice B. Vista lateral de la fractura en probetas tras impacto Charpy.43

Resumen

Título: Estudio de las Propiedades Mecánicas de la Soldadura de un Acero API 5LX-65 Expuesto a Gas Natural^{1*}

Autor: Angie Giselle Valbuena Avellaneda^{2*3*}

Palabras Clave: acero API 5L X65, soldadura, propiedades mecánicas, tenacidad, gas natural.

Descripción: Esta investigación evalúa las propiedades mecánicas de un acero API 5L X65 expuesto durante veinte años al transporte de gas natural, con el fin de determinar el efecto del tiempo de servicio y del ciclo térmico de la soldadura sobre el desempeño de la tubería, considerando el metal base y la unión soldada. Se realizaron ensayos de composición química, microestructura, dureza Rockwell B, tracción e impacto Charpy. Los resultados confirmaron que el material cumple con estándares internacionales en su composición, lo que garantiza su clasificación como API 5L X65; sin embargo, las propiedades mecánicas mostraron deterioro. El metal base presentó dureza promedio de 76 HRB, mientras que la zona afectada por el calor y la de fusión alcanzaron 93 HRB. En tracción, la fluencia fue de 298–322 MPa en el metal base y 277 MPa en la soldadura, con resistencias máximas de 452–471 MPa, todas inferiores a lo esperado. En impacto Charpy, el metal base absorbió 144–150 J y la soldadura 67–71 J, con una reducción del 53 %. En conjunto, los resultados muestran que, aunque la composición química se mantiene dentro de lo establecido, la exposición prolongada y el ciclo térmico de soldadura han degradado las propiedades mecánicas, siendo la soldadura la zona más vulnerable y comprometiendo la seguridad estructural de la tubería.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor en Corrosión. Codirector: Ivan Uribe Pérez. Ingeniero Metalúrgico.

3

Abstract

Title: Study of the Mechanical Properties of the Welding of an API 5LX-65 Steel Exposed to Natural Gas^{4*}

Author: Angie Giselle Valbuena Avellaneda⁵

Key Words: API 5L X65 steel, welding, mechanical properties, toughness, natural gas.

Description: This research evaluates the mechanical properties of an API 5L X65 steel exposed for twenty years to natural gas transportation, aiming to determine the effect of service time and the welding thermal cycle on pipeline performance, considering both the base metal and the welded joint. Tests included chemical composition, microstructural analysis, Rockwell B hardness, tensile strength, and Charpy impact. Results confirmed that the material meets international standards in its composition, ensuring its classification as API 5L X65; however, the mechanical properties showed significant deterioration. The base metal presented an average hardness of 76 HRB, while the heat-affected and fusion zones reached 93 HRB. In tension, yield strength ranged from 298–322 MPa in the base metal and 277 MPa in the weld, with ultimate strengths of 452–471 MPa, all below expected values. In Charpy impact, the base metal absorbed 144–150 J, while the weld only 67–71 J, reflecting a 53 % reduction. Overall, the findings show that, although the chemical composition remains within standards, prolonged exposure and welding cycles degraded the mechanical properties, making the weld the most vulnerable zone and compromising pipeline integrity.

^{4*} Degree Work

⁵Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Ph.D. in Corrosion. Codirector: Ivan Uribe Pérez. Metallurgical Engineer.

Introducción

El transporte de gas natural mediante tuberías es considerado uno de los métodos más eficaces y seguros para el suministro energético a gran escala. Este sistema es fundamental para la interconexión entre la producción, almacenamiento y consumo de gas (Pluvinage, 2021). En este sentido, los aceros de la serie API 5L son utilizados ampliamente debido a sus destacadas propiedades mecánicas, su facilidad para ser soldables y su habilidad para mantener la integridad estructural en condiciones operativas severas (American Petroleum Institute, 2018). Dentro de esta categoría, el grado X65 se ha establecido como uno de los más comunes en la construcción de gasoductos, ya que combina resistencia, ductilidad y tenacidad; propiedades mecánicas fundamentales para garantizar la continuidad del servicio y proteger su infraestructura (Aguilar et al., 2010; Callister & Rethwish, 2018).

La relevancia de este material va más allá de sus propiedades iniciales; también abarca su rendimiento a lo largo del tiempo operativo. Las tuberías enfrentan esfuerzos internos ocasionados por la presión del gas, cambios en temperatura y posibles defectos durante su fabricación o instalación (Dieter, 1986). Específicamente, las uniones soldadas son puntos críticos dado que el ciclo térmico altera la microestructura generando heterogeneidades en la zona afectada por el calor (ZAC) y en la zona de fusión (ZF) (Suryana et al., 2019). Estas alteraciones microestructurales pueden inducir fases frágiles y concentradores de esfuerzos cuando hay tensiones residuales presentes, afectando así el comportamiento mecánico global del tubo (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Kou, 2003).

En este contexto, es importante caracterizar experimentalmente propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, dureza, tenacidad al impacto, entre otras. La resistencia a la tracción y el límite de fluencia permiten conocer la capacidad de carga del material. Por otro lado,

la dureza indica gradientes locales en las uniones mientras que la energía absorbida en una prueba de impacto (tenacidad) es clave para identificar la susceptibilidad del material a fracturas frágiles durante el servicio (Nazar Shaghayegh et al., 2025; Song et al., 2021). El análisis de estas propiedades permite comparar los resultados con estándares internacionales, como API 5L y API 1104 (American Petroleum Institute, 2018, 2021), asegurando que cumplan criterios técnicos aceptables.

Además, el análisis microestructural mediante técnicas metalográficas permite comprender mejor como las fases presentes en las tuberías se relacionan con sus propiedades mecánicas. Investigaciones recientes han demostrado que la morfología en la zona afectada por el calor (ZAC) con presencia de fases como ferrita, perlita o bainita, tiene una influencia directa en el comportamiento del material cuando se somete tanto a cargas estáticas como dinámicas (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2024). Asimismo, la detección de imperfecciones tales como socavaduras, inclusiones y otras discontinuidades, mediante estas técnicas, proporciona una base sólida para correlacionar el comportamiento del material con el rendimiento mecánico determinado mediante las pruebas (Hashemi & Mohammadyani, 2012).

En este estudio se evaluará el acero API 5L X65 proveniente de una tubería con más de 20 años en servicio en el transporte de gas natural, analizando sus propiedades mecánicas y microestructurales tanto en el metal base como en la zona de soldadura. Se realizarán ensayos de tracción, dureza, tenacidad al impacto y análisis metalográfico, con el objetivo de determinar cómo afectarán la soldadura y el tiempo de operación a las características del material. Los hallazgos permitirán comparar los resultados con la literatura y normas pertinentes, aportando evidencia clave sobre la integridad estructural de gasoductos fabricados con acero API 5L X65 (American Petroleum Institute, 2018).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar experimentalmente las propiedades mecánicas de la soldadura de un acero API 5L X65 utilizado en tuberías para la conducción de gas natural, con el fin de determinar su comportamiento bajo condiciones operativas específicas.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las propiedades mecánicas del acero API 5L X65 y del material de soldadura utilizado, mediante ensayos de tracción, dureza, y tenacidad.

Analizar el efecto de la exposición al gas natural sobre las propiedades mecánicas de la soldadura, evaluando posibles cambios en la microestructura y en el rendimiento mecánico.

2. Fundamentación Teórica

2.1 Acero API 5L X65 y su Uso en Transporte de Gas Natural

El acero API 5L X65 es uno de los grados más utilizados en la construcción de gasoductos por su combinación de resistencia, ductilidad y soldabilidad. Este acero microaleado pertenece a la familia de aceros al carbono de alta resistencia y baja aleación también conocido como HSLAS (American Petroleum Institute, 2018). Su microestructura, compuesta principalmente por ferrita y perlita, asegura un balance adecuado entre tenacidad y resistencia mecánica (Aguilar et al., 2010).

En operación, el gas natural seco transportado es mayoritariamente metano, con bajo contenido de vapor de agua y contaminantes, lo que reduce riesgos de corrosión. Sin embargo, bajo ciertas condiciones puede favorecer la formación de hidrógeno, que tiende a acumularse en regiones críticas como uniones soldadas, afectando la ductilidad y la resistencia a la fractura (Sano Moyeme et al., 2025; Yu et al., 2025). Por ello, la confiabilidad de las juntas soldadas resulta fundamental para la integridad de los sistemas de transporte de gas natural.

2.2 Soldadura de API 5L X65: Zonas y Microestructura

La soldadura en aceros API 5L X65 provoca cambios importantes en la microestructura, ya que el material se expone a distintos ciclos térmicos durante la unión. Esto genera una heterogeneidad y permite diferenciar tres zonas principales: el metal base (MB), la zona afectada por el calor (HAZ o ZAC) y el metal de soldadura o zona de fusión (WM o ZF), cada una con propiedades y microestructuras particulares (Suryana et al., 2019).

El metal base conserva su estructura original de ferrita y perlita, manteniendo buena ductilidad y tenacidad. Por su parte, la ZAC es la zona más sensible, ya que el calor puede transformar parcial o totalmente la austenita, generando microestructuras como ferrita acicular, bainita o incluso martensita cuando el aporte térmico es elevado. En la región de grano grueso, la

ZAC pierde tenacidad por crecimiento de grano, mientras que en la de grano fino puede observarse cierto refinamiento. En las zonas intercrítica y subcrítica aparecen ferrita acicular o bainita, aumentando la dureza, pero reduciendo la ductilidad (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Suryana et al., 2019b).

La zona de fusión corresponde al material de aporte solidificado, cuya microestructura depende del procedimiento y los parámetros de soldadura. Según Suryana et al. (2019), con bajo aporte térmico se forma principalmente bainita inferior, aumentando la dureza; con altos aportes predomina la ferrita acicular, favoreciendo mayor tenacidad.

Además, la soldadura puede generar discontinuidades como porosidad, inclusiones de escoria, socavaduras o falta de fusión. Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, facilitando la iniciación y propagación de grietas. Bajo cargas dinámicas disminuyen la tenacidad y promueven un comportamiento frágil; bajo cargas estáticas aceleran la falla por fatiga, comprometiendo la confiabilidad estructural (Hashemi & Mohammadyani, 2012). Por ello, un control adecuado de los parámetros de soldadura, especialmente del aporte térmico, es clave para limitar el ensanchamiento de la ZAC, reducir defectos y garantizar un comportamiento mecánico confiable de la unión (Liu et al., 2021).

2.3 Propiedades Mecánicas

Evaluar las propiedades mecánicas permite comprender el comportamiento de los aceros bajo carga y asegurar la confiabilidad de las uniones soldadas. En el caso del acero API 5L X65, estas propiedades están reguladas por normas que sirven de referencia para verificar la calidad tanto del metal base como de la soldadura (American Petroleum Institute, 2018). Además, la API 1104 establece los criterios de calificación de los procedimientos de soldadura, incluyendo los

ensayos necesarios para garantizar la integridad de las uniones en servicio (American Petroleum Institute, 2021).

El límite de fluencia (SMYS) marca el inicio de la deformación plástica, mientras que la resistencia máxima (UTS) corresponde a la tensión máxima antes de la fractura. En API 5L X65, estos valores suelen mantenerse cercanos a los del metal base, aunque la heterogeneidad de la ZAC puede generar zonas localmente endurecidas o ablandadas (Suryana et al., 2019).

El porcentaje de elongación refleja la ductilidad, es decir, la capacidad del material para deformarse antes de romperse. En la ZAC, las estructuras internas menos ordenadas favorecen la formación de grietas y la fractura se produce más rápido que en el metal base.

La tenacidad al impacto se evalúa mediante la prueba Charpy. En API 5L X65, el metal base conserva su microestructura de ferrita y perlita, lo que le confiere alta tenacidad y comportamiento dúctil, mientras que la ZAC presenta microestructuras más rígidas y crecimiento de grano, reduciendo su capacidad de deformación. En consecuencia, el metal base muestra energías Charpy superiores a 100 J; el metal de soldadura valores intermedios, entre 80–100 J; y la ZAC absorbe menos energía, entre 40–70 J, según proceso y aporte térmico (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Liu et al., 2021; Suryana et al., 2019; Zhang et al., 2024).

Además, la norma API 1104 enfatiza la importancia de estos criterios al establecer que “the minimum average value and minimum individual value of impact energy for each set of three specimens when tested at the minimum design temperature shall not be less than the minimum values specified for qualification of the production weld or as otherwise specified by the company” (American Petroleum Institute [API, 2021, Sección 10.3.7.4.3] lo que asegura que la tenacidad mínima en la ZAC se defina según el procedimiento de calificación o los requerimientos del operador, garantizando la integridad estructural de la tubería en servicio.

2.4 Normativa Relevante

El cumplimiento de estándares internacionales asegura la calidad de los materiales y la confiabilidad de los gasoductos. Entre las normas más relevantes se encuentran la ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, que regula el diseño, construcción y operación de tuberías de gas natural, incluyendo seguridad, pruebas de presión y requisitos de materiales y soldadura (ASME, 2018); la API 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities, que establece los criterios para la soldadura de tuberías, la calificación de soldadores y la aceptación de discontinuidades, garantizando la integridad de las uniones (American Petroleum Institute, 2021); la API 5L: Specification for Line Pipe, que define la composición química y las propiedades mecánicas mínimas de los aceros para tuberías de transporte de gas y petróleo, sirviendo como referencia para la selección de materiales (American Petroleum Institute, 2018).

2.5 Estado del Arte

El acero API 5L X65 es uno de los materiales más empleados en la construcción de ductos para gas natural, donde la integridad de las soldaduras resulta esencial para garantizar la seguridad y el desempeño en servicio.

Hashemi & Mohammadyani (2012) estudiaron soldaduras realizadas en este acero y encontraron que la zona de fusión presentaba mayor dureza, pero menor tenacidad frente al metal base. Esta diferencia se explicó por la formación de microestructuras heterogéneas, como ferrita acicular y fases en los bordes de grano, que, si bien reducen la absorción de energía en impacto, se mantuvieron dentro de lo exigido por la norma API 5L, confirmando que el material conserva un desempeño aceptable en condiciones operativas.

En la misma línea, Zhang et al. (2024) analizaron el comportamiento de deformación en soldaduras circunferenciales de tuberías API 5L X65 sometidas a carga longitudinal. Mediante

técnicas de correlación digital de imágenes demostraron que la distribución de esfuerzos depende directamente del proceso de soldadura. En uniones realizadas por GMAW, la deformación se concentró menos en la HAZ que en soldaduras SMAW, mostrando un mejor balance de propiedades mecánicas y una menor tendencia a la falla prematura. Este resultado resalta la importancia de seleccionar adecuadamente el proceso de soldadura para mantener la confiabilidad de los ductos.

Por otra parte, Nazar Shaghayegh et al. (2025) evaluaron la fragilización por hidrógeno en aceros API 5L X65 mediante ensayos de tracción lenta y modelado numérico. Los autores encontraron que la ductilidad puede reducirse hasta en un 50 % y que el modo de fractura cambia de dúctil a cuasi-frágil bajo la presencia de hidrógeno a alta presión. Aunque el gas natural seco en su estado puro no contiene cantidades significativas de hidrógeno, en condiciones reales de transporte pueden presentarse trazas o impurezas como humedad, H₂S o CO₂ que generan átomos de hidrógeno capaces de difundirse en el acero. Este fenómeno resulta crítico para tuberías de gas natural, ya que favorece la iniciación y propagación de grietas en la zona de soldadura, reforzando la necesidad de evaluar el comportamiento mecánico de estas uniones bajo condiciones de operación reales.

3. Metodología

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos planteados en este estudio, se llevaron a cabo una serie de actividades experimentales diseñadas para evaluar las propiedades mecánicas del acero API 5L X65, considerando tanto el metal base como la zona soldada.

3.1 Revisión Bibliografía

Inicialmente, se revisó la literatura de esta investigación utilizando varias plataformas y bases de datos, incluyendo Elsevier, ScienceDirect, ProQuest, Google Scholar, etc. Esto se hizo con el propósito de obtener información sobre el acero API 5L X65 y las propiedades generadas durante su fabricación, así como el proceso de soldadura.

3.2 Muestra original de la tubería enviada al GIC-Guatiguará

Parte de la tubería API 5L X65, con un diámetro de 20 pulgadas, fue utilizada para realizar los cortes y preparaciones necesarios en los ensayos mecánicos y microestructurales, con el propósito de evaluar las condiciones reales del material tras más de 20 años de servicio en el transporte de gas natural (Figura 1).

Figura 1.

Muestra recibida - 20"



3.3 Ensayo de Tenacidad (Charpy)

Para evaluar la resistencia al impacto, se efectuó el ensayo Charpy con entalla en probetas normalizadas, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E23. Las probetas se extrajeron tanto de la zona soldada como del metal base, con el fin de identificar posibles diferencias en la capacidad de absorción de energía bajo condiciones de carga dinámica.

3.4 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se realizó siguiendo las normas ASTM E8 y ASTM A370. Para este procedimiento, se emplearon probetas normalizadas extraídas de diferentes zonas del material y mecanizadas según las dimensiones especificadas en la norma. El ensayo consistió en aplicar una carga uniaxial controlada hasta la fractura, con el objetivo de caracterizar propiedades como la resistencia máxima a la tracción, el límite de elasticidad y la elongación.

Tabla 1.

Parámetros del ensayo de tracción.

Parámetro	Descripción
Equipo principal	Máquina universal Shimadzu AG-X plus 250 kN
Velocidad de deformación	5 mm/min
Longitud calibrada	50 mm
Medición dimensional	Calibrador digital INSIZE 1108 (150 mm)
Probetas ensayadas	P1, P2 y P3 (mecanizadas según norma)

3.5 Caracterización metalográfica y Dureza

El análisis metalográfico se efectuó de acuerdo con las normas ASTM E3, ASTM E7, ASTM E45 y ASTM E407. Secciones longitudinales y transversales fueron preparadas mediante

corte, embutidas en baquelita y observadas en un microscopio óptico. El procedimiento permitió examinar la microestructura y clasificar las inclusiones no metálicas.

Como complemento, se realizó un ensayo de dureza en la sección longitudinal, siguiendo la norma ASTM E18. Este análisis permitió registrar la variación localizada de dureza en el metal base, la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura.

Tabla 2.

Parámetros de metalografía y dureza (EIMCM-UIS).

Parámetro	Descripción
Equipo óptico	Microscopio Olympus GX71
Preparación	Corte con disco de carburo de silicio y embutido en baquelita
Ataque químico	Reactivo Nital al 2 %
Equipo de dureza	Durómetro Wilson Rockwell 4TT
Condiciones de dureza	Precarga 10 kgf; Carga 100 kgf; indentador bola 1/16"; escala HRB

3.6 Macroataque de la unión soldada y dureza transversal

El ensayo de macroataque se llevó a cabo según la norma ASTM E340. La muestra fue preparada mediante corte y pulido de acuerdo con la norma ASTM E3, y posteriormente atacada químicamente para revelar la macroestructura de la soldadura. Este procedimiento permitió distinguir las zonas principales de la unión: metal base, zona afectada por el calor y zona de fusión.

Adicionalmente, se efectuó un perfil de dureza transversal en la soldadura, siguiendo la norma ASTM E18, con el propósito de comparar las propiedades entre las distintas zonas de la unión.

Tabla 3.

Parámetros del macroataque y dureza transversal.

Parámetro	Descripción
Preparación ASTM E3	Corte con disco de carburo de silicio
Reactivo	Solución alcohólica de ácido nítrico al 5 %
Equipo de dureza	Durómetro Wilson Rockwell 4TT
Condiciones de dureza	Precarga 10 kgf; Carga 100 kgf; indentador bola 1/16"; escala HRB

3.7 Análisis de resultados

A partir de los datos obtenidos en cada una de las pruebas se realizó un análisis detallado, orientado a identificar las variables más influyentes y a comprender cómo estas condicionaron los resultados alcanzados.

3.8 Escritura del libro

Finalmente, con base en los resultados experimentales y el análisis realizado, se procedió a la elaboración del libro académico

4. Resultados y Discusión

A continuación, se describen las diferentes etapas de los resultados obtenidos en este estudio.

4.1 Análisis de la composición química del material

La composición química del acero API 5L X65 se determinó mediante espectroscopía de emisión por chispa (Tabla 4). Al comparar los resultados obtenidos con los rangos establecidos en la Tabla 4 de la Sección 9.2 de la norma API 5L (American Petroleum Institute, 2018), se confirma que el material corresponde al grado X65.

Tabla 4.

Composición química de la tubería X65.

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al	%Nb
0,180	0,971	0,262	0,0099	0,0027	0,040	0,0067	0,046	0,0061	0,020	0,0069

Nota: Este procedimiento se realizó en el laboratorio GIMBA de la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

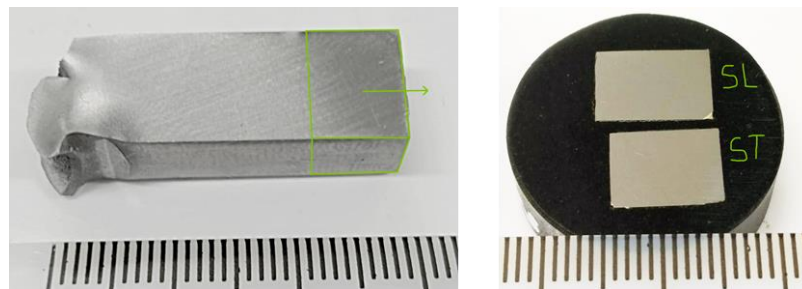
En particular, el contenido de carbono (0,180 %) se encuentra por debajo del límite máximo de 0,26 %, lo que resulta favorable para la soldabilidad del acero. El manganeso (0,971 %) se encuentra dentro del intervalo normativo y contribuye al incremento de la resistencia mecánica. Por su parte, los bajos contenidos de fósforo (0,0099 %) y azufre (0,0027 %) reflejan un buen control de impurezas, lo que disminuye el riesgo de fragilización. Finalmente, los elementos de microaleación como el niobio (0,0069 %) y el aluminio (0,020 %) cumplen con lo establecido en la norma, favoreciendo el refinamiento del grano y mejorando el comportamiento del material en servicio.

4.2 Caracterización microestructural del acero API 5LX-65.

El análisis metalográfico realizado en la muestra M1, previamente embutida en baquelita (Figura 2) y posteriormente observada al microscopio (Figura 4), permitió identificar las características microestructurales propias del acero API 5L X65. En el metal base se observó una microestructura compuesta principalmente de ferrita y perlita, fases típicas de este tipo de acero microaleado de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Esto asegura un balance adecuado entre resistencia y ductilidad, indispensable en tuberías para el transporte de gas natural. A partir de esta base microestructural se desarrollaron los análisis complementarios, centrados en la presencia de inclusiones no metálicas, la distribución de fases en secciones longitudinales y transversales, así como la dureza local del material.

Figura 2.

Muestra M1 con secciones SL y ST embutidas en baquelita.



4.2.1 Inclusiones no metálicas

El análisis de inclusiones no metálicas en la sección longitudinal (SL) sin ataque químico, realizado bajo los lineamientos de las normas ASTM E3 y ASTM E45 (método A), permitió identificar inclusiones de óxidos globulares Tipo D (Figura 3.). Estas se presentaron tanto en la serie fina, con un nivel de severidad de 1,5, como en la serie gruesa, con severidad de 0,5. La presencia de este tipo de inclusiones es habitual en aceros de tubería, y aunque pueden actuar como

sitios de iniciación de grietas bajo cargas dinámicas, los valores obtenidos en este caso se encuentran en un rango moderado.

La literatura señala que severidades de inclusiones tipo D entre 0,5 y 2 son comunes en aceros API de grado X60–X65 y se consideran aceptables para aplicaciones estructurales, ya que no comprometen de forma directa la integridad global del material (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Zhang et al., 2024). No obstante, estas inclusiones pueden afectar la respuesta del acero en condiciones específicas, principalmente reduciendo la capacidad de absorción de energía en los ensayos de impacto, al servir como sitios preferenciales para la nucleación de grietas bajo cargas dinámicas (Hashemi & Mohammadyani, 2012).

Figura 3.

Micrografías sin ataque a 100X de M1.



100X

4.2.2 Análisis microestructural de las secciones SL y ST

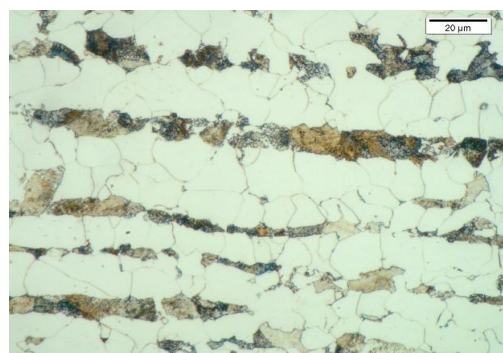
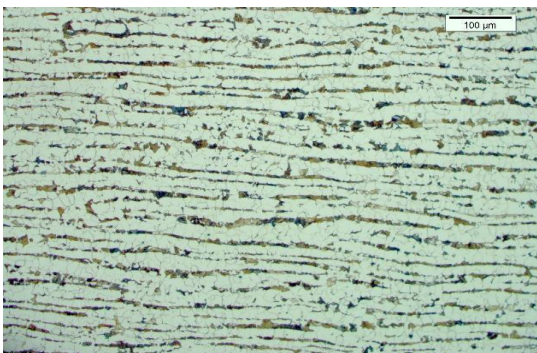
Tras el ataque químico con Nital al 2% (ASTM E407), se observó en ambas secciones (SL y ST) una matriz ferrítica con perlita fina, dispuesta en bandas paralelas a la dirección de laminación (Figura 4). Esta configuración es característica del proceso de laminación en caliente

empleado en la fabricación del acero API 5L X65 y, por tanto, corresponde a una condición normal del material. Durante dicho proceso, la deformación plástica orienta y distribuye las fases microestructurales ferrita y perlita en sentido longitudinal, generando una alineación definida que refleja las condiciones de conformado térmico y mecánico del tubo.

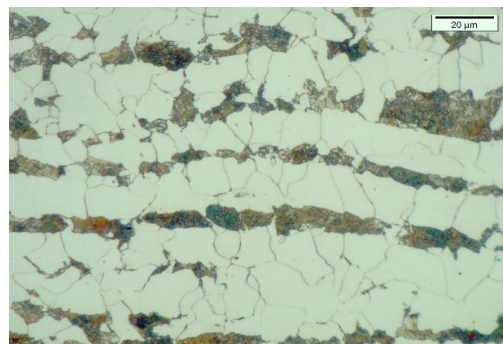
Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura para aceros API 5L X65, donde la combinación de ferrita y perlita confiere buena ductilidad y resistencia (Suryana et al., 2019). La homogeneidad observada sugiere que, pese a las inclusiones no metálicas descritas previamente, la microestructura global no presenta discontinuidades significativas que afecten la estabilidad del material.

Figura 4.

Micrografías a 200X y 1000X de SL y ST de M1.



Sección longitudinal



Sección transversal

4.2.3 Dureza en la sección Longitudinal

Los resultados de dureza en la sección longitudinal (SL) arrojaron un valor promedio de 75,6 HRB (Tabla 5), con una dispersión reducida de $\pm 0,9$, lo que refleja la homogeneidad microestructural del material, compuesta principalmente por ferrita y perlita, y la ausencia de variaciones significativas en las propiedades mecánicas de la zona analizada.

Al comparar con lo reportado en la literatura, Liu et al. (2021) señalan que los aceros API 5L X65 presentan durezas típicas en el rango de 72–80 HRB, mientras que (Suryana et al., 2019) reportan valores cercanos a 70–85 HRB en el metal base. Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de dichos rangos, lo que confirma que el material conserva un comportamiento mecánico estable tras más de 20 años de servicio.

Tabla 5.

Dureza del espécimen M1 en SL.

Sección	Medidas de dureza, HRB					Promedio	Desv. estándar
SL	76	75	75	75	77	75,6	0,9

En términos generales, el análisis microestructural evidencia que el acero API 5L X65 mantiene una microestructura estable de ferrita y perlita, con un contenido moderado de inclusiones no metálicas y dureza homogénea. Estos hallazgos sugieren que el material conserva un equilibrio adecuado entre resistencia y ductilidad, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura para este tipo de acero (Liu et al., 2021; Suryana et al., 2019; Zhang et al., 2024)

4.3 Macroataque

La muestra analizada fue seccionada de manera transversal al cordón de soldadura para exponer la zona de interés (Figura 5).

Figura 5.

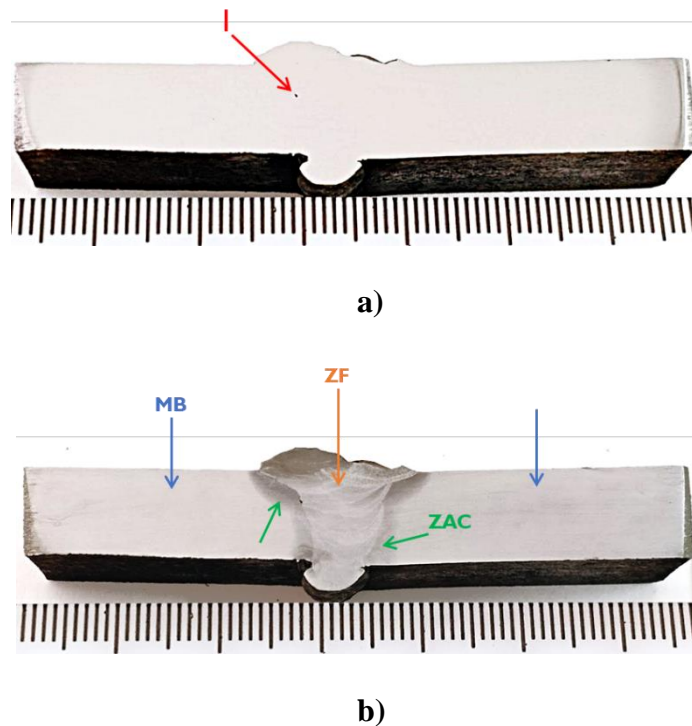
Muestra de la unión soldada para análisis.



A partir del ensayo de macroataque con solución alcohólica de ácido nítrico al 5 %, El macroataque permitió distinguir las regiones características de la soldadura: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y zona fundida (ZF) (Figura 6). En la muestra sin ataque se observó una indicación (I) (figura 6.a), asociada a una posible discontinuidad, que tras el ataque no evidenció defectos críticos. Además, se apreciaron múltiples pases de soldadura, lo que indica la aplicación de un procedimiento por capas acorde al espesor de la tubería. Estos resultados son coherentes con la composición química del material: el bajo contenido de carbono favorece la soldabilidad, mientras que las reducidas concentraciones de fósforo y azufre contribuyen al control de impurezas y disminuyen la susceptibilidad a defectos en la unión.

Figura 6.

Macroataque de la unión soldada.



Nota. a) Muestra sin ataque, donde se observa una indicación (I). b) Muestra con ataque, en la que se distinguen el metal base (MB), la zona afectada por el calor (ZAC) y la zona fundida (ZF). Además, se evidencian múltiples pases de soldadura. (La regleta mostrada en la imagen está graduada en centímetros).

El macroataque permitió confirmar la integridad general de la unión soldada, aunque la presencia de la indicación en la interfaz entre la ZF y la ZAC sugiere la necesidad de un control más riguroso en la técnica de soldadura, dado que estas discontinuidades pueden convertirse en puntos críticos bajo solicitaciones mecánicas o de fatiga.

4.3.1 Perfil de dureza Rockwell B en la unión soldada

El ensayo de dureza se llevó a cabo bajo los lineamientos de la norma ASTM E18, utilizando la escala Rockwell B (HRB). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6 y

corresponden al promedio de varias mediciones realizadas en el metal base, la zona afectada por el calor y la zona de fusión.

Tabla 6.

Promedio de durezas en MB, ZAC y ZF.

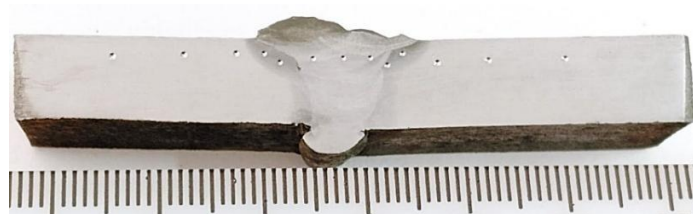
Zona	MB	ZAC	ZF
Promedio	76,0	93,3	92,7
DE*	2,8	3,3	2,5

Nota. MB = Metal Base; ZAC = Zona Afectada por el Calor; ZF = Zona de Fusión; DE* = Desviación Estándar.

El metal base presenta la menor dureza (76 HRB), mientras que la HAZ y la zona de fusión muestran valores más altos (93,3 y 92,7 HRB, respectivamente), debido a los cambios microestructurales inducidos por el ciclo térmico de la soldadura. La microestructura de ferrita y perlita del metal base explica su menor dureza, mientras que las transformaciones térmicas en la HAZ y la solidificación en la ZF generan estructuras más resistentes. La transición gradual de dureza observada (Figura 7) indica que no se producen aumentos bruscos en la dureza que puedan actuar como puntos débiles susceptibles a fractura, es decir, no hay fragilización localizada (Hashemi & Mohammadyani, 2012).

Figura 7.

Indentaciones del ensayo de dureza en la unión soldada.

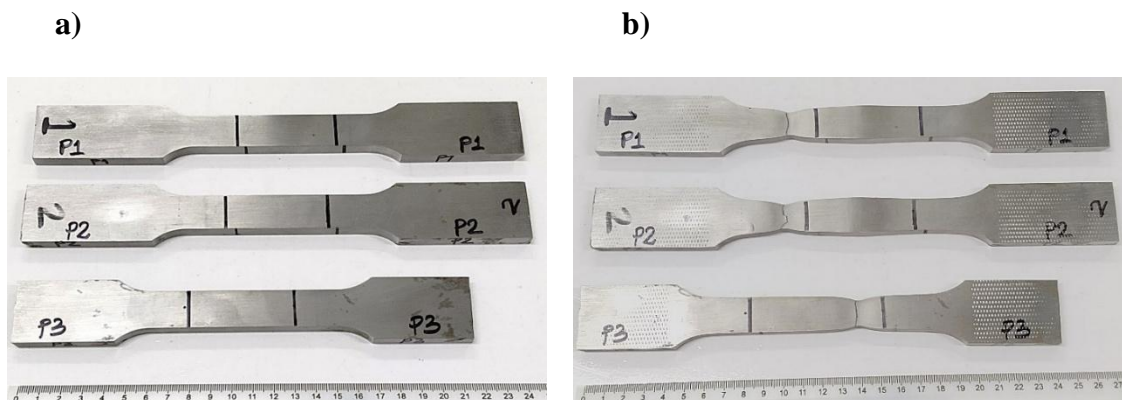


4.4 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se realizó en tres probetas extraídas de la tubería API 5L X65, con el propósito de analizar el comportamiento del material después de más de 20 años de servicio en transporte de gas natural (las dimensiones iniciales se presentan en el Anexo A). Dos probetas (P1 y P2) correspondieron al metal base y una (P3) a la zona de soldadura. Este análisis resulta clave, pues permite comparar las propiedades actuales del acero con los valores mínimos exigidos en la norma (American Petroleum Institute, 2018, Sección 9.3, Tabla 6) y relacionar los resultados con la microestructura observada previamente, constituida por ferrita y perlita, además de inclusiones no metálicas. La presencia de ferrita confiere ductilidad, mientras que la perlita aporta resistencia, por lo que el balance entre estas fases explica en gran medida el desempeño registrado en las probetas ensayadas (Callister & Rethwish, 2018; Dieter, 1986).

Figura 8.

Probetas para el ensayo de tracción.



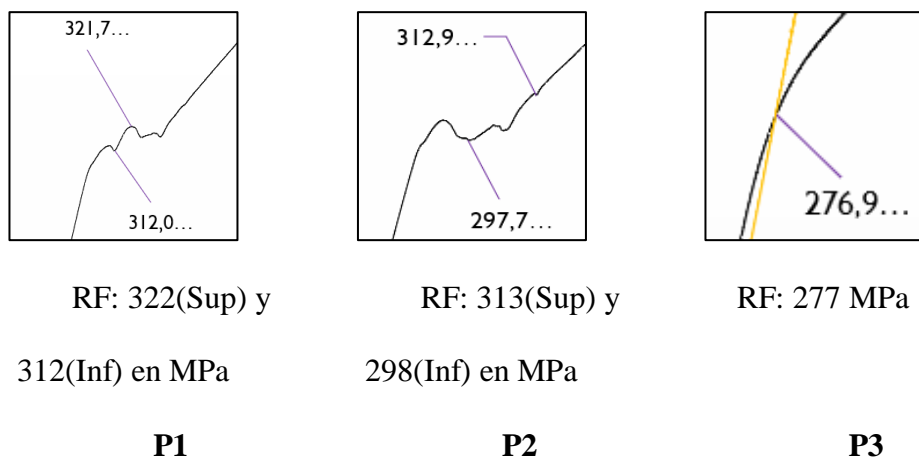
Nota. a) Probetas antes del ensayo, b) Probetas después del ensayo.

En los especímenes de metal base (P1 y P2) se evidenció el fenómeno de fluencia discontinua, razón por la cual se reportaron dos valores de límite elástico: superior e inferior

(Figura 9). Este comportamiento se asocia con la aparición de bandas de Lüders, propias de aceros al carbono, originadas por la interacción de dislocaciones con átomos intersticiales, lo que genera una meseta en la curva esfuerzo-deformación antes del inicio del endurecimiento (Callister & Rethwish, 2018; Dieter, 1986). En contraste, la probeta de la zona soldada (P3) no mostró este fenómeno, por lo que el límite elástico se determinó mediante el método de compensación al 0,2%.

Figura 9.

Resistencia a la fluencia de las probetas.



Los resultados se presentan en la Tabla 7, donde se observa que la resistencia máxima a la tracción (R_m) fue de 471 MPa en P1, 452 MPa en P2 y 454 MPa en P3. En cuanto al límite elástico, los valores oscilaron entre 298 y 322 MPa en el metal base y alcanzaron 277 MPa en la zona de soldadura. Cabe destacar que, aunque P1 y P2 no fracturaron en la zona calibrada posiblemente debido a la presencia de una muesca que actuó como concentrador de esfuerzos o a un leve desalineamiento en las mordazas, lo que invalida la comparación directa del porcentaje de elongación con P3, los resultados de resistencia y fluencia permiten establecer diferencias claras entre el metal base y la soldadura.

Tabla 7.

Propiedades mecánicas obtenidas en tracción.

Muestra	Resistencia a la tracción [Mpa]	Resistencia a la fluencia [Mpa]	Alargamiento [%]
P1	471	322(Sup) y 312(Inf)	---
P2	452	313(Sup) y 298(Inf)	---
P3	454	277 ($\% \epsilon = 0,4$)	34

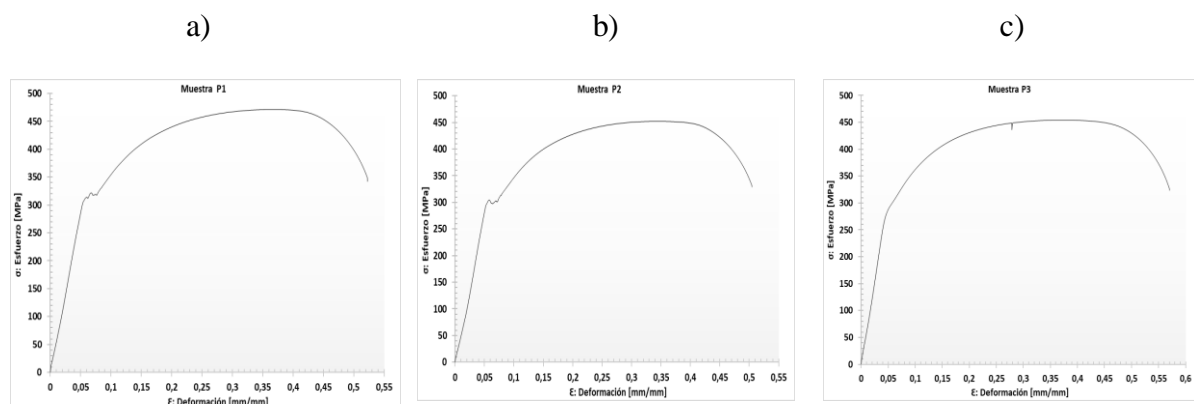
Cuando se contrastan estos resultados con la norma API 5L (Tabla 6), que establece para el grado X65 un límite elástico mínimo de 450 MPa y una resistencia máxima de 535 MPa, se observa que las tres probetas presentan valores por debajo de los requeridos normativamente. Esta disminución en propiedades puede atribuirse al tiempo en servicio, al deterioro microestructural observado (bandas de ferrita y perlita, segregaciones, inclusiones) y a la heterogeneidad propia de la zona soldada. La soldadura se realizó mediante SMAW, empleando E6010 en el pase de raíz y E7018 en los pases de presentación y acabado. El primero, un electrodo celulósico, produce cordones con buena penetración, pero menor tenacidad, mientras que el segundo, de bajo hidrógeno, mejora la resistencia y ductilidad del depósito (American Welding Society, 2020). Esta combinación, sumada al efecto térmico del proceso de soldadura, puede generar variaciones locales en la microestructura y en las propiedades mecánicas del material, lo que contribuiría a explicar la menor resistencia medida en la probeta P3.

En las curvas esfuerzo–deformación (Figura 10) se aprecia que las probetas del metal base (P1 y P2) presentan un comportamiento más dúctil en comparación con la probeta de la zona soldada (P3). La ductilidad se evidencia en la formación de cuellos en la región de fractura (Figura 8), rasgo típico de los aceros estructurales sometidos a tracción, donde el material es capaz de deformarse plásticamente de manera significativa antes de fallar. Esta respuesta concuerda con la

microestructura homogénea de ferrita y perlita identificada en la metalografía, que favorece un equilibrio entre resistencia y capacidad de deformación. En contraste, la probeta P3 mostró un límite elástico más bajo (277 MPa), lo que se relaciona con la heterogeneidad microestructural propia de la soldadura y con la posible concentración de inclusiones y segregaciones en la zona afectada por el calor, factores reportados en la literatura como responsables de la reducción de la resistencia mecánica en uniones soldadas (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Suryana et al., 2019).

Figura 10.

Curvas esfuerzo-deformación de las probetas.



Nota. a) Probeta 1, b) Probeta 2 y c) Probeta 3.

De esta manera, los resultados del ensayo de tracción ponen de manifiesto una disminución de las propiedades mecánicas respecto a los valores normativos, siendo más notoria en la zona de soldadura. Estos hallazgos se relacionan directamente con las características microestructurales observadas y con el procedimiento de soldadura empleado, lo que resalta la necesidad de considerar de forma conjunta la composición química, la microestructura y las propiedades mecánicas al evaluar el desempeño de la tubería en servicio. Cabe anotar nuevamente que las dos probetas de la zona fuera de la soldadura no rompieron en la zona de análisis.

4.5 Ensayo de Impacto Charpy

El ensayo de impacto Charpy permitió evaluar la capacidad de absorción de energía del acero API 5L X65 en condiciones dinámicas, tanto en el metal base como en la unión soldada. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre ambas zonas: mientras que el metal base mostró un comportamiento típicamente dúctil, la unión soldada presentó valores de tenacidad considerablemente más bajos. Esta diferencia se relaciona con la microestructura observada previamente, compuesta principalmente por ferrita y perlita en el metal base, frente a la heterogeneidad de la zona soldada, donde el ciclo térmico puede generar fases endurecidas y segregaciones locales (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Suryana et al., 2019).

4.5.1 Metal base (sin soldadura)

Los resultados del ensayo Charpy en las probetas del metal base (Tabla 8) mostraron energías absorbidas entre 144 y 150 J, con tenacidades en el rango de 2,40–2,50 J/mm². Estos valores reflejan una elevada capacidad de deformación plástica antes de la fractura, lo que corresponde a un comportamiento dúctil característico de aceros al carbono en condiciones de operación a temperatura ambiente.

Tabla 8.

Tenacidad al impacto en metal base (INCITEMA-UPTC).

ID. Probeta	T°C	Entalla	Ángulo de apertura (°)	Ancho del espécimen (mm)	Espesor del espécimen (mm)	Área (mm ²)	Energía absorbida (J)	Tenacidad (J/mm ²)
1	~ 20°C	V	-150	9.96	7.45	60	144	2.4
2	~ 20°C	V	-150	9.94	7.46	60	146	2.43
3	~ 20°C	V	-150	9.98	7.45	60	150	2.5

Nota. El área corresponde a la sección neta de la probeta después de la entalla.

La fractografía de las probetas de metal base mostro superficies rugosas y con marcada estricción (Figura 11), asociadas con la formación y coalescencia de microcavidades. Este mecanismo de fractura dúctil explica los altos niveles de absorción de energía obtenidos. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Hashemi & Mohammadyani (2012), quienes encontraron que en aceros API X65 el metal base presenta energías de impacto más altas que la zona soldada debido a su microestructura más homogénea y libre de heterogeneidades.

Figura 11.

Superficie de fractura del metal base tras Charpy.



4.5.2 Unión soldada

En la unión soldada, las energías absorbidas variaron entre 67,2 y 71,1 J, con tenacidades de 1,12–1,18 J/mm² (Tabla 9), lo que representa una disminución cercana al 53 % respecto al metal base. Esta reducción está en línea con lo reportado en la literatura, donde se ha demostrado que la ZAC y la zona de fusión en aceros API X65 presentan menor resistencia al impacto debido a heterogeneidades microestructurales y a la presencia de inclusiones o segregaciones (Hashemi & Mohammadyani, 2012; Zhang et al., 2024). De manera complementaria, Okiy & Oreko (2024)

observaron en un estudio comparativo que las uniones soldadas en API 5L X65 mediante SMAW alcanzaron valores de tenacidad más bajos que las obtenidas con TIG, lo que refuerza la evidencia de que la soldadura constituye un punto crítico en el desempeño frente a cargas dinámicas.

Tabla 9.

Tenacidad al impacto en unión soldada (INCITEMA-UPTC).

ID. Probeta	T °C	Entalla	Ángulo de apertura (°)	Ancho del espécimen (mm)	Espesor del espécimen (mm)	Área (mm ²)	Energía absorbida (J)	Tenacidad (J/mm ²)
1	~ 20°C	V	-150	9.97	7.52	60	67.2	1.12
2	~ 20°C	V	-150	10.02	7.51	60	69.4	1.15
3	~ 20°C	V	-150	9.97	7.50	60	71.1	1.18
4	~ 20°C	V	-150	10	7.50	60	67.5	1.12

Nota. El área corresponde a la sección neta de la probeta después de la entalla.

Las superficies de fractura observadas en las probetas soldadas (Figura 12) presentaron menor estricción y zonas más planas, lo que refleja un comportamiento relativamente más frágil. Aunque se identificaron sectores con cierta deformación plástica, el aspecto general más brillante y con menor rugosidad confirma la reducción de la tenacidad.

Figura 12.

Fractura de probetas soldadas tras ensayo Charpy.





Nota. a) Probeta 1, b) probeta 2, c) Probeta 3 y d) Probeta 4

4.6 Análisis Global

El estudio permitió evaluar las propiedades mecánicas del acero API 5L X65 después de más de 20 años en servicio transportando gas natural. En tracción, se obtuvieron valores de fluencia entre 298–322 MPa en el metal base y 277 MPa en la soldadura, todos por debajo de los mínimos exigidos por la norma American Petroleum Institute (2018), que establece ≥ 450 MPa de fluencia y ≥ 535 MPa de resistencia máxima. La dureza mostró un gradiente definido: el metal base registró ≈ 76 HRB, coherente con su microestructura de ferrita y perlita observada en la metalografía, mientras que la ZAC y la ZF alcanzaron ≈ 93 HRB debido a las transformaciones inducidas por el ciclo térmico de la soldadura. En impacto Charpy, el metal base absorbió entre 144–150 J y la soldadura solo 67–71 J a 20 °C, en contraste con los valores de referencia reportados por Hashemi (2009) para material nuevo: ≈ 271 J en el BM, 199 J en la ZAC y 163 J en el metal de soldadura. Esto refleja reducciones de hasta un 45–60 % en la capacidad de absorción de energía. En conjunto, los resultados muestran que la exposición prolongada al gas natural y el envejecimiento microestructural han degradado las propiedades mecánicas, siendo la unión soldada la zona más vulnerable de la tubería. Aunque si bien el ensayo de tracción no es confiable, el ensayo Charpy, mostró claramente la disminución de la resistencia estructural del material con el tiempo.

5. Conclusiones

La evaluación de la tubería después de tanto tiempo en servicio mostró que la soldadura es la zona más vulnerable de la tubería. Allí se registraron los valores más bajos de fluencia y una marcada reducción en la energía absorbida en el ensayo Charpy, alrededor del 53 % respecto al metal base. Esto indica que la heterogeneidad microestructural producto de la soldadura, sumada al envejecimiento por la operación, aumenta la susceptibilidad a la iniciación de grietas y a fallas bajo condiciones dinámicas.

Finalmente, los resultados muestran que la tubería evaluada API 5L X65 ya no brinda la confianza necesaria para seguir transportando gas natural bajo condiciones exigentes, y mucho menos sería adecuada para mezclas con hidrógeno, que requieren materiales con mayor tenacidad y resistencia a la fragilización. El desgaste acumulado durante más de dos décadas de servicio y los fenómenos de envejecimiento propios del material han reducido de forma clara su capacidad de respuesta frente a cargas estáticas y dinámicas. En otras palabras, aunque el material conserva parte de su resistencia, la seguridad a largo plazo está comprometida, siendo la unión soldada el punto más crítico de todo el sistema.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, A., Esparza, R., Gil, M. A., Cuahutitla, L. F., Rubio-Rosas, E., Rodríguez-Lugo, V., & Perez, R. (2010). Characterization of the Crack Propagation in the API X-52 and API X-65 Steels into Cathodic Protection. *Materials Research Society*, 1242, S4-P46. <https://doi.org/10.1557/PROC-1242-S4-P46>
- American Petroleum Institute. (2018). *API Specification 5L: Specification for Line Pipe (46th Edition)*. 205.
- American Petroleum Institute. (2021). *API Standard 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities (22nd Edition)*.
- American Welding Society. (2020). *AWS D1.1:2020-Structural welding code-steel*. American Welding Society.
- ASME. (2018). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems ASME Code for Pressure Piping, B31*. www.fouladline.com
- Callister, W. D., & Rethwish, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering An Introduction*.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy*.
- Hashemi, S. H. (2009). Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(8), 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.01.011>
- Hashemi, S. H., & Mohammadyani, D. (2012). Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.011>
- Kou, S. (2003). *WELDING METALLURGY SECOND EDITION*. www.copyright.com.

- Liu, D., Yang, J., Zhang, Y., Qiu, Y., Cheng, G., Yao, M., & Dong, J. (2021). Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-Grade Offshore Engineering Steel. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.694586>
- Nazar Shaghayegh, Lipiec Sebastian, & Proverbio Edoardo. (2025). FEM modelling of hydrogen embrittlement in API 5L X65 steel for safe hydrogen transportation. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00221-y>
- Okiy, S., & Oreko, B. U. (2024). Assessment of Tensile Strength, Hardness and Impact Toughness of API 5L Grade X65 Carbon Steel Pipe Welded Joints at the HAZ using TIG and SMAW Techniques. *European Journal of Science, Innovation and Technology*, 4(6), 160. www.ejsit-journal.com
- Pluvinage, G. (2021). Mechanical properties of a wide range of pipe steels under influence of pure hydrogen or hydrogen blended with natural gas. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 190, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104293>
- Sano Moyeme, Y. C., Betelu, S., Bertrand, J., Serrano, K. G., & Ignatiadis, I. (2025). Corrosion Behavior of X65 API 5L Carbon Steel Under Simulated Storage Conditions: Influence of Gas Mixtures, Redox States, and Temperature Assessed Using Electrochemical Methods for up to 100 Hours. *Metals*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/met15020221>
- Song, W., Wang, P., Wan, D., Qian, G., Correia, J., & Berto, F. (2021). Fatigue crack growth behavior of Ni-Cr-Mo-V steel welded joints considering strength mismatch effect. *International Journal of Fatigue*, 151, 106389. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106389>
- Suryana, Pramono, A., Muda, I., & Setiawan, A. (2019). The Influence of Heat Input to Mechanical Properties and Microstructures of API 5L-X65 Steel Using Submerged Arc Welding Process. *MATEC Web of Conferences*, 269, 01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926901009>

Yu, L., Feng, H., Li, S., Guo, Z., & Chi, Q. (2025). Study on Hydrogen Embrittlement Behavior of X65 Pipeline Steel in Gaseous Hydrogen Environment. *Metals*, 15(6).

<https://doi.org/10.3390/met15060596>

Zhang, Z., Ma, Y., Liu, S., Su, L., Fletcher, L., Li, H., Wang, B., & Zhu, H. (2024). Inhomogeneous Strain Behaviors of the High Strength Pipeline Girth Weld under Longitudinal Loading. *Materials*,

17(12). <https://doi.org/10.3390/ma17122855>

Apéndices

Apéndice A. Dimensiones de las probetas antes y después del ensayo de tracción.

Muestra	Longitud total [mm]	Zona calibrada [mm]		Área transversal [mm ²]
		Ancho	Espesor	
P1	254	19,04	7,89	150,2
P2	254	19,01	7,89	150,0
P3	220	19,02	7,48	142,3

Antes

Muestra	Sección reducida [mm]	
	Ancho	Espesor
P1	12,87	4,67
P2	13,47	4,38
P3	13,27	4,23

Después

Apéndice B. Vista lateral de la fractura en probetas tras impacto Charpy.



Metal base



Unión soldada