

Evaluación del comportamiento adhesivo y mecánico de una matriz compuesta por fibra de carbono y resina epóxica modificada con óxido de grafeno en la rehabilitación externa de tuberías de acero al carbono

Julián David Lizcano Ortiz

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros

Codirector

PhD(c). Julián David De Bedout Ordóñez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi Dios.

A mi bisabuela Isolina, mujer ejemplar y de corazón noble. Brindaste a mi vida una luz increíble, incluso después de tu partida. De ti aprendí que el amor realmente existe y que la felicidad se encuentra en las cosas más simples de la vida. Todo esto se lo debo a ti, mi ángel guardián.

Q.E.P.D.

Agradecimientos

A Dios infinitas gracias. Su mano y amor nunca me han soltado.

A mi bisabuela, con sus enseñanzas, su amor y sus cuidados me formé como la gran persona que ella siempre esperó que yo fuera. Te extraño y te amo demasiado.

A mi madre, mujer ejemplar y trabajadora. Su alegría no tiene comparación y su amor y entrega siempre van a ser uno de mis mayores apoyos. Te amo demasiado.

A mi abuela, su sacrificio, berraquera y fortaleza siempre van a ser inspiración para mi camino profesional y personal. Te amo demasiado.

A mi familia, tíos, primos, hermanos, abuelos. Gracias por tanto apoyo y estar junto a mí en medio de tantas dificultades. Los quiero mucho.

A Hernando Bottia. Su conocimiento y apoyo nunca faltaron para impulsarme a seguir este camino profesional.

A Sebastián Soto. Amigo incondicional, apoyo incansable y un colega muy valioso. Te quiero mucho.

A Silvia Patiño. Amiga entregada, fiel y sabia. Te quiero mucho.

A Darío Peña. Maestro y ser humano increíble, sin su apoyo esto nunca hubiera sido posible.

A Julián De Bedout. Su colaboración en el desarrollo de este proyecto fue indispensable.

A la escuela de ingeniería metalúrgica. Nunca me había sentido tan orgulloso de pertenecer a algún lugar como con ustedes.

A la UIS. Por abrirme sus puertas y con ello abrirme las puertas de la vida misma para tanto aprendizaje tanto profesional como personal.

A REDO. Por su confianza en mí y en su apoyo en mi formación como profesional.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 12 |
| 1. Objetivos | 18 |
| 1.1. Objetivo General..... | 18 |
| 1.2. Objetivos Específicos..... | 18 |
| 2. Metodología | 19 |
| 2.1 Preparación de la resina epóxica con el óxido de grafeno | 19 |
| 2.1.1. Síntesis del óxido de grafeno. | 19 |
| 2.1.2. Dispersión del óxido de grafeno en el componente B | 20 |
| 2.1.3. Preparación de la resina modificada y medición del pot life o pote time | 21 |
| 2.2. Realización de los ensayos para determinar adherencia de la nueva resina | 22 |
| 2.2.1. Preparación de los cupones y aplicación de la resina. | 22 |
| 2.2.2. Inspección visual..... | 22 |
| 2.2.3. Medición del espesor de película seca | 22 |
| 2.2.4. Detección de discontinuidades eléctricas..... | 23 |
| 2.2.5. Ejecución del ensayo de adherencia tipo Pull-Off..... | 23 |
| 2.3. Realización de las pruebas hidrostáticas..... | 24 |
| 2.3.1. Preparación de la superficie del acero y generación del defecto | 24 |
| 2.3.2. Preparación y aplicación del refuerzo y medición de dureza | 24 |
| 2.3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas..... | 26 |
| 3. Resultados y discusiones..... | 26 |
| 3.1. Preparación de la resina epóxica con óxido de grafeno (GO) | 26 |
| 3.1.1. Síntesis del óxido de grafeno. | 26 |
| 3.1.2. Dispersión del óxido de grafeno en el componente B | 27 |

| | |
|--|----|
| 3.1.3. Preparación de la resina modificada y medición del pot life o pote time | 28 |
| 3.2. Realización de los ensayos para determinar adherencia de la nueva resina | 29 |
| 3.2.1. Preparación de los cupones y aplicación de la resina. | 29 |
| 3.2.2. Inspección visual..... | 30 |
| 3.2.3. Medición del espesor de película seca | 30 |
| 3.2.4. Detección de discontinuidades eléctricas..... | 31 |
| 3.2.5. Ejecución del ensayo de adherencia tipo Pull-Off..... | 32 |
| 3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas..... | 33 |
| 3.3.1. Preparación de la superficie del acero y generación del defecto | 33 |
| 3.3.2. Preparación y aplicación del refuerzo, medición de dureza y espesor | 34 |
| 3.3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas..... | 37 |
| 4. Análisis extra de resultados | 38 |
| 4.1. Análisis aproximado CAPEX y OPEX..... | 38 |
| 4.1.1. Suposiciones | 39 |
| 4.1.2. Proyecciones de costos a futuro..... | 40 |
| 4.1.3. Análisis CAPEX | 40 |
| 4.1.3.1. Análisis CAPEX camisa de acero..... | 40 |
| 4.1.3.2. Análisis CAPEX refuerzo no metálico | 41 |
| 4.1.4. Análisis OPEX | 42 |
| 4.1.4.1. Análisis OPEX camisa de acero | 42 |
| 4.1.4.2. Análisis OPEX refuerzo no metálico..... | 43 |
| 4.2. Análisis de posibles escenarios..... | 45 |
| 4.2.1. Cálculos realizados | 45 |
| 4.2.1.1. Escenario 1..... | 45 |
| 4.2.1.2. Escenarios 2 al 4 | 49 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 4.2.2. requerimientos técnicos | 50 |
| 4.3. Análisis final | 52 |
| Conclusiones | 54 |
| Recomendaciones | 55 |
| Referencias Bibliográficas | 56 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Resultados del pot life | 28 |
| Tabla 2: Resultados espesores de película seca | 31 |
| Tabla 3: Resultado de detección de discontinuidades eléctricas | 31 |
| Tabla 4: Resultados adherencia Pull - Off | 32 |
| Tabla 5: Datos de preparación de superficie del acero | 34 |
| Tabla 6: Datos de entrada cálculo de capas | 35 |
| Tabla 7: Valores de dureza Shore D del sistema | 36 |
| Tabla 8: Valores de espesor del sistema | 37 |
| Tabla 9: Costos aproximados CAPEX camisa de acero | 40 |
| Tabla 10: Costos aproximados CAPEX refuerzo no metálico..... | 41 |
| Tabla 11: Costos aproximados OPEX camisa de acero..... | 42 |
| Tabla 12: Costos aproximados OPEX refuerzo no metálico | 43 |
| Tabla 13: Condiciones para el escenario 1 | 45 |
| Tabla 14: Resultados de los cálculos escenario 1 | 48 |
| Tabla 15: Condiciones para escenarios 2 al 3 | 49 |
| Tabla 16: Resultados de los cálculos escenarios 2 al 4..... | 49 |
| Tabla 17: Especificaciones Kit Fibra de Carbono | 51 |
| Tabla 18: Resultados requerimientos técnicos para los tres escenarios..... | 51 |
| Tabla 19: Resumen análisis técnico comparativo entre refuerzos | 51 |

Listas de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Metodología utilizada..... | 19 |
| Figura 2: Procesador ultrasónico VCX 750..... | 21 |
| Figura 3: Tuberías utilizadas API SPEL 5L..... | 24 |
| Figura 4: Fibra de carbono..... | 25 |
| Figura 5: Óxido de grafeno sintetizado..... | 26 |
| Figura 6: Endurecedor previo a la adición de GO..... | 27 |
| Figura 7: Endurecedor posterior a la adición de GO..... | 28 |
| Figura 8: Componentes de la resina epóxica modificada..... | 29 |
| Figura 9: Resina epóxica modificada..... | 29 |
| Figura 10: Cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada..... | 30 |
| Figura 11: Tuberías posterior al tratamiento superficial..... | 34 |
| Figura 12: Defecto generado en las tuberías..... | 34 |
| Figura 13: Paso 1. Aplicación de primera capa de resina modificada como imprimante..... | 35 |
| Figura 14: Paso 2. Arrollamiento de la fibra de carbono humectada..... | 35 |
| Figura 15: Arrollamiento del plástico Vinipel..... | 36 |
| Figura 16: Montaje de la prueba hidrostática..... | 37 |
| Figura 17: Grafico comparativo OPEX/CAPEX en 25 años..... | 43 |
| Figura 18: Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 1..... | 48 |
| Figura 19: Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 2..... | 49 |
| Figura 20: Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 3..... | 50 |
| Figura 21: Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 3..... | 50 |

Glosario

Acero al carbono: aleación de hierro con carbono (0.05% a 2.0%) que ofrece alta resistencia y dureza, utilizada en construcción y fabricación industrial.

Corrosión: es la degradación de materiales, principalmente metales, por reacciones con el ambiente, lo que puede comprometer su integridad. Factores como humedad y ácidos la favorecen, y su control es crucial para la seguridad en diversas industrias.

Fibra de carbono: la fibra de carbono es un material ligero y resistente, compuesto por filamentos de carbono. Se utiliza en diversas aplicaciones, como en la industria aeroespacial y automotriz, gracias a su alta rigidez y durabilidad.

Óxido de grafeno: es un material derivado del grafeno, que se usa en aplicaciones electrónicas, médicas y energéticas debido a sus propiedades mecánicas y eléctricas excepcionales.

Rehabilitación externa de tuberías: este proceso se realiza para restaurar tuberías dañadas usando materiales compuestos o recubrimientos, prolongando su vida útil y mejorando su resistencia a la corrosión.

Resina epóxica: es un polímero termofijo altamente resistente y duradero, utilizado en recubrimientos y adhesivos, con buena adhesión y resistencia a la humedad y químicos.

Resumen

Título: Evaluación del comportamiento adhesivo y mecánico de una matriz compuesta por fibra de carbono y resina epóxica modificada con óxido de grafeno en la rehabilitación externa de tuberías de acero al carbono *

Autor: Julián David Lizcano Ortiz **

Palabras Clave: corrosión, rehabilitación externa de tuberías, resina epóxica, óxido de grafeno.

Descripción:

La corrosión externa localizada de tuberías de acero al carbono representa un problema crítico en la integridad de los sistemas de transporte de fluidos, afectando tanto la seguridad como la eficiencia operativa. Para mitigar este desafío, se han desarrollado soluciones que incluyen la aplicación de refuerzos externos no metálicos, los cuales combinan resinas y fibras de alta resistencia. Es fundamental que estas resinas posean una fuerte adhesión a la superficie metálica y una robusta estabilidad frente a diversos agentes químicos y la exposición solar, garantizando así su efectividad a largo plazo. Este estudio se centra en evaluar el desempeño de una nueva resina epóxica modificada mediante la incorporación de óxido de grafeno, que se integra en un sistema no metálico para el refuerzo externo de tuberías de acero al carbono. Se utilizó una resina epóxica estándar derivada del bisfenol-A como compuesto base, complementada con una amina cicloalifática modificada como catalizador, además de adicionar 1% de óxido de grafeno como material de relleno. Las propiedades de adherencia de la resina se evaluaron en sustratos de acero al carbono, siguiendo los estándares ASTM D4541. La resina, junto con fibra de carbono, se aplicó como refuerzo externo en una tubería de acero al carbono de 6'' con un defecto de pared completa, realizándose pruebas hidrostáticas para determinar la presión de falla según la norma ASME PCC – 2 – 2018. Los resultados indicaron que la resina modificada con óxido de grafeno presenta propiedades de adherencia superiores a las de la resina comercial, y su uso en el refuerzo no metálico aumentó la presión de falla, sugiriendo que esta nueva resina mejora significativamente el comportamiento del refuerzo externo no metálico en tuberías de acero al carbono, identificando así un material innovador que optimiza el desempeño de estos sistemas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Ingeniería metalúrgica Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD en corrosión. Codirector: Julián David De Bedout Ordóñez. M.Eng petróleo & gas.

Abstract

Title: Evaluation of the adhesive and mechanical behavior of a carbon fiber and graphene oxide – modified epoxy resin matrix in the external rehabilitation of carbon steel pipelines*

Author(s): Julián David Lizcano Ortiz¹

Key Words: corrosion, external pipe rehabilitation, epoxy resin, carbon fiber, graphene oxide.

Description:

Localized external corrosion in carbon steel pipelines poses a critical challenge to the integrity and safety of fluid transport systems. Non-metallic external reinforcements, combining high-strength fibers and resins, have emerged as effective solutions. These resins must exhibit strong adhesion to metal surfaces, chemical stability, and resistance to solar exposure for long-term performance. This study evaluates a novel graphene oxide-modified epoxy resin integrated into a non-metallic reinforcement system for carbon steel pipelines. A standard bisphenol – A epoxy resin, paired with a modified cycloaliphatic amine catalyst, was enhanced with 1% graphene oxide as a filler. Adhesion properties were assessed on carbon steel substrates per ASTM D4541 standards. The modified resin combined with carbon fiber, was applied as an external reinforcement to a 6 – inch carbon steel pipe with a full-wall defect. Hydrostatic tests were conducted to determine failure pressure per ASME PCC – 2 – 2018 standards. Results showed that the graphene oxide – modified resin outperformed commercial resins in adhesion. When used in the non-metallic reinforcement, it significantly increased the pipe's failure pressure, indicating enhanced performance. This innovative resin optimizes the effectiveness of non-metallic reinforcements, offering a promising solution for improving the durability and safety of carbon steel pipelines.

* Degree Work

¹ Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Material Science. Metallurgical Engineering. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD Corrosion. Co-Director: Julián David De Bedout Ordóñez. M.Eng oil & gas **

Introducción

El proceso de corrosión es tan antiguo como la tierra misma y ha sido conocido por diferentes nombres a lo largo del tiempo. La corrosión es un fenómeno indeseable que destruye el brillo y la belleza de los objetos metálicos, acortando su vida útil. Incluso, en la antigua Roma el filósofo Plinio (23-79 d.C.) escribió sobre la destrucción del hierro en su ensayo "*Ferrum Corruptur*". La corrosión no solo ha afectado la calidad de vida cotidiana de las personas, sino también su progreso técnico a lo largo de la historia, siendo observada y registrada por muchos escritores, filósofos y científicos. Sin embargo, hubo poca curiosidad por comprender sus causas y mecanismos hasta que Robert Boyle escribió sobre el "Origen mecánico de la corrosividad" (Ahmad, 2006). A partir del siglo XVIII, comenzaron a surgir los primeros enfoques científicos sobre la corrosión, y con ellos, una comprensión más sistemática del fenómeno. Investigadores como Lavoisier y Priestley sentaron las bases de la química del oxígeno, mientras que Johann Wilhelm Ritter propuso por primera vez una relación entre la corrosión y la electricidad. Más adelante, Humphry Davy formuló el principio de la protección catódica, y Michael Faraday estableció las leyes de la electrólisis. Estos avances marcaron el tránsito de la corrosión como una simple observación empírica a una ciencia fundamental (Whittaker, 1959). Este proceso de formalización científica alcanzó su consolidación en el siglo XX con la obra de Ulick R. Evans, cuyo enfoque metodológico y experimental sentó las bases del estudio de la corrosión. En su trabajo *The Corrosion and Oxidation of metals*, Evans integró los conocimientos dispersos hasta entonces y formuló principios científicos aplicables tanto al comportamiento de los metales como a su degradación en diferentes entornos. Por tanto, su contribución no solo permitió entender la corrosión como un fenómeno electroquímico predecible y controlable, sino que

además facilitó el desarrollo de estrategias de prevención efectivas. Esto permitió transformar un problema empírico en una ciencia aplicada con fundamentos sólidos (Evans, 1933).

La corrosión externa es un problema crítico en el ámbito industrial, especialmente para las tuberías utilizadas en el transporte de crudo y otros fluidos. Este tipo de corrosión es causada principalmente por los suelos con alta conductividad eléctrica y baja resistividad. Lo anterior debido a que estos suelos actúan como electrolitos efectivos, acelerando el proceso corrosivo. Este proceso se ve agravado por factores como la falta de uniformidad, la contaminación química y la presencia de bacterias reductoras de sulfato (Castaneda & Rosas, 2015). Asimismo, el pH del suelo también desempeña un papel fundamental, siendo los suelos ácidos más agresivos, mientras que los suelos con pH neutro o alto tienden a ser menos corrosivos. De la misma manera, la humedad es otro factor influyente debido a que los suelos secos rara vez presentan problemas de corrosión (Wasim & Djukic, 2022). Abordar este fenómeno de manera integral es crucial para los ingenieros, quienes deben garantizar la integridad y la seguridad de las tuberías en entornos industriales (Kozyra & Stearns, 2004).

La corrosión externa en las tuberías de transporte de fluidos se manifiesta formando picaduras que se extienden hacia el interior. Este tipo de corrosión puede llegar a eliminar completamente el grosor de la pared de la tubería, causando fugas que afectan la producción y generan pérdidas de contención de fluido (Ma et al., 2019). Asimismo, estas situaciones conllevan elevados costos de mantenimiento, tanto por la necesidad de reemplazar los materiales dañados, como por el tiempo de inactividad y la disminución de la productividad que se genera (Latorre & Vargas, 1999). Otro problema causado por esta corrosión son los daños ambientales que se presentan tras el fallo del acero. Un ejemplo de esto ocurrió en octubre de 2021 donde una fuga de petróleo en la costa sur de California, Estado Unidos, contaminó alrededor de 24 kilómetros de

tramo costero al sur de Los Ángeles y provocó un impacto significativo en el hábitat natural de los delfines de la zona (Lu et al., 2023). Adicional a esto, un estudio realizado por Gerhardus y colaboradores, estima que el costo directo anual de la corrosión en Estados Unidos es de aproximadamente 276.000 millones de dólares, lo que representa alrededor del 3.1% del producto interno bruto del país. Además, se calcula que los costos indirectos podrían duplicar esta cifra, llevando el costo total a más de 551.000 millones de dólares. Lo anterior mencionado incluye gastos como reemplazo de equipos, mantenimiento, pérdida de productividad, control de corrosión, seguros y otros factores relacionados (Koch et al., 2005).

A pesar de los avances en la construcción y protección de tuberías, la industria aún enfrenta problemas críticos de corrosión externa e interna (Askari et al., 2019). Las técnicas de protección contra la corrosión se clasifican en pasivas, activas e híbridas. Por un lado, las pasivas que incluyen recubrimientos y barreras. Luego están las activas que abarcan ánodos de sacrificio y protección catódica. A menudo, se combinan para ofrecer una protección más efectiva. En el caso de la corrosión interna, se utilizan recubrimientos, inhibidores y control de flujo, entre otros. La corrosión externa, por su parte, es una de las principales causas de fallas en tuberías metálicas, especialmente en suelos corrosivos, donde aproximadamente el 70% de las tuberías enterradas colapsan por esta razón (Farh et al., 2023). La vigilancia continua y la innovación en los métodos de prevención y reparación de la corrosión son esenciales para mantener la seguridad y confiabilidad de los sistemas de transporte de fluidos en la industria. (Norsworthy, 2014).

En los últimos 25 años, diversos estudios e investigaciones, tanto públicos como privados, han explorado las ventajas potenciales de emplear reparaciones compuestas para reforzar estructuralmente las tuberías (Hocine et al., 2024a). Estos sistemas de reparación han emergido como una alternativa eficaz, ofreciendo ventajas como prevención de corrosión, reparaciones

rápidas, seguridad y costos reducidos, además de permitir que los procesos operativos continúen sin interrupciones, lo que genera ahorros significativos (Budhe et al., 2017). Así mismo, los recubrimientos en epóxicos de FBE (Fusion Bonded Epoxy) se han utilizado ampliamente en la industria de los oleoductos desde la década de 1950 como un método efectivo para proteger las tuberías contra la corrosión. Inicialmente, el concepto ganó aceptación de manera gradual, pero con el tiempo los proveedores adaptaron las formulaciones de FBE y la tecnología de aplicación mejoró, lo que permitió el desarrollo de sistemas de recubrimiento superiores y competitivos en precio. Por tanto, esto llevó a un crecimiento acelerado del uso de FBE como recubrimiento de oleoductos en Norteamérica a partir de la década de 1980. Desde entonces, los recubrimientos de FBE se han utilizado no solo para la protección externa de las tuberías, sino también en otras partes del oleoducto, como soldaduras y secciones personalizadas (Kehr, 2011).

Considerando lo dicho, un artículo publicado en la *Revista UIS ingenierías* describe los principales componentes de los materiales compuestos no metálicos utilizados en la rehabilitación externa de tuberías de acero al carbono. Entre ellos se destacan las fibras de refuerzo como carbono, vidrio y aramida. Asimismo, las matrices poliméricas, principalmente resinas epóxicas que son elegidas por su resistencia química y adhesión (Leon-Becerra et al., 2024). Además, un estudio realizado por Hocine y colaboradores, evaluó la reparación de tuberías con corrosión externa mediante la técnica de *Composite wrap*, utilizando fibras de vidrio y carbono, resina epoxi, adhesivos de curado rápido y PITTSEAL 444N con alta resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que, con un diseño e instalación adecuados, las tuberías reparadas alcanzaron presiones de estallido iguales o incluso superiores a las originales (Hocine et al., 2024b). Asimismo, Kikanov y colaboradores proponen un sistema de reparación de tuberías corroídas basado en fibra de carbono y resina epoxi. El estudio demostró que las tuberías reparadas con este sistema alcanzaron

una presión de cedencia de hasta 2100 [psi]. Por tanto, esto representó un aumento de siete veces respecto a las tuberías dañadas no reparadas (Mahdi & Eltai, 2018). Adicionalmente, otro estudio realizado en colaboración entre la Universidad de Tulsa y la Universidad Estatal de Iowa evaluó el desempeño de un sistema de reparación de tuberías mediante envoltura de fibra de carbono. En este trabajo se realizaron pruebas hidrostáticas para determinar la capacidad de presión interna de las tuberías reparadas. Una vez realizadas las pruebas, los resultados mostraron que las tuberías reparadas con este sistema alcanzaron una presión de cedencia de entre 2000 y 2300 [psi] (Duell et al., 2008).

Por otro lado, diversos estudios han explorado cómo la modificación o combinación de distintas matrices puede influir positivamente en las propiedades del material compuesto. En un estudio realizado por He-jun y colaboradores, se fabricaron compuestos carbono/carbono utilizando dos tipos de matrices. Las dos matrices fueron carbono de brea y carbono pirolítico. Efectivamente, los resultados mostraron que los compuestos con una matriz dual presentaron un aumento del 96% en la resistencia a la flexión en comparación con aquellos con una sola matriz (Li et al., 2011). Además, se ha demostrado que la incorporación de tan solo un 0.5% en peso de nanotubos de carbono helicoidales funcionalizados en la matriz epóxica puede mejorar significativamente sus propiedades mecánicas. Entre los resultados más destacados se encuentran aumentos del 26% del módulo elástico, 24% en la resistencia a la tracción, 48% en la tenacidad a la fractura y hasta un 85% en la resistencia al impacto (Kadhim et al., 2018). En orden de mejorar las propiedades mecánicas del material, Shivan y colaboradores prepararon muestras de resina con distintas concentraciones de GO de entre 0 a 6% en volumen. Luego, se realizaron pruebas de tracción, impacto y dureza. Los resultados mostraron mejoras notables en la dureza y la resistencia a la tracción con una concentración óptima del 1.5%. Respecto a la resistencia a la tracción del

material, tanto la resistencia como la carga máxima aplicada alcanzaron sus valores más altos con 1.5% con un total de 13 [MPa] y 234 [N] respectivamente. En cuanto a la dureza, esta mejora con la adición de GO de hasta un 3% dando como resultado 227.2 [HV]. Sin embargo, esta decrece con mayores concentraciones debido a defectos generados durante el proceso de fabricación. Por otro lado, en cuanto a las pruebas de impacto realizadas, se determinó que la resistencia al impacto mejora considerablemente en presencia de hasta un 4.5% de GO alcanzando valores de 39.7 [J/mm²] (Abdullah & Ansari, 2015). En este mismo orden de ideas, estas mejoras fueron también revisadas en el estudio hecho por Lodh & Gadhave. En este estudio se evaluó el efecto del óxido de grafeno sobre adhesivos epóxicos. En su revisión, reportan que la incorporación de solo 0.25% en peso de GO resultó en aumento de hasta 5 veces la tenacidad a la fractura y una mejora considerable en la resistencia al corte en el interfaz adhesivo – sustrato. Estas mejoras se atribuyen a la gran superficie específica del GO y a sus grupos funcionales oxigenados. Lo anterior debido a que estos permiten una interacción química efectiva con la matriz epóxica que promueve una mejor transferencia de esfuerzos y mayor integridad estructural del sistema adhesivo (Lodh & Gadhave, 2024).

Estos resultados sugieren una nueva estrategia tecnológica para optimizar las propiedades mecánicas del material compuesto resina/fibra de carbono. Por tanto, este proyecto se centrará en la adición de óxido de grafeno en la resina epóxica EPOXY-MEC8243 y considerará factores mecánicos como adherencia, resistencia a la tracción, rugosidad superficial del acero y la resistencia a la presión hidrostática de este. Para el desarrollo de este proyecto se plantearon los siguientes objetivos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

1.1.1. Evaluar el comportamiento adhesivo y mecánico de una matriz compuesta de fibra de carbono y resina epóxica modificada con óxido de grafeno en la rehabilitación externa de tuberías de acero al carbono.

1.2. Objetivos Específicos

1.2.1. Modificar la resina epóxica EPOXY-MEC8243 con el óxido de grafeno (GO) sintetizado.

1.2.2. Determinar la adherencia de la resina epóxica modificada con óxido de grafeno (GO) sobre el acero al carbono mediante pruebas *pull-off* de acuerdo con la norma ASTM D4541 – 22.

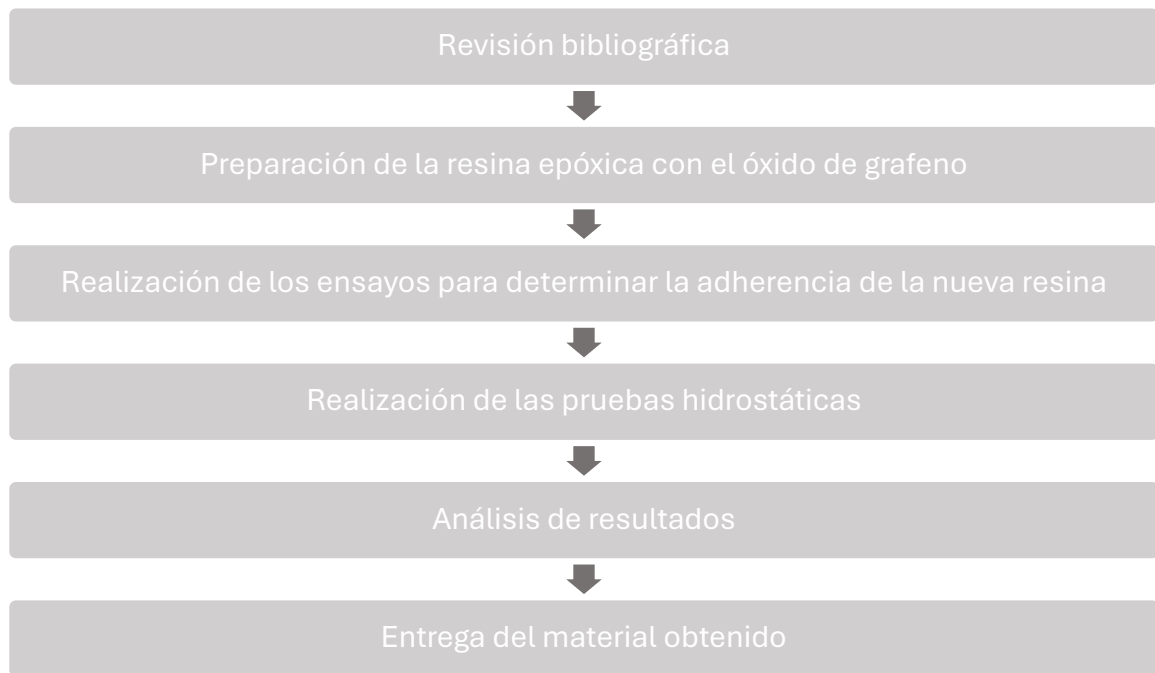
1.2.3. Determinar la presión de cedencia del sistema resina epóxica modificada con óxido de grafeno – fibra de carbono / acero al carbono mediante pruebas hidrostáticas aplicando la norma ASME PCC – 2 – 2018.

2. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos se planteó la siguiente metodología dividida en 6 actividades.

Figura 1

metodología utilizada



2.1 Preparación de la resina epóxica con el óxido de grafeno

2.1.1. Síntesis del óxido de grafeno.

Materiales y equipos: grafito en polvo ácido sulfúrico (H_2SO_4), permanganato de potasio ($KMnO_4$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), agua desionizada, ácido sulfámico, agitador mecánico con control de temperatura, baño ultrasónico con capacidad de enfriamiento, vaso de precipitado, embudos, filtros.

Procedimiento: la síntesis del óxido de grafeno se realizó en el Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular (LEAM), UIS, sede Guatiguará. Se inició con el tamizaje del grafito

utilizando una malla *mesh* número 400 para asegurar un tamaño de partícula menor a 38 [μm], condición esencial para una oxidación eficiente. En segundo lugar, se llevó a cabo la oxidación del grafito mediante el método Hummers modificado. La aplicación de este método consistió en mezclar 2 [gr] de grafito en 15 [mL] de ácido sulfúrico y se agitó a 50 [$^{\circ}\text{C}$]. Posteriormente, se añadieron gradualmente 9 [g] de permanganato de potasio. Una vez completada esta etapa, la mezcla se dejó reaccionar durante seis horas y luego se neutralizó el exceso de oxidante con peróxido de hidrógeno. Más adelante, se lavó el óxido de grafito con agua desionizada hasta alcanzar un pH cercano a 5. Lo anterior incrementó el volumen del producto de 192 [mL] a 230 [mL]. Acto seguido, se realizó la dispersión del óxido de grafito mediante ultrasonido a 4 [$^{\circ}\text{C}$] durante 40 minutos para lograr su exfoliación. En la siguiente fase, se determinó la concentración del GO disperso secando una alícuota de 10 [mL], obteniéndose un valor de 13.4 [mg/mL]. Después, se funcionalizó el óxido de grafeno ajustando su concentración a 5 [mg/mL] y se mezcló 50 [mL] de esta solución con 400 [mg] de ácido sulfámico. Para lo anterior, se calentó la mezcla a 70 [$^{\circ}\text{C}$] bajo agitación constante durante 15 horas. Finalmente, el material obtenido se congeló y se liofilizó para obtenerlo en estado sólido y poder realizar su caracterización (Pérez et al., 2020).

2.1.2. Dispersión del óxido de grafeno en el componente B

Materiales y equipos: óxido de grafeno (diámetro promedio de partícula 121,4 [nm], alto grado de oxidación, relación G/O \approx 0.63), componente B (endurecedor mayormente compuesto por aminas cicloalifáticas) de la resina epóxica, agitador mecánico y dispersor ultrasónico VCX 750

Procedimiento: inicialmente, el óxido de grafeno en polvo fue incorporado al componente B de la resina en una proporción del 1% en peso. A continuación, la mezcla fue homogeneizada mediante agitación mecánica durante 3 minutos para lograr una distribución preliminar del material. Más adelante, se sometió a un proceso de dispersión utilizando energía ultrasónica de alta intensidad.

Para esto, se sumergió la sonda en la mezcla durante 5 minutos. Lo anterior se hizo con el objetivo de asegurar una distribución uniforme del GO dentro del endurecedor.

Nota: (para cantidades de más de 1 [L] de endurecedor se debe usar la sonda de 1500 [V] durante la dispersión).

Figura 2

Procesador ultrasónico VCX 750



Nota: tomado de (Products | Sonics & Materials Inc., 2025).

2.1.3. Preparación de la resina modificada y medición del pot life o pote time

Materiales y equipos: componente A de la resina (Bisfenol – A), componente B modificado (endurecedor con GO), balanza analítica, frascos almacenadores, cronómetro, vasos de precipitado.

Procedimiento: en esta etapa, se procedió a mezclar los componentes de la resina conforme a las indicaciones de su ficha técnica. Para esto, se combinaron dos partes del componente B con una parte del componente A. Una vez realizada la mezcla, se llevó a cabo la determinación del *pot life* o tiempo de trabajo útil del sistema.

2.2. Realización de los ensayos para determinar adherencia de la nueva resina

2.2.1. Preparación de los cupones y aplicación de la resina.

Materiales y equipos: lijas de grano entre 80 y 120, paños limpios y secos, desengrasante y resina epóxica modificada con GO, espátulas, vasos de precipitado y brochas.

Procedimiento: primero, se realizó una limpieza exhaustiva de la superficie metálica con el fin de eliminar contaminantes como polvo, grasa o humedad. Luego, se llevó a cabo un proceso de lijado utilizando lijas de grano entre 80 y 120, con el objetivo de generar rugosidad y así favorecer la adhesión de la resina. Finalmente, se aplicó la resina sobre la superficie metálica preparada, asegurando una cobertura uniforme y continua.

2.2.2. Inspección visual

Materiales y equipos: cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada con GO, fuente lumínica, lentes de aumento y normas ASTM aplicables.

Procedimiento: en esta etapa, se llevó a cabo una inspección visual de las muestras con base en los criterios establecidos por las normas ASTM D610 – 08 (2019), D660 – 93 (2019), D661 – 93 (2019), D714 – 02 (2019) y D772 – 18. Concretamente, se aplicaron estas normas con el propósito de caracterizar e identificar posibles anomalías superficiales como corrosión, agrietamiento, ampollamiento o desprendimiento del recubrimiento. Durante el proceso, se compararon las condiciones observadas con los patrones de referencia descritos en cada norma permitiendo una evaluación cualitativa precisa del estado de las superficies.

2.2.3. Medición del espesor de película seca

Materiales y equipos: cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada con óxido de grafeno (GO) y medidor de espesor por inducción magnética.

Procedimiento: se procedió a medir el espesor de la película seca del recubrimiento aplicado siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM D7091 – 22. Para ello, se utilizó un medidor de espesor adecuado al tipo de sustrato ferroso. Posteriormente, se realizaron múltiples lecturas en distintas zonas de cada muestra, con el fin de evaluar la uniformidad del recubrimiento y verificar la calidad de la aplicación. Finalmente, los valores obtenidos fueron comparados con los rangos esperados para confirmar la conformidad del proceso.

2.2.4. Detección de discontinuidades eléctricas

Materiales y equipos: cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada con GO, elementos de seguridad eléctrica, guantes de seguridad, detector de porosidad de bajo voltaje tipo esponja, esponja conductora, agua desionizada y cables de conexión a tierra.

Procedimiento: se humedeció la esponja conductora con el agua desionizada y se conectó el sistema de detección a tierra. A continuación, se aplicó un voltaje de 90 [V] mientras se deslizaba la esponja sobre la superficie del recubrimiento. Lo anterior para detectar cualquier señal de acústica o visual que indicara la presencia de poros, fisuras o áreas sin recubrimiento.

2.2.5. Ejecución del ensayo de adherencia tipo Pull-Off

Materiales y equipos: adhesivo epóxico de alta resistencia, cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada con GO, medidor de adherencia portátil, discos de adherencia (dollies) y elementos de seguridad personal.

Procedimiento: se fijaron los dollies a la superficie recubierta de los 4 cupones utilizando un pegamento epóxico, asegurando un contacto uniforme y dejando curar completamente el adhesivo. Posteriormente, se utilizó un medidor de adherencia para aplicar una fuerza de tracción perpendicular a la superficie hasta que ocurriera la falla del recubrimiento o el adhesivo. Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con un valor de referencia de

aproximadamente 1300 [psi] dado por la ficha técnica de la resina, con el fin de evaluar la calidad de la adhesión de la resina modificada.

2.3. Realización de las pruebas hidrostáticas

Se seleccionaron tres tramos de tubería API SPEL 5L A53 GR B SCH40 de 6" de diámetro.

2.3.1. Preparación de la superficie del acero y generación del defecto

Materiales y equipos: tubería de acero al carbono, disco abrasivo, escariadora rotativa, taladro de precisión con broca de 1.5 [mm] y equipos de protección personal.

Procedimiento: se retiró la capa de calamina mediante el uso de un disco abrasivo, eliminando óxidos y contaminantes adheridos. Luego, se utilizó una escariadora para generar rugosidad en la superficie. Lo anterior se hizo con el objetivo de favorecer el anclaje mecánico del recubrimiento. Posteriormente, con base en la norma ASME PCC – 2 – 2018 a cada tramo metálico se hizo un hueco pasante circulas de 1.5 [mm] de diámetro en el centro utilizando un taladro de precisión. Así, se logró simular un daño localizado en la tubería.

Figura 3

Tuberías utilizadas API SPEL 5L



2.3.2. Preparación y aplicación del refuerzo y medición de dureza

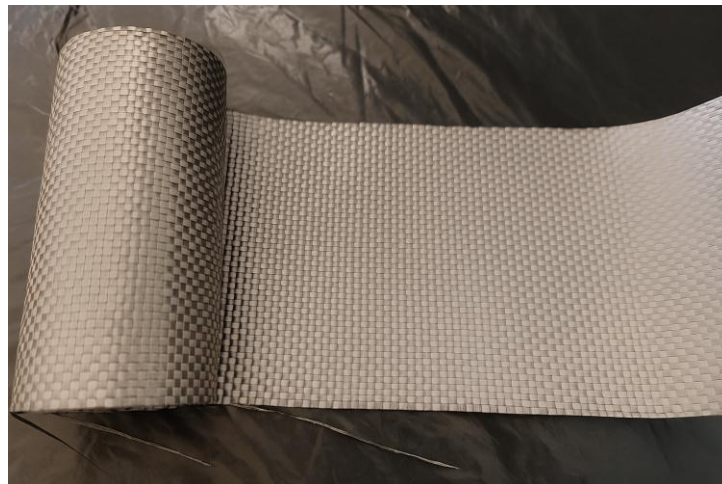
Materiales y equipos: fibra de carbono, resina epóxica modificada con GO y elementos de protección personal, brochas, recipientes, vasos de precipitado, cortador, GO WRAP, tubería de

acero al carbono previamente tratada, sistema de control térmico, durómetro Shore D y medidor de espesor.

Procedimiento: se cortó la fibra de carbono en secciones de 15 [cm] de ancho, adecuadas para su aplicación sobre las superficies tratadas. Luego, se humectó completamente la fibra utilizando la resina modificada (GO WRAP), asegurando una impregnación uniforme. Una vez hecho esto, se colocaron seis capas de GO WRAP, dispuestas de forma helicoidal alrededor de la tubería. Luego, se aseguraron traslapes de 2 [cm] entre capas para garantizar la continuidad estructural del refuerzo. Durante el proceso, se cubrió una longitud total de 40 [cm] de la tubería. Paralelamente, se mantuvo la superficie a una temperatura constante de 86 ± 2 [°C], condición necesaria para favorecer el curado adecuado de la resina y optimizar la adherencia del sistema. Seguidamente, se compactó el sistema utilizando vinipel, con el fin de evitar derrames de resina y asegurar una correcta consolidación del refuerzo. Una vez finalizada la aplicación del refuerzo, se dejó con la misma temperatura aplicada durante dos horas antes de apagar el sistema de calentamiento. Finalmente, al alcanzar la temperatura ambiente, se midió la dureza Shore D y espesores de cada una de las tuberías.

Figura 4

Fibra de carbono



2.3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas

Materiales y equipos: agua, tubería metálica reforzada con GO WRAP, conexiones hidráulicas de alta presión, sellos/empaques resistentes a altas temperaturas, bomba hidráulica, manómetros, sistema de control térmico, cronómetro y elementos de protección personal.

Procedimiento: se conectó la tubería reforzada al banco de pruebas y se llenó completamente con agua, eliminando cualquier burbuja de agua. Luego, en la primera etapa, se aplicó una presión de 670 [psi] a una temperatura constante de 93 [°C], manteniendo estas condiciones durante 24 horas. Posteriormente, en la segunda etapa, se incrementó la presión hasta 2500 [psi] durante 15 minutos, manteniendo la misma temperatura.

3. Resultados y discusiones

3.1. Preparación de la resina epóxica con óxido de grafeno (GO)

3.1.1. Síntesis del óxido de grafeno.

Figura 5

Óxido de grafeno sintetizado



Nota: tomado de (Pérez et al., 2020).

El óxido de grafeno (GO) obtenido presentó un diámetro hidrodinámico promedio de 357.2 [nm] con una distribución de tamaño entre 100 y 1000 [nm]. Asimismo, un grado de oxidación significativo que resulta en una pérdida de masa del 40% a 205 [°C] debido a sus grupos funcionales oxigenados, y la presencia de grupos funcionales como O-H, C=O y C=C (Pérez et al., 2020).

3.1.2. Dispersión del óxido de grafeno en el componente B

El cambio de color presentado por el endurecedor como se muestra en la figura # indica una buena incorporación del nanomaterial. Esto también sugiere posibles interacciones químicas entre los grupos funcionales del GO (como los carboxilos) y las animas. Además, el oscurecimiento puede intensificarse si la concentración de GO es alta o si hay aglomeración parcial. En resumen, el cambio de color es una señal esperable y potencialmente positiva que refleja la presencia activa del GO en el sistema.

Figura 6

Endurecedor previo a la adición de GO



Nota: tomado de (Made in China, 2025).

Figura 7

Endurecedor posterior a la adición de GO



3.1.3. Preparación de la resina modificada y medición del pot life o pote time

La ficha técnica de la resina EPOXY MEC8243 expresa un *pote time* o *pot life* de 30 minutos al ser aplicada junto al endurecedor KH816. Por otro lado, luego de la modificación de la resina se determinó que el *pot life* de esta alcanzó 45 minutos. Lo anterior nos indica que la mezcla se volvió más estable y tarda más en comenzar a endurecerse. Esta extensión en el tiempo de trabajo puede deberse a que el GO reduce la velocidad de reacción entre la resina y el endurecedor, causando así que la gelificación ocurra más lentamente. Asimismo, esto se traduce en la obtención de una mezcla más manejable durante la aplicación, lo cual es especialmente útil en procesos manuales o de gran superficie.

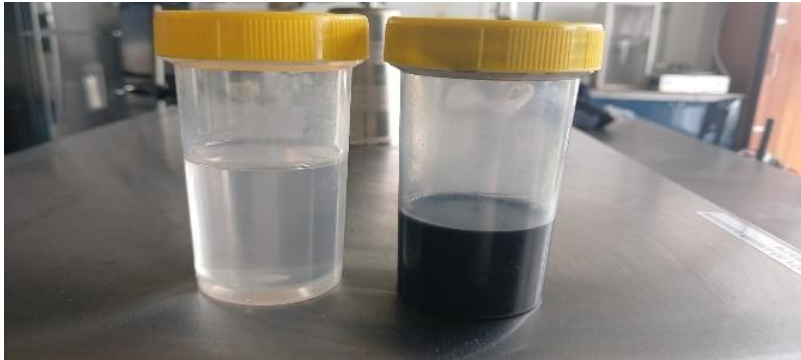
Tabla 1

Resultados del pot life

| Tipo de resina | Pot Life o Pote Time [minutos] |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Epoxy MEC8243 | 30 |
| Modificada con GO | 45 |

Figura 8

Componentes de la resina epóxica modificada



Nota: a la derecha se observa el componente B y a la izquierda el componente A.

Figura 9

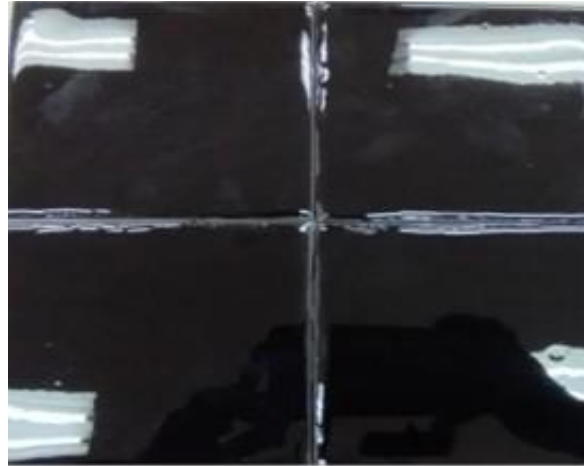
Resina epóxica modificada

**3.2. Realización de los ensayos para determinar adherencia de la nueva resina*****3.2.1. Preparación de los cupones y aplicación de la resina.***

La limpieza y el lijado fueron pasos fundamentales para obtener el resultado observado en la figura #. Lo anterior debido a que al eliminarse contaminantes como polvo, grasa y humedad se evitó la interferencia de estos con la adhesión de la resina. Asimismo, el lijado generó una rugosidad adecuada que favoreció el anclaje mecánico de la resina a los cupones.

Figura 10

Cupones metálicos recubiertos con resina epóxica modificada

**3.2.2. Inspección visual**

De acuerdo con la inspección visual realizada, los cupones metálicos recubiertos la resina epóxica modificada con GO presentan una superficie uniforme y sin defectos visibles. Primeramente, según la norma ASTM D610, el recubrimiento se clasifica en el grado 10 debido a la ausencia total de óxido o corrosión. Asimismo, conforme a las normas ASTM D660 Y 661, el recubrimiento se clasifica en el grado 10 lo que representa una ausencia total de agrietamiento, descascarillado o fisuras. Lo anterior sugiere una buena adhesión y flexibilidad de la resina. También, de acuerdo con la norma ASTM 714, el recubrimiento se clasificaría en el grado 10. Esto nos indica una ausencia total de ampollas o burbujas que se traduce en una adecuada aplicación y curado. Finalmente, según la norma ASTM D772, el recubrimiento se clasifica en el grado 10 lo que nos confirma una ausencia total de descamación o desprendimiento.

3.2.3. Medición del espesor de película seca

La medición del espesor de película seca (EPS) para los cupones, realizada conforme a la norma ASTM D7091-22, arrojó un espesor promedio de 43.6 [mils], con un máximo de 54.0 [mils] y un mínimo de 35.7 [mils]. Por lo anterior se concluyó que este espesor excede considerablemente

los valores aceptables para recubrimientos de resina epóxica sobre superficies metálicas, que generalmente oscilan entre 10 y 30 [mils]. Por consiguiente, esto sugiere una aplicación robusta que puede proporcionar una mayor resistencia a la corrosión y durabilidad.

Tabla 2

Resultados espesores de película seca

| SISTEMA | PROMEDIO [mils] | MÁXIMO [mils] | MÍNIMO [mils] | RESULTADO |
|---------------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|
| Cupones recubiertos | 43.6 | 54.0 | 35.7 | PASA |

En la Tabla 2 se observa que las mediciones de espesor de película en las muestras iniciales presentan valores que indican que existe homogeneidad adecuada en el recubrimiento en las dos muestras.

3.2.4. Detección de discontinuidades eléctricas

Se determinó que no existen discontinuidades en el recubrimiento epóxico. Lo anterior se afirma debido a que, al pasar la esponja húmeda conectada al equipo por la superficie, no se activó ninguna alerta. Por otro lado, de haberse presentado alguna discontinuidad, ésta se habría evidenciado por la activación de alertas. Estas alertas son el resultado del posible acceso de agua en alguna ya sea grieta o poro, causando que se cierre el circuito eléctrico y la alerta sea dada. Sin embargo, al no suceder esto, se concluye que el recubrimiento cumple satisfactoriamente con los requisitos de integridad y protección establecidos en la norma ASTM G62 – 22 método A.

Tabla 3

Resultado de detección de discontinuidades eléctricas

| SISTEMA | VOLTAJE APLICADO [V] | RESULTADO |
|---------------------|----------------------|---|
| Cupones recubiertos | 90 | Sin discontinuidades eléctricas PASA |

3.2.5. Ejecución del ensayo de adherencia tipo *Pull-Off*

El valor promedio de 2058 [psi] obtenido en la prueba indica un nivel alto de resistencia a la tracción adhesiva. No obstante, dado que la falla ocurrió en el adhesivo (pegamento) y no en la resina ni en la interfaz recubrimiento – sustrato, el resultado no refleja la verdadera resistencia de adhesión del sistema evaluado. Según la norma, este tipo de falla se clasifica como “falla en el sistema de prueba”. Lo anterior significa que la adhesión del recubrimiento podría ser incluso mayor que 2084 [psi] que fue el mayor valor obtenido durante el ensayo. Esta información se encuentra registrada en la Tabla 4. Asimismo, la modificación con óxido de grafeno desempeñó un papel clave para esta mejora en la adhesión debido a que este nanomaterial ofrece una alta área superficial. Por consiguiente, esto promueve interacciones físicas que al final se traducen en una mejora notable en el anclaje del recubrimiento al sustrato y su resistencia a la delaminación. También, este resultado representa una mejora significativa respecto al valor de referencia de 1300 [psi] reportado en la ficha técnica de la resina comercial, evidenciando un incremento superior al 58%. Igualmente, esta mejora concuerda con los hallazgos de Lodh & Gadhave, quienes reportan aumentos sustanciales en tenacidad a la fractura y resistencia al corte con solo pequeñas adiciones de GO. En otras palabras, el uso del óxido de grafeno no solo mejoró la adhesión, sino que también contribuye a otras propiedades mecánicas y barrera del recubrimiento, posicionándolo como un sistema de alto desempeño.

Tabla 4

Resultados adherencia Pull - Off

| SISTEMA | ADHERENCIA [psi] | TIPO DE FALLA | RESULTADO |
|---------|------------------|---|-----------|
| 1 | 2084 | Sin falla del recubrimiento 100% falla pegante | PASA |

| | | | |
|---|------|---|------|
| 2 | 2010 | Sin falla del recubrimiento 100% falla pegante | PASA |
| 3 | 2075 | Sin falla del recubrimiento 100% falla pegante | PASA |
| 4 | 2063 | Sin falla del recubrimiento 100% falla pegante | PASA |

3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas

3.3.1. Preparación de la superficie del acero y generación del defecto

La limpieza alcanzada corresponde al estándar SSPC – SP11, que indica una limpieza mecánica de superficie a metal casi blanco sin contaminantes visibles. Lo anterior es un resultado deseado debido a que esto es adecuado para superficies donde el uso de métodos más agresivos como el arenado no es viable. Adicionalmente, la generación de rugosidad mediante escariadora permitió tener un anclaje de cuatro (4) mils. El anterior valor se encuentra dentro del rango recomendado para una óptima adherencia en los sistemas de recubrimiento anticorrosivo.

Respecto a la generación del defecto de hueco pasante, se hizo un orificio de 1.5 [mm]. La norma ASME PCC – 2 – 2018 establece que el orificio debe ser lo suficientemente pequeño para no afectar significativamente la integridad estructural del componente, pero lo bastante grande para permitir una evaluación efectiva del sistema. En este caso, el espesor nominal de pared para esta tubería en específico es de aproximadamente 7.11 [mm]. Si bien este valor supera el 10% que la norma considera como guía, se considera aceptable para propósitos de prueba. Por tanto, el diámetro seleccionado permite simular una fuga controlada para validar la efectividad del refuerzo.

Figura 11*Tuberías posterior al tratamiento superficial***Figura 12***Defecto generado en las tuberías***Tabla 5***Datos de preparación de superficie del acero*

| ÍTEM | VARIABLES | VALORES |
|------|-------------------|-----------|
| 1 | Grado de limpieza | SSPC SP11 |
| 2 | Perfil de anclaje | 4 mils |

3.3.2. Preparación y aplicación del refuerzo, medición de dureza y espesor

Para el cálculo de la cantidad de capas a aplicarse se utilizaron los siguientes datos

Tabla 6*Datos de entrada cálculo de capas*

| Presión [psi] | Temperatura [°C] | Ubicación | Profundidad [m] | Diámetro [in] | Schedule | Corrosión [%] | Hueco [mm] | Longitud de reparación [m] |
|---------------|------------------|-----------|-----------------|---------------|----------|---------------|------------|----------------------------|
| 2500 | 86 | Enterrada | 2 | 6 | 40 | 20 | 1.5 | 0.4 |

A continuación, se muestran las imágenes correspondientes a la aplicación del refuerzo a la tubería de acero al carbono posterior a su preparación superficial y generación del defecto.

Figura 13*Paso 1. Aplicación de primera capa de resina modificada como imprimante***Figura 14***Paso 2. Arrollamiento de la fibra de carbono humectada*

Figura 15*Arrollamiento del plástico Vinipel*

La norma ASTM D2240 establece que, para sistemas de resina epóxica curada utilizados en aplicaciones estructurales, los valores de dureza Shore D esperados debe ubicarse típicamente en el rango de 75 a 85. En este contexto, los valores obtenidos en los tres sistemas, como se muestran en la Tabla 7, se encuentran en el rango establecido por la norma. Lo anterior indica que el sistema de resina alcanzó un nivel de curado conforme a los estándares técnicos, reflejando una rigidez y consolidación apropiadas para el material.

Tabla 7*Valores de dureza Shore D del sistema*

| Número de tubo | Dureza Shore D mínima | Dureza Shore D máxima |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 77 | 81 |
| 2 | 77 | 80 |
| 3 | 77 | 82 |

En cuanto a los valores de espesor que se listan en la Tabla 8, de acuerdo con la norma ASME PCC – 2 – 2018, parte 4, el espesor típico de una sola capa de tejido de fibra de carbono totalmente impregnado con resina epóxica varía entre 13 y 18 mils. Por tanto, considerando que se aplicaron 6 capas, los valores registrados en zonas sin traslape concuerdan razonablemente con el rango teórico ($6 \text{ capas} * \sim 15 \text{ mils} \approx 90 \text{ mils}$). Por tanto, los espesores obtenidos reflejan una aplicación adecuada del sistema de refuerzo en las zonas sin traslape. Asimismo, en las zonas con traslape, los espesores se acercan al doble del espesor nominal. Lo anterior nos indica, con base en

la norma, que el traslape cumplió también con los estándares normativos y también reflejan una correcta aplicación del refuerzo.

Tabla 8

Valores de espesor del sistema

| Número de tubo | Zonas de traslape [mils] | Demás zonas [mils] |
|----------------|--------------------------|--------------------|
| 1 | 189 | 97 |
| 2 | 192 | 91 |
| 3 | 169 | 81 |

3.3.3. Realización de las pruebas hidrostáticas

Con base en los criterios establecidos por la norma ASME PCC – 2 – 2018, el sistema fue sometido a condiciones que superan ampliamente las exigencias mínimas para validar su desempeño. El sistema no presentó ningún tipo de falla durante los ensayos, lo que refleja su capacidad para mantener la integridad estructural, la estanqueidad y la adherencia bajo condiciones de carga elevadas. Por tanto, esta respuesta ante escenarios exigentes demuestra que la combinación entre la resina epóxica modificada con GO y la fibra de carbono resulta altamente efectiva para aplicaciones de contención crítica.

Figura 16

Montaje de la prueba hidrostática



Al contrastar estos resultados con estudios previos, se pone en evidencia una mejora sustancial. Por ejemplo, Duell et al reportaron que sistemas de envolturas con fibra de carbono lograron presiones de entre 2000 y 2300 [psi], mientras que Mahdi y Eltai documentaron un desempeño máximo de 2100 [psi] para tuberías rehabilitadas con materiales compuestos. Frente a ello, el sistema evaluado en esta investigación superó los 2500 [psi] sin comprometer su integridad. Lo anterior sugiere una evolución significativa en la capacidad de resistencia. Esta mejora se atribuye directamente a la inclusión del GO en la matriz epóxica. En efecto, su presencia potencia la adhesión entre la resina y el sustrato metálico, mejora la cohesión interna del material compuesto y permite una distribución más eficiente de los esfuerzos mecánicos. Como resultado, este comportamiento consolida al sistema estudiado como una solución técnicamente superior, capaz de responder con eficiencia y confiabilidad ante las demandas estructurales propias de entornos operativos críticos.

4. Análisis extra de resultados

4.1. Análisis aproximado CAPEX y OPEX

En la investigación también se evaluaron los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX) aproximados que están asociados al método de reparación presentado (GO Wrap), y una camisa de acero al carbono tipo B soldada. El análisis, basado en un horizonte de 25 años sobre una tubería estándar de transporte de crudo de 1 [m] y de 1 [km], revela que el refuerzo no metálico es significativamente más económico. Asimismo, este estudio subraya el potencial del refuerzo de fibra de carbono como una alternativa rentable para la rehabilitación de oleoductos.

4.1.1. Suposiciones

El siguiente análisis de costos aproximado se basó en las siguientes suposiciones y bases de datos (para ambos sistemas se asumió una inflación de 2%):

Especificaciones de la tubería: Tubería de acero al carbono diámetro de 10 pulgadas, estándar en oleoductos con longitudes de 1 [m] y 1 [km].

Tipos de refuerzo:

- *Acero tipo B:* Manguitos o placas (ASTM A36, resistencia a la tracción ~400 [MPa]) soldados.
- *No metálico:* Polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP, CarboDur®), resina epóxica (SikaDur® - 30) y óxido de grafeno.

Vida útil:

- *Acero tipo B:* Vida útil de aproximadamente 15 años con protección catódica y recubrimientos, debido a corrosión (NACE international, 2013). Reinversión completa del CAPEX en el año 15.
- *No metálico:* Vida útil de 25 a 50 años por resistencia a la corrosión (ACI, 2017). Reparaciones menores en años 10 y 20, sin reemplazo en 25 años.

Moneda: USD, con tasa de cambio de 4.000 COP/USD estimada para 2025.

Horizonte temporal: 25 años, con CAPEX inicial en 0, reinversión para camisa de acero en año 15 y OPEX recurrente.

Proyección a futuro:

- *Inflación:* 2% anual, basada en el promedio de inflación en América Latina (World Bank, 2023).
- *Tasa de interés para VPN:* 5% anual, basada en el costo de capital promedio ponderado (WACC) para proyectos energéticos en América Latina (Ocampo & Rodríguez, 2019).

Costos adicionales:

- *Ambientales:* Manejo de residuos, permisos y mitigación de impactos.
- *Logísticos:* Transporte de materiales y equipos en terrenos remotos.

4.1.2. *Proyecciones de costos a futuro*Método

- *Ajuste por inflación:* Costos de 2023 se ajustan a 2025 con:

$$C_{2025} = C_{2023} * (1 + 0.02)^2$$

Para reinversión en el año 15 del acero:

$$C_{2040} = C_{2025} * (1 + 0.02)^{15}$$

- *VPN:* Costos futuros traídos al presente:

$$VPN = \frac{C_{futuro}}{(1 + 0.05)^t}$$

Para OPEX recurrente:

$$VPN = \sum_{t=1}^{25} \frac{C_t}{(1 + 0.05)^t}$$

OPEX no lineal (no metálico): Costos de mantenimiento, inspecciones y monitoreo químico varían con una función cuadrática $1 + 0.01 * (t - 13)^2$ para reflejar mayores costos en años iniciales y finales.

4.1.3. *Análisis CAPEX*4.1.3.1. *Análisis CAPEX camisa de acero.***Tabla 9**

Costos aproximados CAPEX camisa de acero

| Componente | CAPEX camisa de acero | | Fuente |
|------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| | 1 [m] de tubería USD | 1 [km] de tubería USD | |

| | | | |
|----------------------------|--------------|------------------|--|
| Acero | 60 | 60.000 | Aceros Arequipa (2023) |
| Mano de obra | 484 | 3'872.000 | NACE International (2013), Corrosion Control in the Oil and Gas Industry |
| Equipos | 605 | 220.000 | Estimación basada en costos de proyectos de oleoductos (NACE International, 2013) |
| Ambientales | 55 | 55.000 | Estimación basada en costos ambientales de manejo de residuos en oleoductos (NACE International, 2013) |
| Logísticos | 110 | 110.000 | Estimación basada en costos logísticos en América Latina (Ocampo & Rodríguez, 2019) |
| Total CAPEX inicial | 1.314 | 4'317.000 | N/A |
| Reinversión (año 15) | 850 | 2'794.000 | NACE International (2013), Corrosion Control in the Oil and Gas Industry |
| CAPEX total | 2.164 | 7'111.000 | N/A |

4.1.3.2. Análisis CAPEX refuerzo no metálico.

Tabla 10

Costos aproximados CAPEX refuerzo no metálico

| Componente | CAPEX refuerzo no metálico | | Fuente |
|----------------|----------------------------|-----------------------|--|
| | 1 [m] de tubería USD | 1 [km] de tubería USD | |
| CFRP+Resina+GO | 175,10 | 175.100 | CFRP: Sika (2023a), Resina: Sika (2023b), GO: Graphenea (2023) |
| Mano de obra | 242 | 1'936.000 | Sika (2023a) |
| Equipos | 242 | 110.000 | Sika, 2023a) |
| Ambientales | 33 | 33.000 | Estimación basada en costos ambientales de manejo de residuos |

| | | | |
|--------------------|---------------|------------------|---|
| | | | en oleoductos (NACE International, 2013) |
| Logísticos | 55 | 55.000 | Estimación basada en costos logísticos en América Latina (Ocampo & Rodríguez, 2019) |
| CAPEX total | 747,10 | 2'309.100 | N/A |

4.1.4. Análisis OPEX

4.1.4.1. Análisis OPEX camisa de acero.

Tabla 11

Costos aproximados OPEX camisa de acero

| Componente | OPEX camisa de acero | | Fuente |
|-------------------|----------------------|-----------------------|---|
| | 1 [m] de tubería USD | 1 [km] de tubería USD | |
| Mantenimiento | 86 | 86.000 | NACE International (2013), Corrosion Control in the Oil and Gas Industry |
| Inspecciones | 99 | 99.000 | API (2019), API 570 |
| Reparaciones | 11 | 11.000 | NACE International (2013), Corrosion Control in the Oil and Gas Industry |
| Ambientales | 34 | 34.000 | Estimación basada en NACE International (2013) |
| Logísticos | 30 | 30.000 | Estimación basada en costos logísticos en América Latina (Ocampo & Rodríguez, 2019) |
| OPEX total | 260 | 260.000 | N/A |

4.1.4.2. Análisis OPEX refuerzo no metálico.

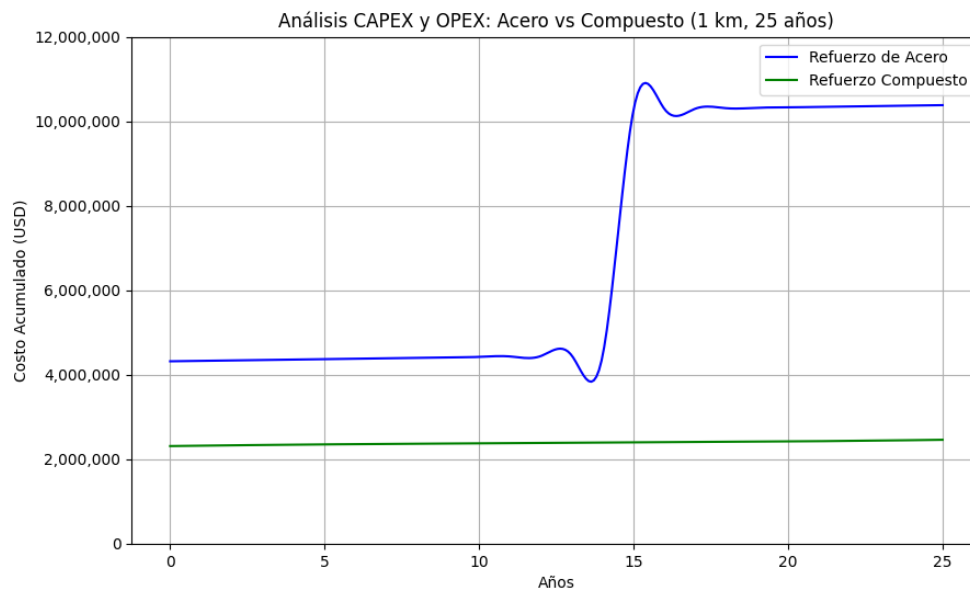
Tabla 12

Costos aproximados OPEX refuerzo no metálico

| OPEX refuerzo no metálico | | | |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
| Componente | 1 [m] de tubería USD | 1 [km] de tubería USD | Fuente |
| Mantenimiento | 30 | 30.000 | ACI (2017), ACI 440.2R-17 |
| Inspecciones | 60 | 60.000 | Sika (2023a) |
| Reparaciones | 20 | 20.000 | ACI (2017), ACI 440.2R-17 |
| Ambientales | 15 | 15.000 | Estimación basada en ACI (2017) |
| Logísticos | 15 | 15.000 | Estimación basada en costos logísticos en América Latina (Ocampo & Rodríguez, 2019) |
| Monitoreo químico | 9 | 9.000 | Graphenemex (2023) |
| OPEX total | 149 | 260.000 | N/A |

Figura 17

Gráfico comparativo OPEX/CAPEX en 25 años



La gráfica generada y los resultados obtenidos revelan que el refuerzo compuesto (no metálico) es significativamente más económico, con un costo acumulado total de \$2'458.100 para 1 [km] frente a \$7'371.000 del refuerzo de acero tipo B a lo largo de 25 años, lo que representa una diferencia del 66.5% a favor del compuesto. Esta ventaja económica se debe a la mayor vida útil del refuerzo no metálico, que no requiere reinversión. Por otro lado, como se evidencia en el gráfico, la curva del refuerzo de acero muestra un salto pronunciado en el año 15 por la reinversión CAPEX (\$5'806.000 para 1[km]), incrementando sus costos en un aproximado del 78%. Además, el OPEX del refuerzo compuesto, con una tendencia no lineal, presenta picos en los años 1 – 5 y los años 20 – 25, genera una curva más suave, con costos de inspección y mantenimiento un 42% menores, especialmente en los años intermedios.

En el análisis económico aproximado presentado, los costos totales del refuerzo de acero tipo B registrados en la tabla y los valores reflejados en la gráfica difieren debido al uso del Valor Presente Neto (VPN) en los costos de la tabla. El VPN ajusta los costos futuros al valor que tendrían en el presente (año 0, 2025), considerando que el dinero pierde valor con el tiempo por factores como la inflación o la posibilidad de invertir y ganar intereses. En las tablas se aplicó un descuento del 5% anual (Ocampo & Rodríguez, 2019) para convertir los costos futuros a su equivalente actual. Esto explica el total de \$7'371.000, que incluye el CAPEX inicial (4'317.000), la reinversión descontada y el OPEX (\$260.000, también descontado). Por otro lado, la gráfica muestra los costos nominales, es decir, los gastos reales incurridos en cada año sin ajuste. Lo anterior resulta en un costo acumulado total de aproximadamente \$10'372.965. Esta diferencia, de aproximadamente un 40,7% mayor en la gráfica, refleja la acumulación de costos sin descuento, destacando el impacto significativo de la reinversión en el año 15 y proporcionando una visión realista del gasto acumulado a lo largo del tiempo.

4.2. Análisis de posibles escenarios

Adicionalmente, se realizó un análisis que presenta una simulación comparativa de cuatro escenarios de reparación, diseñados para reflejar condiciones de deterioro severas. Lo anterior, con el objetivo de evaluar requerimientos técnicos del refuerzo no metálico frente a diferentes niveles de presión, corrosión defectos estructurales y condiciones ambientales. El análisis se efectuó mediante el uso de un software diseñado por el co-director del proyecto, Julián De Bedout. Dicho software utiliza los parámetros y ecuaciones presentes en la norma ASME PCC – 2 – 2018.

Los parámetros contemplados fueron:

- Módulo de elasticidad del CFRP (E_{cfrp}): 230.000 [MPa]
- Resistencia a la tracción del CFRP (σ_{cfrp}): 2.500 [MPa]
- Espesor por capa de CFRP (t_{cfrp}): 0.5 [mm]
- Límite de fluencia del acero (S_y): 235 [MPa]
- Factor de seguridad: 4
- Módulo de elasticidad del acero (E_{steel}): 200.000 [MPa]

4.2.1. Cálculos realizados

4.2.1.1. Escenario 1.

Para este primer escenario se contempló un ambiente cálido y húmedo, la tubería no se encuentra enterrada sin embargo presenta hueco pasante.

Tabla 13

Condiciones para el escenario 1

| Presión [psi] | Temperatura [°C] | Ubicación | Profundidad [m] | Diámetro [in] | Schedule | Corrosión [%] | Hueco [mm] | Longitud [m] |
|------------------|---------------------|-----------|--------------------|------------------|----------|------------------|---------------|-----------------|
| 1200 | 35 | Aérea | 0 | 8 | 40 | 15 | 75 | 10 |

Presión de diseño

$$P_{original} = P_{entrada} * 0.00689476$$

$$P_{original} = 1200 * 0.00689476 = 8.275 \text{ [MPa]}$$

$$Esfuerzo_{circunferencial} = \frac{k * \rho_{suelo} * g * profundidad}{10^6}$$

$$Esfuerzo_{circunferencial} = 0 \text{ (aérea, por tanto profundidad = 0)}$$

$$P_{diseño} = P_{original} + Esfuerzo_{circunferencial}$$

$$P_{diseño} = 8.275 + 0 = 8.275 \text{ [MPa]}$$

Ajuste del límite de fluencia

$$S_y^{ajustado} = S_y * \left(1 - 0.01 * \left[\frac{temperatura - 20}{50} \right] \right)$$

$$\left(\frac{35 - 20}{50} \right) = 0.3$$

$$S_y^{ajustado} = S_y * (1 - 0.01 * 0.3) = 235 \text{ [MPa]}$$

Por corrosión

$$t_{perdido} = t_{inicial} * \left(\frac{\text{Porcentaje de corrosión}}{100} \right)$$

$$t_{perdido} = 8.18 * \left(\frac{15}{100} \right) = 1.227 \text{ [mm]}$$

$$t_{restante} = t_{inicial} - t_{perdido}$$

$$t_{restante} = 8.18 - 1.227 = 6.953 \text{ [mm]}$$

$$P_{max} = \frac{2 * S_y^{ajustado} * t_{restante}}{D_{tubería \text{ en [mm]}} - t_{restante}}$$

$$P_{max} = \frac{2 * 253 * 6.953}{203.2 - 6.953} = 16.652 \text{ [MPa]}$$

Ahora, para hallar las capas necesarias por el daño de corrosión, usamos las siguientes ecuaciones.

$$t_{requerido_corrosión} = \frac{P_{diseño} * D_{tubería \text{ en [mm]}}}{2 * S_y^{ajustado} * 0.5} - t_{restante}$$

$$Capas_{Corrosión} = 1.5 * \left(\frac{t_{requerido_corrosión} * E_{acero}}{E_{cfrp} * t_{cfrp} * \text{factor de seguridad}} \right)$$

Según la normativa si $P_{max} < P_{diseño}$ entonces $t_{requerido_corrosión} = 0$. Por tanto, para el primer escenario.

$$Capas_{Corrosión} = 0$$

Para hueco

$$t_{reparación_hueco} = \frac{P_{diseño} * D_{tubería \text{ en [mm]}}}{2 * \sigma_{cfrp} * \text{factor de seguridad}}$$

$$t_{reparación_hueco} = \frac{8.275 * 203.2}{2 * 2500 * 4} = 0.084 \text{ [mm]}$$

$$capas_{hueco_base} = \left(\frac{t_{reparación_hueco}}{t_{cfrp}} \right) * 1.5$$

$$capas_{hueco_base} = \left(\frac{0.084}{0.5} \right) * 1.5 = 1$$

$$capas_{hueco} = \{ capas_{hueco_base} * [1 + 0.2 * (Longitud_{reparación} - 1)] \}$$

$$capas_{hueco} = \{ 1 * [1 + 0.2 * (10 - 1)] \} = 3$$

Número total de capas

$$Capas_{finales} = \max(capas_{corrosión}, capas_{hueco}, 4 \text{ si } P_{diseño} > 0 \text{ o } 1)$$

$$Capas_{finales} = \max(0,3,4) = 4$$

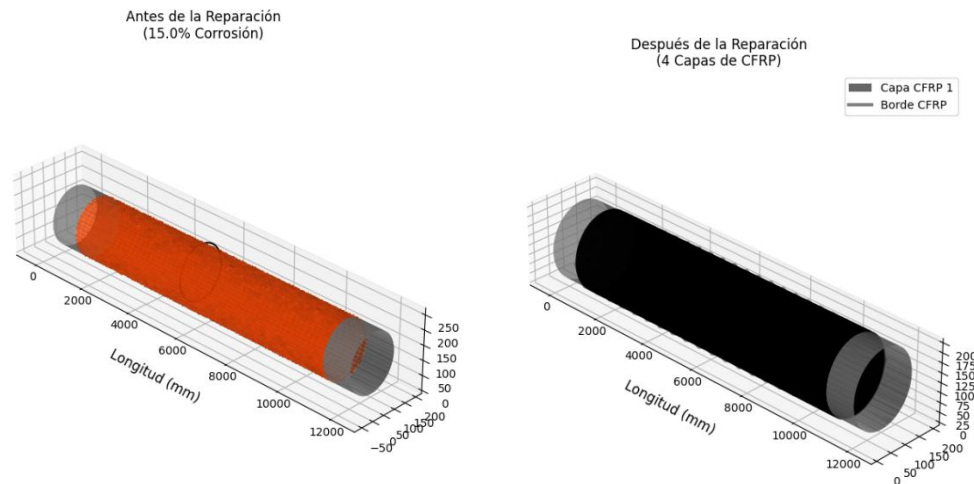
Tabla 14

Resultados de los cálculos escenario 1

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Presión de operación admisible [MPa] | 8.27 |
| Presión de diseño ajustada [MPa] | 8.27 |
| Límite de fluencia ajustado [MPa] | 235 |
| Espesor perdido por corrosión [mm] | 1.23 |
| Espesor restante [mm] | 6.95 |
| Presión máxima admisible sin reparación [MPa] | 16.65 |
| Espesor requerido (corrosión) [mm] | 0 |
| Espesor requerido (hueco) [mm] | 0.08 |
| Capas requeridas (corrosión) | 0 |
| Capas requeridas (hueco) | 3 |
| Número total de capas | 4 |

Figura 18

Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 1



4.2.1.2. Escenarios 2 al 4.

Tabla 15

Condiciones para escenarios 2 al 3

| Escenario | Presión [psi] | Temperatura [°C] | Ubicación | Profundidad [m] | Diámetro [in] | Schedule | Corrosión [%] | Hueco [mm] | Longitud [m] |
|-----------|---------------|------------------|-----------|-----------------|---------------|----------|---------------|------------|--------------|
| 2 | 900 | 5 | Aérea | 0 | 10 | 80 | 10 | 0 | 20 |
| 3 | 1800 | 25 | Enterrada | 1.5 | 12 | 40 | 25 | 100 | 30 |
| 4 | 1500 | 20 | Enterrada | 2 | 14 | 40 | 20 | 0 | 40 |

Tabla 16

Resultados de los cálculos escenarios 2 al 4

| Parámetro | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Presión de operación admisible [MPa] | 6.21 | 12.41 | 10.34 |
| Presión de diseño ajustada [MPa] | 6.21 | 12.42 | 10.35 |
| Límite de fluencia ajustado [MPa] | 235 | 235 | 235 |
| Espesor perdido por corrosión [mm] | 1.51 | 2.58 | 2.23 |
| Espesor restante [mm] | 13.55 | 7.73 | 8.90 |
| Presión máxima admisible sin reparación [MPa] | 26.49 | 12.23 | 12.07 |
| Espesor requerido (corrosión) [mm] | 0 | 8.38 | 0 |
| Espesor requerido (hueco) [mm] | 0 | 0.19 | 0 |
| Capas requeridas (corrosión) | 0 | 6 | 0 |
| Capas requeridas (hueco) | 0 | 7 | 0 |
| Número total de capas | 4 | 7 | 4 |

Figura 19

Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 2

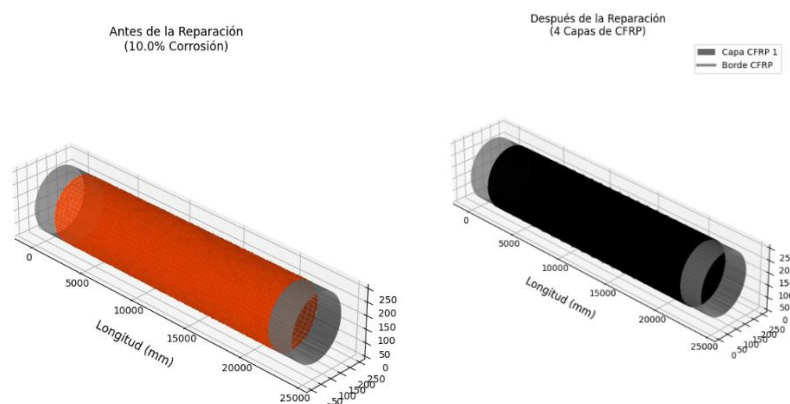


Figura 20

Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 3

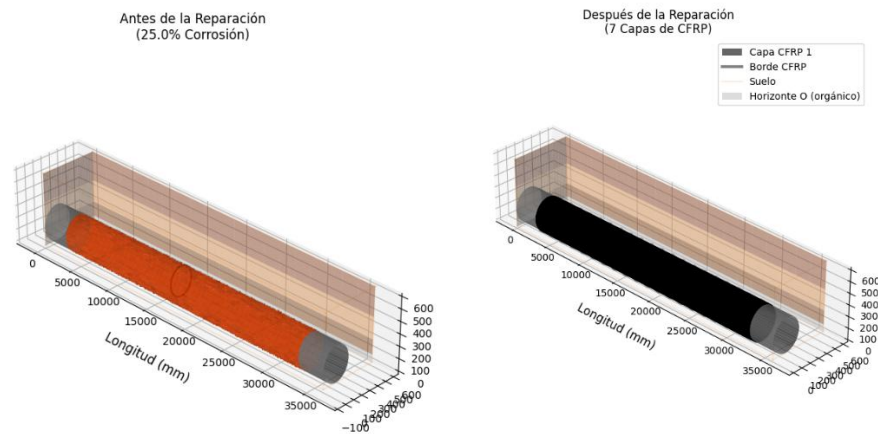
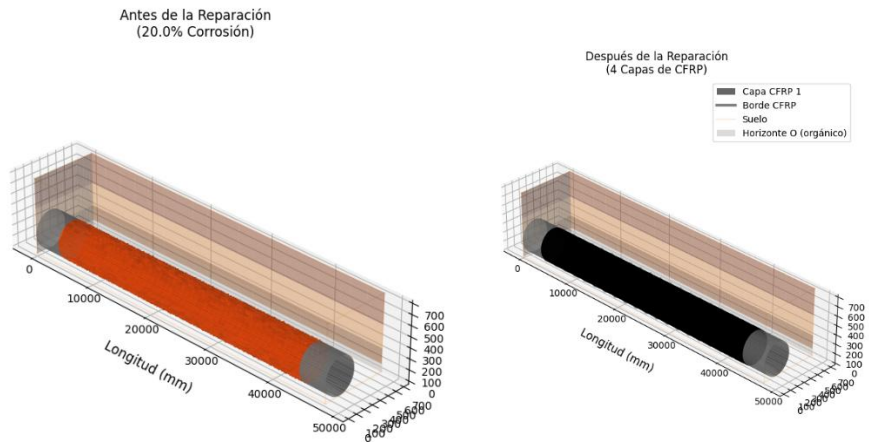
**Figura 21**

Imagen simulada del recubrimiento aplicado para el escenario 4



4.2.2. requerimientos técnicos

La empresa REDO S.A.S. posee especificaciones de los materiales usados en un kit de fibra de carbono como se muestra a continuación.

Tabla 17*Especificaciones Kit Fibra de Carbono*

| Material | Tipo | Dimensiones | Espesor | Peso | Volumen | Descripción |
|-------------------------------|----------------------|------------------------------------|--------------|----------------------|---------|-----------------------|
| Fibra de carbono | Fibra unidireccional | 50 cm X 6 m (3 m ²) | 0.2 – 0.3 mm | 200 g/m ² | N/A | Fibra para laminación |
| Resina epóxica (componente A) | Resina epoxi | N/A | N/A | 420 g | 400 mL | Impregnación de fibra |
| Resina epóxica (componente B) | Endurecedor | N/A | N/A | 190 g | 200 mL | Curado de resina |

Con base en estos datos, los resultados arrojados por el software respecto a los requerimientos técnicos necesarios para realizar una exitosa rehabilitación en los cuatro escenarios son.

Tabla 18*Resultados requerimientos técnicos para los tres escenarios*

| Parámetro | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Área de superficie a reparar [m ²] | 6.38 | 15.96 | 28.73 | 44.69 |
| Área total por reparar [m ²] | 25.53 | 63.84 | 201.09 | 178.74 |
| Número de capas | 4 | 4 | 7 | 4 |
| Kits necesarios | 9 | 22 | 68 | 60 |
| Resina necesaria [mL] | 3600 | 8800 | 27200 | 24000 |
| Endurecedor necesario [mL] | 1800 | 4400 | 13600 | 12000 |

Al realizar la comparación en los cuatro escenarios entre el refuerzo no metálico y una camisa de acero tipo B se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 19*Resumen análisis técnico comparativo entre refuerzos*

| Área | Refuerzo no metálico | Camisa de acero |
|------|----------------------|-----------------|
|------|----------------------|-----------------|

| | | |
|-----------------|---|--|
| Espesor y capas | Usa capas delgadas (0.5 mm/capa), lo que resulta en un refuerzo compacto incluso en un escenario crítico (5.5 mm total). | Requiere espesores significativamente mayores (hasta 78 mm en el escenario 3), lo que aumenta el volumen y puede complicar la instalación en tuberías con acceso limitado. |
| Peso | Mucho más ligero (hasta 67.34 kg en escenario 3), facilita el transporte y reduce la carga estructural en la tubería. | Muy pesado, requiere grúas y soportes adicionales, aumentando costos logísticos. |
| Costo | Más caro en escenarios severos debido al número de kits pero los costos de instalación son menores por no requerir soldadura. | Generalmente más económico en términos de material pero los costos de instalación (soldadura, equipo) pueden triplicar el costo. |
| Instalación | Proceso más simple y rápido, adecuado para reparaciones en campo con acceso limitado. | Instalación compleja, requiere personal especializado, soldadura y pruebas no destructivas, lo que aumenta el tiempo y riesgo operativo. |
| Durabilidad | Excelente resistencia a la corrosión. | Más resistentes a impactos físicos, pero requiere recubrimientos anticorrosivos y mantenimiento periódico. |

4.3. Análisis final

GO Wrap presenta una solución innovadora para abordar el problema crítico de la corrosión externa en tuberías de acero al carbono utilizadas en transporte de fluidos. Este trabajo

desarrollado en la Universidad Industrial de Santander (UIS) en colaboración con Research Engineering Development Operations (REDO), introduce un sistema de refuerzo no metálico basado en un sistema de refuerzo no metálico basado en una resina epóxica modificada con óxido de grafeno combinada con fibra de carbono, que supera significativamente las limitaciones de los métodos tradicionales de rehabilitación.

El sistema GO Wrap destaca por su capacidad para restaurar la integridad estructural de tuberías dañadas sin necesidad de reemplazo, lo que reduce costos, tiempos de inactividad, y riesgos ambientales. Los resultados demuestran una adherencia excepcional (2058 [psi], un 58% superior a la resina comercial), una presión de falla superior a 2500 [psi] en pruebas hidrostáticas, y una robusta protección contra corrosión, validada por normas ASTM y ASME. Además, la extensión del *pot life* a 45 minutos mejora la manejabilidad durante la aplicación, haciendo el proceso más eficiente.

Conclusiones

El cambio de color observado en el endurecedor confirma la adecuada dispersión del óxido de grafeno (GO) en la resina, lo que se refleja de un aumento del *pot life* de 30 a 45 minutos. Esto indica una mezcla más estable y manejable durante la aplicación, favoreciendo procesos manuales y de gran superficie.

Los resultados de inspección visual y medición de espesor cumplen y superan los estándares de las normas ASTM D610, D660, D661, D714 y D772, mostrando un recubrimiento sin defectos, agrietamientos, ampollas ni descamación. Lo anterior indica una aplicación robusta y homogénea que mejora la durabilidad y protección contra la corrosión.

La prueba de detección de discontinuidades eléctricas conforme a la norma ASTM G62 – 22 no detectó fallos en el recubrimiento. Por tanto, se confirma que el sistema cumple con los requisitos de integridad y barrera para evitar la penetración de agentes agresivos.

La adherencia promedio medida por el ensayo *pull – off* supera los 2000 [psi], con fallas ocurridas únicamente en el adhesivo de prueba y no en la resina ni en la interfaz. Así, se demuestra que la incorporación del GO mejoró significativamente la resistencia adhesiva, posicionando al sistema como de alto desempeño.

La ausencia de fallos en las pruebas hidrostáticas demuestra que el sistema de refuerzo aplicado posee la integridad estructural, adherencia y resistencia necesarias para operar de manera segura bajo condiciones normales y extremas. Es así como este desempeño valida que la preparación superficial, aplicación y curado del refuerzo cumplen estrictamente con los estándares establecidos en la norma ASME PCC – 2 – 2018, por lo tanto se asegura la confiabilidad y durabilidad del sistema.

Recomendaciones

Evaluar el efecto que pueda tener un mayor espesor para mejorar la capacidad de los sistemas resina epóxica modificada con óxido de grafeno – fibra de carbono, para retener su adherencia al acero. Adicionalmente, se sugiere evaluar la resistencia a solución alcalina de estos sistemas y revisar las características de estos que puedan ser mejoradas para aumentarla.

Llevar a cabo la evaluación del sistema de refuerzo GO WRAP, de acuerdo con los lineamientos de la normatividad internacional: ASME PCC-2, con el fin de validar las características fisicoquímicas y fisicomecánicas del material.

Llevar a cabo pruebas de hidrostáticas que permitan establecer la resistencia del refuerzo a las variaciones cíclicas de la operación.

Referencias Bibliográficas

- Abdullah, S. I., & Ansari, M. N. M. (2015). Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites. *HBRC Journal*, *11*(2), 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.06.001>
- Aceros Arequipa. (2023). Catálogo de productos y precios. Retrieved from <https://www.acerosarequipa.com/>(<https://www.virtualpro.co/revista/costos-para-procesos-industriales/18>)
- American Concrete Institute (ACI). (2017). ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI: ACI.
- American Petroleum Institute (API). (2019). API 570: Piping inspection code: In-service inspection, rating, repair, and alteration of piping systems. Washington, DC: API.
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier Science & Technology. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=294320>
- Askari, M., Aliofkhazraei, M., & Afroukhteh, S. (2019). A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. In *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (Vol. 71). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102971>
- Budhe, S., Banea, M. D., Rohem, N. R. F., Sampaio, E. M., & de Barros, S. (2017). Failure pressure analysis of composite repair system for wall loss defect of metallic pipelines. *Composite Structures*, *176*, 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.044>
- Castaneda, H., & Rosas, O. (2015). *EXTERNAL CORROSION OF PIPELINES IN SOIL*.

- Duell, J. M., Wilson, J. M., & Kessler, M. R. (2008). Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(11), 782–788. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.08.001>
- Evans, U. R. (1933). *Review Reviewed Work(s): The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Practical Applications* (Vol. 48, Issue 192).
- Farh, H. M. H., Ben Seghier, M. E. A., & Zayed, T. (2023). A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines. *Engineering Failure Analysis*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106885>
- Graphenea. (2023). Graphene oxide pricing. <https://www.graphenea.com/>(<https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/oxido-de-grafeno/polimeros-es/industria-de-plasticos/innovacion-en-la-produccion-de-materiales-compuestos-el-uso-del-grafeno-en-la-pultrusion/>)
- Graphenemex. (2023). Innovación en la producción de materiales compuestos: el uso del grafeno en la pultrusión. Retrieved from <https://www.graphenemex.com/>(<https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/oxido-de-grafeno/polimeros-es/industria-de-plasticos/innovacion-en-la-produccion-de-materiales-compuestos-el-uso-del-grafeno-en-la-pultrusion/>)
- Hocine, A., Kara Achira, F. S., Habbar, G., Levent, A., Medjdoub, S. M., Maizia, A., Dhaou, M. H., & Bezazi, A. (2024a). Structural integrity assessment of corroded pipelines repaired with composite materials – Literature review. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (Vol. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105253>
- Hocine, A., Kara Achira, F. S., Habbar, G., Levent, A., Medjdoub, S. M., Maizia, A., Dhaou, M. H., & Bezazi, A. (2024b). Structural integrity assessment of corroded pipelines repaired with

- composite materials – Literature review. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (Vol. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105253>
- Kadhim, N., Mei, Y., Wang, Y., Li, Y., Meng, F., Jiang, M., & Zhou, Z. (2018). Remarkable improvement in the mechanical properties of epoxy composites achieved by a small amount of modified helical carbon nanotubes. *Polymers*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/polym10101103>
- Kehr, J. A. (2011). *Introduction to Fusion-Bonded Epoxy Coating Systems FUSION-BONDED EPOXY (FBE) PIPELINE COATINGS*.
- Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (2005). *COST OF CORROSION IN THE UNITED STATES*.
- Kozyra, M. K., & Stearns, C. (2004). *Importance of Controlling External Corrosion*.
- Latorre, G., & Vargas, F. (1999). MATERIALES COMPUESTOS ORGÁNICOS UTILIZADOS COMO REFUERZO. In *Tecnología y Futuro* (Vol. 1).
- Leon-Becerra, J., Hernandez-Salazar, C., & Corzo-Álvarez, F. (2024). Materiales, métodos y normativa para refuerzos de material compuesto en reparación de tuberías y equipos a presión. *Revista UIS Ingenierías*, 23(1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n1-2024006>
- Li, H. J., Li, H. L., Li, K. Z., Wang, Y. J., Zhang, D. S., & Lu, J. H. (2011). Mechanical properties improvement of carbon/carbon composites by two different matrixes. *Journal of Materials Science*, 46(13), 4667–4674. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5373-3>
- Lodh, F. P., & Gadhave, R. V. I. (2024). Reinforcing Effect of Graphene in Epoxy Adhesives: Review. *Open Journal of Composite Materials*, 14(01), 60–70. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2024.141005>

- Lu, H., Xi, D., & Qin, G. (2023). Environmental risk of oil pipeline accidents. *Science of the Total Environment*, 874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162386>
- Ma, Y., Guo, Z., Qiao, J., & Bai, H. (2019). Pitting corrosion failure analysis of a produced oil/water fluid pipeline. *Materials Science Forum*, 953 MSF, 39–44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.953.39>
- Made in China. (2025). *Agente de curado de aminos aldehídos fenólicos endurecedor de epoxi T-35 aplicado a baja temperatura o bajo el agua. - China Endurecedor, Agente de curado.* https://es.made-in-china.com/co_honrepoxy/product_Phenolic-Aldehyde-Amine-Curing-Agent-Epoxy-Hardener-T-35-Applied-at-Low-Temperature-or-Under-Water_ysehrenyug.html
- Mahdi, E., & Eltai, E. (2018). Development of cost-effective composite repair system for oil/gas pipelines. *Composite Structures*, 202, 802–806. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.025>
- NACE International. (2013). *Corrosion control in the oil and gas industry*. Houston, TX: NACE International.
- Norsworthy, R. (2014). Understanding corrosion in underground pipelines: Basic principles. In *Underground Pipeline Corrosion: Detection, Analysis and Prevention* (pp. 3–34). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857099266.1.3>
- Ocampo, R., & Rodríguez, J. (2019). Evaluación económica de proyectos de infraestructura energética en América Latina. *Revista de Ingeniería Energética*, 40(2), 45-56. <https://www.revistaingenieriaenergetica.com>

Pérez, E., Mejía, E., Santos, N., Arenas, B., & Porras, V. (2020). *Evaluación de las propiedades interfaciales de un nanofluido de óxido de grafeno sulfonado con potenciales aplicaciones en recobro mejorado.*

Products | Sonics & Materials Inc. (2025). <https://www.sonics.com/vibracell/products/>

Sika. (2023a). *Sika CarboDur: Fibra de carbono para refuerzo estructural.*
[https://www.sluciaconstruccion.com/\]\(https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html\)](https://www.sluciaconstruccion.com/](https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html)

Sika. (2023b). *Sikadur-30: Resina epóxica para adhesión estructural.*
[https://www.sika.com/\]\(https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html\)](https://www.sika.com/](https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html)

Wasim, M., & Djukic, M. B. (2022). External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions. In *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (Vol. 100). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104467>

Whittaker, R. M. (1959). *General Chemistry The rapidity of the changes that have.* Chemical Publishing Co., Inc. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>

World Bank. (2023). World development indicators: Inflation, consumer prices (annual %). <https://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG>