

# Materiales, métodos y normativa para refuerzos de material compuesto en reparación de tuberías y equipos a presión

## Materials, methods, and standards for composite material reinforcements in the repair of pipes and pressure equipment

Juan León-Becerra <sup>1</sup>, Cristian Hernández-Salazar <sup>2</sup>, Fernando Corzo-Álvarez <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación Sinergia, Universidad de Investigación y Desarrollo (UDI), Bucaramanga, Colombia.

Orcid: [0000-0002-1740-3127](https://orcid.org/0000-0002-1740-3127). Correo electrónico: [jleon25@udi.edu.co](mailto:jleon25@udi.edu.co)

<sup>2</sup> Aplika control corrosión S.A.S., Girón, Colombia. Orcid: [0000-0002-9915-6384](https://orcid.org/0000-0002-9915-6384). Correo electrónico: [proyectos@aplika.com.co](mailto:proyectos@aplika.com.co)

<sup>3</sup> Corporación para la Investigación en Corrosión (CIC), Piedecuesta, Colombia. Orcid: [0009-0004-5874-7550](https://orcid.org/0009-0004-5874-7550). Correo electrónico: [fcorzo@corrosioncic.com](mailto:fcorzo@corrosioncic.com)

Recibido: 15 octubre, 2023. Aceptado: 11 diciembre, 2023. Versión final: 22 febrero, 2024.

### Resumen

Debido a su alta resistencia a la corrosión, la fatiga y el bajo peso específico, los materiales compuestos se han desarrollado como una buena alternativa para reemplazar los materiales tradicionales. Se utilizan en el transporte de fluidos, en la rehabilitación y reparación de sistemas a presión en operación y son relativamente fáciles de usar en el sector industrial. Este trabajo muestra el estado del arte en los sistemas de reparación que utilizan reforzamiento de materiales compuestos. Primero, clasifica los sistemas, mostrando los sistemas que están disponibles en el mercado y los compara en términos de sus propiedades mecánicas y procesos de aplicación. En un segundo momento, se presentan y comparan las normas de diseño ASME PCC2 e ISO 24817. Finalmente, se muestran las técnicas experimentales y de simulación utilizadas para su estudio. El trabajo concluye mostrando las posibilidades futuras y desafíos que enfrentan los sistemas de reparación de compuestos en su adopción.

**Palabras clave:** materiales compuestos; reparación; rehabilitación; tuberías; elementos finitos.

### Abstract

Due to their high resistance to corrosion, fatigue and low specific weight, composite materials have been developed as an excellent alternative to replace traditional materials. They are used in fluid transportation, rehabilitation, and repair of in-service pressure systems and are relatively easy to use in the industrial sector. This work presents the state-of-the-art in repair systems using composite material reinforcement. First, it classifies the systems, showing those available in the market, and compares them regarding their mechanical properties and application processes. The second section presents and compares the design standards ASME PCC2 and ISO 24817. Finally, it discusses the experimental and simulation techniques used for their study. The work concludes by showing the future possibilities and challenges that composite repair systems face in their adoption.

**Keywords:** Composites; Repair; Rehabilitation; Pipelines; Finite element.

## 1. Introducción

Los materiales compuestos son aquellos que resultan de la combinación de dos o más materiales con diferentes propiedades en cada uno de sus componentes. En términos generales, constan de una matriz, un refuerzo y la interfase entre ambos. En la industria, las matrices más utilizadas son las poliméricas, mientras que los refuerzos más comunes se presentan en forma de fibras continuas, ya sea en tejidos o en forma unidireccional [1]. Estos materiales compuestos han encontrado aplicaciones en la industria petrolera, siendo utilizados en tuberías de transporte y procesamiento, componentes y recipientes a presión, así como en sistemas de reparación y rehabilitación.

Uno de los elementos más cruciales en esta industria son los sistemas de distribución y aprovechamiento de fluidos. Su diseño, fabricación, mantenimiento y reparación se encuentran regulados por códigos y estándares industriales ampliamente reconocidos, como el ASME B31.3, ASME B31.8, ASME B31.4, ASME B31G, API570, API571, BS7910, ASME Sec. VIII Div 1, entre otros [2]. A pesar de que estos estándares y códigos proporcionan pautas para un correcto diseño e instalación, los sistemas no están exentos de condiciones límite que puedan ocasionar daños o errores en la instalación, así como deterioro continuo durante su vida útil [3].

Las condiciones de instalación y operación pueden dar lugar a defectos en las tuberías y sistemas, los cuales pueden tener distintas naturalezas [3]. La Figura 1 muestra un resumen gráfico de algunos de los defectos más comúnmente identificados en las tuberías utilizadas para el transporte de fluidos de producción de hidrocarburos.

En los sistemas de reparación es crítica una correcta definición de los defectos de la tubería, pues el diseño del laminado compuesto dependerá de la naturaleza, ubicación y dimensiones del defecto [4], [5]. Las reparaciones y rehabilitaciones con polímeros reforzados con fibras (FRP) ofrecen una alta relación resistencia a peso, excelente resistencia química a la corrosión, transparencia a radiación electromagnética, fuerte resistencia a la fatiga y gran versatilidad, siendo posible su instalación en tees, codos, tramos de tubería y componentes estáticos sometidos a presión, brindando la posibilidad de continuar con la operación del activo sin detener la producción, ofreciendo un servicio de reparación (restauración al nivel operativo) y rehabilitación (reconversión al nivel de diseño) [6]. Dada la necesidad de dar a conocer de manera amplia, actualizada y concisa las diferentes opciones de

reparación con el uso de tecnologías de materiales compuestos, el presente trabajo presenta una revisión del estado del arte en sistemas de reparación de materiales compuestos en tuberías y equipos a presión, en diferentes industrias.

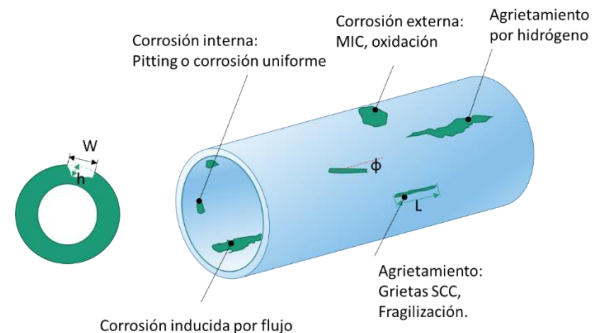


Figura 1. Esquema de defectos comunes presentados en tuberías.

## 2. Sistemas de reparación

En la reparación de tuberías también se usan las camisas de acero y las abrazaderas mecánicas, pero ellas han perdido participación frente a la aparición de composites en el mercado [7]. Las reparaciones mecánicas que usan abrazadera apernada o las camisas soldadas emplean un sistema de retención que evita la salida del líquido. Existen dos tipos básicos de camisas de acero de cerco completo: tipo A y tipo B [8]. La Figura 2 establece de manera esquemática las diferencias entre ambos tipos, como la soldadura de filete para sellar los extremos de la camisa.

Las camisas tipo A se pueden fabricar en el campo simplemente dividiendo una longitud de tubería de igual espesor de pared y grado que el material de la tubería a ser reparada. Las materias primas necesarias para fabricar las camisas del tipo B son significativamente menos costosas que los materiales compuestos y la rigidez y el rendimiento a largo plazo de las camisas de tipo B son equivalentes a los de los tubos de acero de línea. Sin embargo, al considerar el costo de varias opciones de reparación, se deben considerar tanto el costo del material como el costo de instalación [8] siendo este último bastante alto en la instalación con camisas soldadas tipo B.

La reparación con materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras presenta varias ventajas sobre los métodos convencionales. En primer lugar, la reparación es más rápida de realizar, ya que la aplicación es fácil y directa.

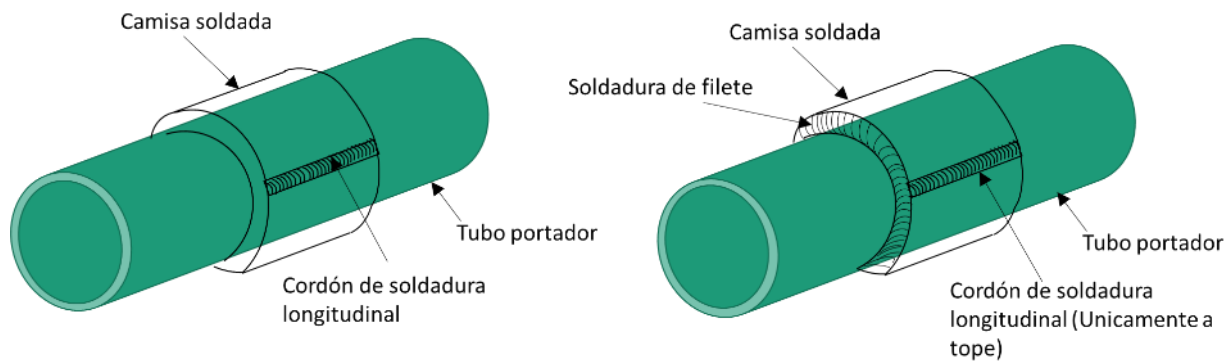


Figura 2. Esquema de las camisas de acero de izquierda a derecha Tipo A y Tipo B.

En segundo lugar, la tubería puede continuar operando mientras se lleva a cabo la reparación. En tercer lugar, se elimina por completo el riesgo de fuego y explosión debido a la soldadura o el corte [12]. Por último, y contrariamente a la creencia común, la reparación con FRP es más económica que otros métodos de reparación utilizados convencionalmente. Muchos ingenieros asumen que el costo de reparación de tuberías con FRP es muy alto y, por lo tanto, es posible que no consideren dicha reparación como una alternativa. El hecho es que cuando se consideran todos los atributos de este sistema, tales como: el corto tiempo de reparación, la inversión de un mínimo de recursos para su instalación (muy poca logística) y la versatilidad de los materiales que pueden ser utilizados en tuberías de cualquier forma y tamaño, permiten considerar el uso de los FRP como una opción bastante atractiva. Por otra parte, la reducción de la rigidez por fluctuaciones de presión de los materiales compuestos en comparación con los de acero, hace que su uso en cargas cíclicas sea menos extendido, siendo el desempeño en el largo tiempo un tema de continuo interés [9], [10], [11].

En estudios comparativos [13], [14], se encontró que la reparación con FRP es de hecho un 24 % más económica que la reparación con manguitos de acero soldado y un 73 % más barata que el reemplazo de la sección de tubería defectuosa. La reparación de tuberías usando FRP puede retardar el crecimiento de la corrosión externa al aislar el defecto externo de entornos corrosivos, por lo que puede considerarse como una reparación de por vida en las condiciones y diseños dados por un ingeniero de diseño de sistemas de reparación compuesto y aplicado por personal capacitado [15].

## 2.1. Clasificación

Existen diversas clasificaciones para los sistemas de reparación de composites siguiendo diversos criterios (Figura 3).

Según su fabricación pueden ser sistemas wet lay-up o sistemas post-curados [16]: Los sistemas de tendido húmedo (Wet Lay-up) comercialmente son muy usados, se basan en el principio de laminado a mano de materiales compuestos. Inicialmente se aplica una primera capa de resina en la superficie, luego se tiende la fibra que puede ser en tela o en forma unidireccional y se impregna con la resina una nueva capa, el procedimiento se repite hasta alcanzar el número de capas especificado, el curado del material compuesto se hace a temperatura ambiente y pueden usarse envoltorios para proteger las capas externas que son retirados posteriormente. Este sistema de tendido húmedo es ventajoso porque tiene la capacidad de cubrir un rango de geometrías que incluyen tees, codos, curvas y válvulas y se ha demostrado que son efectivas [17]. Sin embargo, la naturaleza manual del proceso de fabricación lo hace susceptible a defectos y variaciones en la geometría y las propiedades del material. Existe una variación de los sistemas de tendido húmedo, que son los paños de tejido preimpregnados (prepregs) que se activan por calor, agua u otros catalizadores.

De otra parte, los sistemas Post-curados (aunque su nombre puede ser confuso indicando que requieren de una etapa posterior al curado), ya vienen curados de fábrica por lo que su aplicación es "Post-curado". Suelen venir en rollos donde se tiene la resina y la fibra, generalmente producidos por pultrusión, se aplican junto con un adhesivo (que suele ser metacrilato), entre la tubería y entre cada capa del material [18]. Existen además algunos sistemas que requieren post-curado adicional, en estos sistemas el curado del laminado compuesto se hace por encima de la temperatura ambiente y, por lo tanto, requieren de sistemas de calefacción.

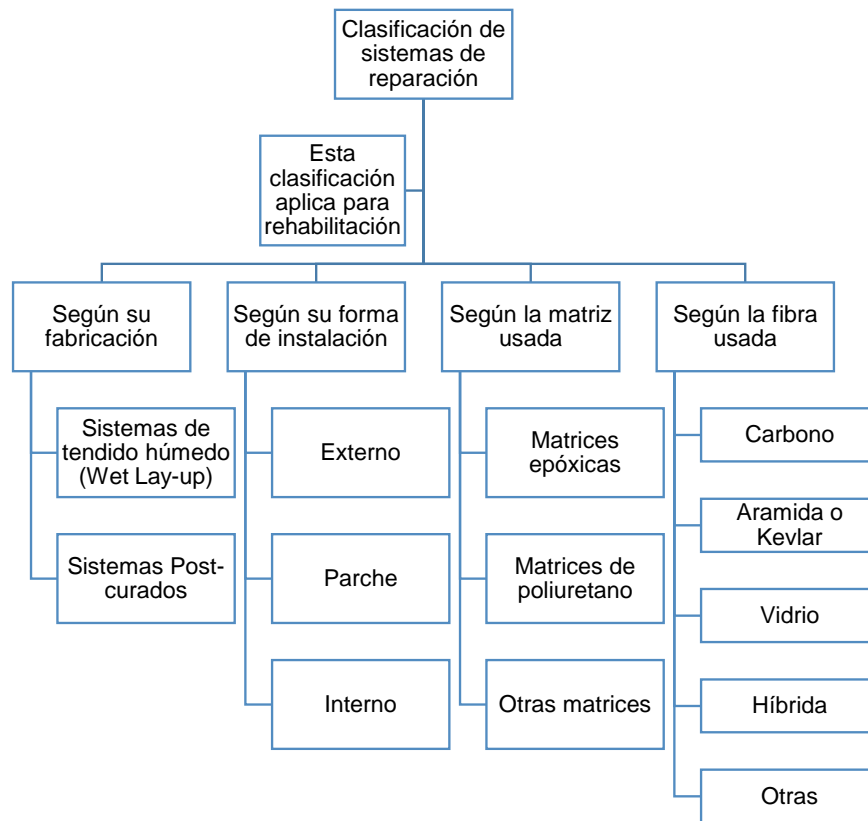


Figura 3. Clasificación de los sistemas de reparación y rehabilitación de materiales compuestos.

De otra parte, la clasificación de los sistemas de reparación usando materiales compuestos según su forma de instalación es:

- Externo: bordea toda una sección exterior del tubo, columna o equipo.
- Parche: aplicada en una zona específica, usada en tubería de grandes diámetros o equipos grandes.
- Interno: el sistema se encuentra en el diámetro interno de la tubería o componente, se subclasifican además en tres tipos: [19]
- CIPP (Cured in place pipe)
- Wet Lay-up
- Un-Bonded

Según los materiales usados se encuentran como:

- **Matrices epóxicas:** los epóxicos [20], son altamente resistentes a una amplia gama de productos químicos industriales y ofrecen alta resistencia mecánica. Los epóxicos también tienden a unirse mejor directamente al acero y pueden no requerir el uso de una capa de imprimación. Generalmente se dispone de este tipo de materiales en forma de resina y su temperatura de servicio es más alta que la de los poliuretanos [20].

- **Matrices de poliuretano:** presentan ventajas significativas en comparación con las resinas epóxicas. Los poliuretanos son, por lo general, más fáciles de manejar debido a su menor viscosidad. Además, cuentan con la notable capacidad de realizar reparaciones en tuberías sumergidas, ya que este tipo de materiales tiende a activarse en presencia de agua.

- **Otras matrices** como el poliéster isostático [21] o vinil éster están también comercialmente disponibles, aunque su uso es menos difundido.

En lo concerniente a la fase de refuerzo se suelen usarse fibras de carbono, fibras de vidrio, fibras de aramida o sistemas híbridos que usan dos tipos diferentes de fibras en el mismo tejido. El coste de la fibra de vidrio es relativamente más bajo que el de las demás; sin embargo, su escasa durabilidad en ambientes cementicios alcalinos ha causado preocupación [22]. La aramida [23] es un compuesto orgánico aromático, entre sus ventajas están su baja densidad, alta resistencia a la tracción y alta resistencia al impacto, entre sus desventajas se incluyen, su baja resistencia a la compresión y degradación a la luz solar. La fibra de carbono se produce a partir de uno de los tres precursores: poliacrilonitrilo (PAN), rayón y

tonos mesofásicos/isotrópicos [24]. Estas fibras, tienen las propiedades más deseadas desde el punto de vista de las aplicaciones de ingeniería civil debido a su resistencia mecánica y de fatiga [25], [9], sin embargo, su costo es el más alto.

## 2.2. Historia

El uso de materiales compuestos reforzados con fibras para las reparaciones de tuberías se desarrolló durante el trabajo en el Southwest Research Institute y Battelle a fines de la década de 1980 [26]. La rehabilitación de tuberías y la retrofit con compuestos de FRP se introdujeron a principios de la década de 1990 como alternativa al uso de camisas de acero. El uso de sistemas de wet layup o tendido húmedo para la reparación de tuberías comenzó a principios de la década de 1990, inicialmente se realizaban con fibra de vidrio. Luego, a finales de la década de los 90, se introdujo el uso de material compuesto de carbono como sustituto de la fibra de vidrio tipo E para la reparación de tuberías. En 2006, se publicó la primera revisión de dos códigos internacionales, uno por la Organización Internacional de Normalización (ISO), ISO 24817 [27] y el otro por ASME PCC-2 [2], para ayudar a los ingenieros a diseñar una reparación fiable de cubiertas compuestas [28]. Actualmente, se está trabajando para mejorar el rendimiento a largo plazo de las reparaciones realizadas con materiales compuestos [29], [30]. A la espera de una mejor comprensión de este aspecto, la consideración de que las reparaciones con materiales compuestos son permanentes, particularmente para tuberías que experimentan fluctuaciones de presión cíclica, es cuestionable.

## 3. Método de aplicación

Es importante contar con toda la información, materiales y procedimientos para dar el inicio de la reparación. La preparación dependerá del sector específico. Los métodos de aplicación exactos dependerán de su fabricación, forma de instalación, materiales y especificaciones o requerimientos del fabricante. En general, es posible distinguir varias fases del proceso como preparación de la superficie, relleno y nivelado del componente, aplicación del material compuesto y curado [31].

La reparación con FRP de líneas de gran diámetro requiere una gran planificación [32]. Como primera medida, el acceso a los segmentos de tuberías a reparar y el riesgo de la tubería suelen ser coordinados por el propietario. Antes del período de cierre de la tubería (de requerirse), las cuadrillas llegan al sitio, se establecen cercas y áreas del material a reparar, equipos y

almacenamiento, instalaciones temporales según sea necesario, áreas de colocación y áreas de saturación y mezcla de materiales, y se deben tener todos los materiales y equipos requeridos en los lugares de trabajo de la tubería.

Se procede con la aplicación según lo indicado en la guía de fabricación, después de que el sistema FRP ha alcanzado un estado de gel, pero antes de que el sistema logre el curado completo, se inspecciona el material instalado sobre la tubería para identificar los defectos que deben corregirse antes del curado. Siempre que sea posible, las inspecciones deberán realizarse al principio del proceso para que puedan corregirse sin necesidad de utilizar parches o realizar pruebas. Una vez curado el sistema, se realiza una inspección visual de toda la superficie.

### 3.1. Requisitos del entorno de instalación

Las condiciones atmosféricas durante el tiempo de aplicación deberán estar dentro de los límites establecidos por las fichas técnicas del fabricante del material. En ambientes fríos y húmedos, se puede deshumidificar y elevar la temperatura del aire para generar las condiciones aceptables. La temperatura ambiente dicta la velocidad de curado de las resinas utilizadas en el sistema, por lo que en climas más calientes el curado es más rápido y la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se hace más alta [33].

Dado que  $T_g$  depende de la temperatura de curado, es necesario seleccionar un material compuesto para reparación de tuberías que coincida con los requisitos de temperatura de servicio, puesto que la temperatura de curado del compuesto debe ser inferior o igual a la temperatura de funcionamiento de la tubería, asegurando el curado del sistema.

### 3.2. Preparación de la superficie

Consiste en delimitar la zona adecuadamente, mediante la marcación de los defectos, el área a rellenar y el perfil de anclaje correcto. La norma ISO 8504-1 proporciona la orientación sobre la preparación de sustratos de acero antes del recubrimiento y se explican los métodos [34] disponibles para limpiar las superficies de acero. Los estándares ISO 8501-1, ISO 8502-12 e ISO 8503-1 proporcionan métodos para evaluar la limpieza y rugosidad de la superficie. Las normas SSPC, NACE (AMPP) y SIS 59.00 son también de uso común para este propósito [6].

Una preparación superficial típica para sistemas Wet lay-up incluye el chorro de arena (sandblasting) de la tubería

a la condición de metal blanco. La superficie de la tubería debe limpiarse mediante aire a presión para eliminar cualquier material suelto [1]. Si el sistema de resina es sensible a la humedad, se debe tener cuidado para evitar la acumulación de humedad en la superficie de la tubería [34]. La Figura 4, muestra un esquema de reparación con material compuesto sobre la preparación superficial requerida.

### 3.3. Reforzado con material compuesto

Una vez realizado el proceso de limpieza y de imprimación se aplica la capa de refuerzo de material compuesto, el procedimiento varía según el tipo de sistema y debe ser consultado con el fabricante. En sistemas reforzados con fibra de carbono puede producirse corrosión galvánica al entrar en contacto el acero y el carbono. La mejor manera de prevenir esto es proporcionar una barrera dieléctrica entre las fibras de

carbono y la tubería de acero, esta puede ser con resina epóxica, aunque la fina capa de resina no es considerada por muchos como una capa adecuada a largo plazo de escudo aislante para evitar este contacto [9]. La práctica más ampliamente aceptada en la industria es aplicar una capa de tela de tejido en fibra de vidrio como la primera capa para cualquier reparación en tubos de acero.

En sistemas de tendido húmedo (Wet Lay-up) hay dos técnicas básicas de envoltura: envoltura circunferencial recta y envoltura en espiral (ver la Figura 5). En una reparación de tamaño pequeño, la cobertura circunferencial tiene el beneficio de la facilidad de instalación; sin embargo, muchas reparaciones se aplican a distancias extendidas de tubería y el envoltorio de bobinado en espiral resulta ser la opción más viable. Existen máquinas automatizadas para ayudar en la cobertura de tuberías a largas distancias.

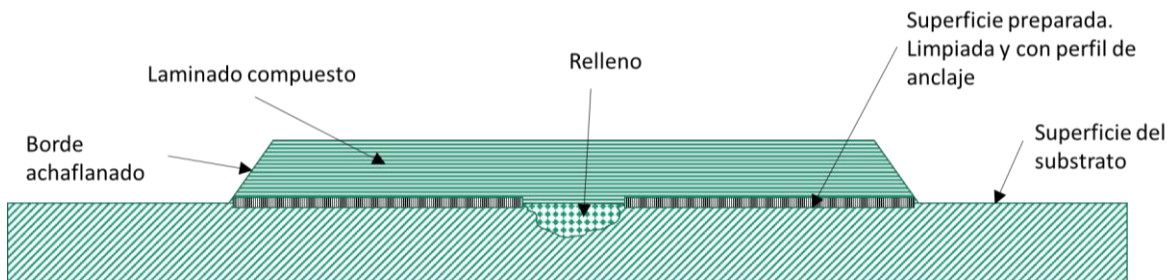


Figura 4. Representación genérica de la sección transversal de una reparación con compuesto.

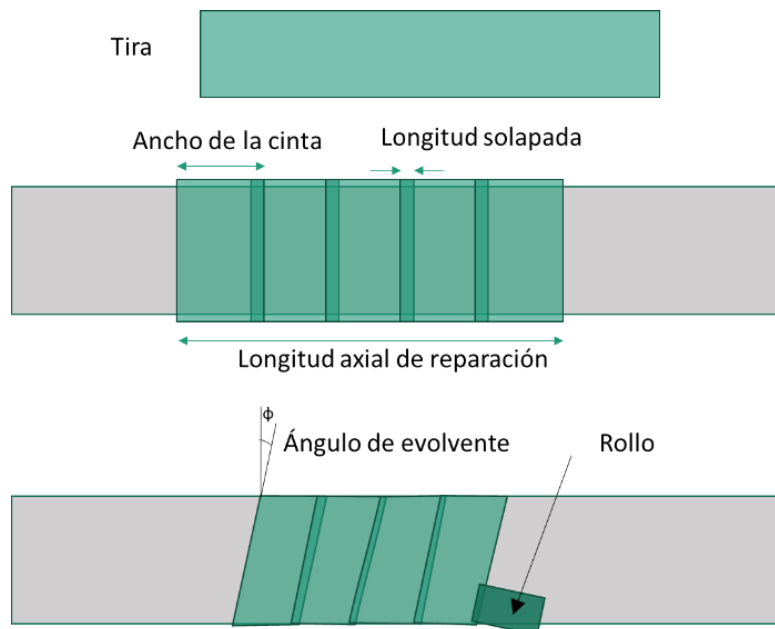


Figura 5. Dos disposiciones diferentes para instalación de un refuerzo de material compuesto.

### 3.4. Medidas de control de calidad

El supervisor capacitado debe observar todos los aspectos de la preparación in situ y la aplicación del material, incluida la preparación de superficies, la mezcla de componentes epoxi, la aplicación de imprimaciones, la aplicación de epoxis, la instalación de telas de fibra, el curado de compuestos y la aplicación de recubrimientos protectores, existen además herramientas de software, hojas de cálculo y aplicaciones web que ayudan a diseñar sistemas de reparación [35]. A manera de comprobación, se puede realizar una inspección visual, usar el golpeteo con un martillo o varilla de metal escuchando el eco para detectar vacíos y delaminaciones; asimismo, se pueden identificar discontinuidades en el refuerzo con el uso de un detector de holidays de alto voltaje, al igual que evaluar la adherencia del refuerzo en los extremos de la reparación (lejos del defecto que ha sido reforzado) [36].

## 4. Productos comerciales

Se ofrece una síntesis de los productos comerciales más relevantes para el refuerzo de compuestos. Dada la amplia variedad de fabricantes, productos, referencias y opciones disponibles, esta comparativa se centra en destacar las propiedades y aplicaciones principales de los productos tradicionales de algunos fabricantes. Se muestra una gama de productos del fabricante CS-NRI, después se comparan diversas soluciones de varios fabricantes.

### 4.1. Descripción y comparativa

SynthoGlass® XT: Sistema de productos que emplea la empresa CS-NRI, este sistema es ideal para las reparaciones rápidas, ya que depende de agua para su activación, su aplicación es ideal para las tuberías que están sumergidas, como por ejemplo en el océano [37]. Se clasificaría como un sistema de tendido húmedo en donde la saturación del tejido de curado con humedad y junto con la resina de poliuretano reducen el tiempo de preparación en más del 50 %. Se asegura la óptima relación fibra-resina con resistencia constante y propiedades mecánicas (Tabla 1).

Thermowrap: Sistema de productos que emplea la empresa CS-NRI, es un sistema que necesita resina epóxica para su aplicación con la fibra de vidrio, este sistema cuenta con un amplio margen de temperatura logrando abarcar activos asociados con múltiples sistemas de fluidos presentes en la industria petroquímica [38] (Tabla 2).

Mediante este sistema de reparación se puede eliminar el tiempo de inactividad no planificado para tubería de alto impacto, otras características es la prolongación de la vida útil mediante la reducción del envejecimiento y la corrosión de activos como las tuberías de transporte. Además, la fluencia mínima que experimenta este material garantiza una larga vida útil, sin el uso de compuestos orgánicos volátiles (COV). Finalmente, previene la ocurrencia futura de corrosión externa.

Tabla 1. Datos técnicos del sistema SynthoGlass (activado con agua)

Datos técnicos			
Espesor de capa		0,014" (0,36 mm)	
Dureza Shore D		75	
Temp Max instalación		120°F (49 °C)	
Temp Max operación		194°F (90°C)	
Temp Min operación		-58°F (-50°C)	
Resistencia química		Amplio rango compatible	
Duración		12 meses	
Temperatura		Duración Hrs	Curado Hrs
°C	°F		
10	50	5.20	24
16	60	3.45	15
24	75	2.30	5.5
32	90	2.00	4.25
49	120	1.00	3
Relleno: EPN-101, ESN-202			
Primer: PPR-220, PPR-290			
Prepreg: XT_FP			

### 4.2. Aplicaciones

El uso de materiales compuestos para reparación, rehabilitación o reforzamiento puede abarcar todas las industrias que requieran de transporte de fluidos, siendo muy amplio el campo de acción. En refinerías son usados en sistemas de transporte de hidrocarburos y en tuberías de proceso [15] al igual que en petroquímica [39]. En infraestructura, e ingeniería civil [40], [41], es usada para reparar sistemas hidráulicos de agua potable [42], concreto PCCP (tubos cilíndricos de hormigón pretensado) [43], drenajes y saneamiento [44], [45], siendo ampliamente usadas las tecnologías sin zanjas y de aplicación interna como las CIPP (Cured In Place Pipe). En particular, para la red de alcantarillado, más del 50 % del inventario de tuberías se compone tubería PCCP o tubos cilíndricos de hormigón (WERF, 2009) que se prestan particularmente bien a las reparaciones con FRP, la Tabla 3 detalla las propiedades mecánicas de rigidez axial (Ea) y rigidez circunferencial (Ec) de diversas soluciones comerciales.

Tabla 2. Datos técnicos de las diferentes opciones del Thermowrap

Datos técnicos	Thermowrap	Thermowrap MT	Thermowrap HT	Thermowrap 500				
Espesor de Capa	0,013" _0,027"	0,013" _0,027"	0,013" _0,027"	0,027"				
Dureza Shore D	85	85	84	85				
Temp Max instalación	120 °F (50 °C)	180 °F (80 °C)	250°F (121 °C)	250°F (121 °C)				
Temp Max operación	200 °F (93 °C)	313 °F (156 °C)	430 °F (221 °C)	500 °F (260 °C)				
Temp Min operación	-58°F (-50 °C)	-58°F (-50 °C)	-58°F (-50 °C)	-58°F (-50°C)				
Duración	12 meses	12 meses	12 meses	12 meses				
Resistencia química	Amplio rango compatible							
<b>Tiempos de Curado en horas</b>								
Temperatura	Thermowrap		Thermowrap MT		Thermowrap HT		Thermowrap 500	
(°C) (°F)	Op1	Op2	Op1	Op2	Op1	Op2	Op1	Op2
25 77	24	-	3	3	-	-	-	-
60 140	.	18	2	2	5	5	-	-
90 195	-	-	1	-	1	1	-	-
120 250	-	-	1	-	-	-	1	-
150 300	-	-	1	10	.	1	.	2
175 350	-	-	3	-	1	-	1	-
205 400	-	-	-	-	.	3	.	10
230 445	-	-	-	-	2	-	-	-
260 500	-	-	-	-	-	-	4	-

Tabla 3. Comparativa de módulos axiales y circunferenciales de diversas soluciones de reforzamiento compuesto

Proveedor	Producto	Detalles	Ea (Psi)	Ec (Psi)
Armor Plate	Armor Plate 360ZED	Wet lay up (S = 2376 PSI v=0,222)	1328000	3565000
Belzona	Superwrap II		2500000	5600000
CSNRI	ViperSkin		24801,44	101598,9
	Superwrap	Wet lay up, activated with water	NA	NA
Hydratech	Hydrawrap	CF reinforced Polymer	2320000	NA
Indumar	Stop it		2490000	NA
	X Corr		2180000	NA
Permawrap			NA	NA
Piping repair technologies	c-2	Bi-axial carbon, aplicar con resina	4600000	4500000
	G-22 Bear tm	Knitted glass	1980000	1980000
	G-05	Woven bi-axial glass	2280000	2280000
	G-03	Woven bi-axial glass	2160000	3600000
Strongback				

En plataformas fuera de costa (Offshore) son usadas como refuerzo de pilotes y demás procesos [46], al igual que en el sector del gas [47]. La aplicación en tuberías submarinas no es un inconveniente ya que se usan resinas activadas con agua [48], [49]. Asimismo, en el sector naval [50] y marino su uso ofrece ventajas por su alta resistencia a la corrosión.

## 5. Análisis y diseño

Los sistemas de reparación con materiales compuestos soportan parte de la carga del componente a presión, por ello, su análisis en términos de esfuerzos, deformaciones

y carga límite es crítico. La presión interna, que está casi siempre presente, ocasiona un estado de esfuerzo que se determina mediante la ecuación de Barlow. La tensión circunferencial se puede encontrar en la ley de Barlow como:

$$sh = \frac{P * D}{2 * t} \quad (1)$$

Donde,  $sh$  representa la tensión circunferencial en el cilindro (hoop stress).  $P$  es la presión interna aplicada al cilindro.  $D$  es el diámetro del cilindro, y  $t$  es el espesor de la pared del cilindro. Debido a la rigidez reducida en



comparación con el acero, los materiales compuestos deben experimentar una cantidad significativamente mayor de alargamiento antes de que se pueda transportar una carga equivalente a la del acero (ver Figura 6). Cuando se instala sobre una tubería metálica, el compuesto está limitado por el acero y no puede soportar una parte significativa de la carga hasta que el acero comience a ceder [51], [12].

Una de las consideraciones más importantes es el efecto de la carga viva (Plive), es decir, si el refuerzo del composite se aplica con presión interna o sin ella. Es fácil ver que a medida que se aplica una carga, el acero, que es mucho más rígido que el material compuesto, inicialmente lleva la mayor parte de la carga [1]. Para que un material compuesto evite que un defecto en una tubería se rompa, el defecto generalmente debe deformarse plásticamente en el proceso de transferencia de la carga al material compuesto [52]. Los defectos en el material de tubería o las soldaduras de costura fragilizadas solo pueden tolerar una cantidad muy pequeña de tensión plástica, contra la cual las reparaciones compuestas no pueden proteger, antes de que el defecto crezca y falle.

Lo más importante a tener en cuenta es que a menos que se aplique un FRP con precarga significativa, el refuerzo no soportará ninguna de las cargas por debajo de las condiciones en las que se instaló. Esto se ilustra gráficamente en la Figura 6. Si se aplica un laminado a una tubería con un espesor localmente reducido, entonces esta área local experimenta una deformación proporcionalmente mayor [53]. Cuando la tubería se despresuriza, la tensión se relaja y el sistema vuelve a sus dimensiones iniciales (en condición descargada), a menos que se ceda. Si se aplica un FRP y la deformación cargada es suficiente, existe un riesgo real de que el laminado se desprege de la tubería durante el proceso de descarga.

### 5.1. Diseño Según Norma ASME PCC2

El enfoque ASME PCC-2 [2] es similar al de ISO 24817 con solo pequeñas diferencias que se discuten a continuación [27]:

El ASME PCC-2 no define ninguna clase de reparación, pero tiene dos artículos diferentes sobre reparaciones con materiales compuestos no metálicos.

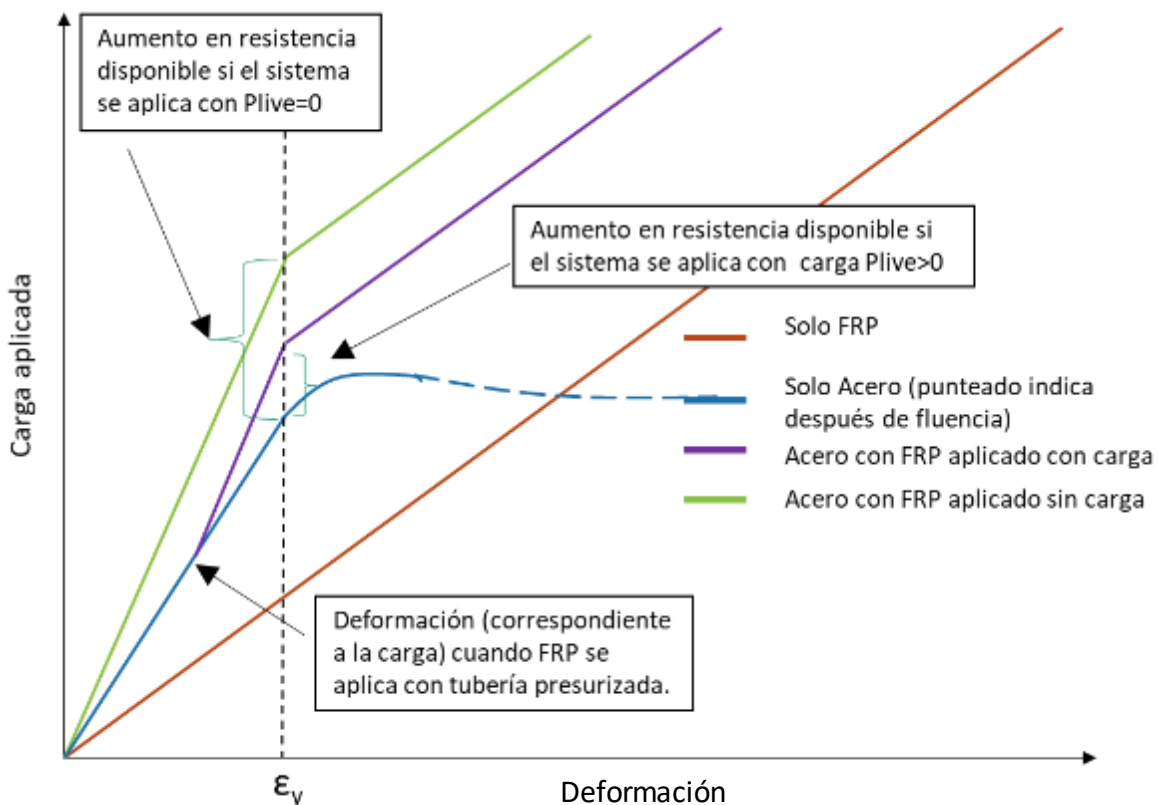


Figura 6. Cargas compartidas en tuberías reforzadas.

El párrafo 1 del artículo 4 habla de aplicaciones de alto riesgo y el párrafo 2 del artículo 4 habla de aplicaciones de bajo riesgo [2].

En el caso en el que se considere la contribución de la tubería en el transporte de la carga, ASME PCC-2 propone una ecuación similar a la de ISO 24817 (ver ecuación (4)) con dos diferencias significativas. En primer lugar, se reemplaza el término 'tensión permitida de tubería' por 'Specific Minimum Yield Stress', que se refiere a la tracción mínima de rendimiento de un grado de tubería específico [27]. En segundo lugar, se realiza la suposición de que la tubería de acero presenta un comportamiento elástico perfectamente plástico, sin experimentar endurecimiento después del punto de fluencia.

En la dirección axial, ambos códigos diseñan bajo condiciones de una fuerza imaginaria equivalente que se supone que induce una tracción general similar en el sistema como todas las demás cargas y momentos combinados (ver ecuación (2)). ISO presenta esta fuerza equivalente como:

$$F_{eq} = \frac{\pi}{4} p D^2 + \sqrt{F_{ax}^2 + 4F_{sh}^2} + \frac{4}{D} \sqrt{M_{ax}^2 + M_{to}^2} \quad (2)$$

Donde  $p$  es la presión interna de diseño;  $D$  el diámetro externo de la tubería;  $F_{sh}$  es la carga cortante aplicada,  $M_{to}$  el momento torsional aplicado,  $M_{ax}$  el momento aplicado en la sección transversal de la tubería, y  $F_{ax}$  la carga aplicada en forma axial.

A diferencia de ISO, ASME no propone ninguna ecuación particular para calcular la fuerza axial equivalente, sino que deja que el diseñador calcule en función de su juicio. ASME solo indica que la carga de tracción axial generada por un momento de flexión es de  $4M/D$  (Siendo  $M$ , el momento flector aplicado, y  $D$ , el diámetro externo de la tubería).

Cuando se trata de la dirección del aro, ISO propone la ecuación (3) para calcular una presión equivalente  $p_{eq}$ :

$$p_{eq} = p \left[ 1 + \frac{16}{(\pi D^2 p)^2} \left( F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)^2 \right] \quad (3)$$

La ecuación de diseño del aro de ASME sólo se basa en la presión interna. ASME ignora la contribución de otras cargas como la fuerza de cizallamiento y el momento de torsión en la generación de tensiones de aro. Como se ve, ISO es un código bastante más avanzado cuando se trata del cálculo de la fuerza axial efectiva y la presión efectiva. Finalmente, ASME PCC-2 ofrece soluciones para diferentes tipos de defectos como se indica en la Figura 7, muy similar a lo dado por la ISO 24817 [2], [27].

## 5.2. Diseño según Norma ISO 24817

De acuerdo con la norma ISO 24817 [27], cada reparación se asignará a una de las tres clases después de la finalización de una evaluación de riesgos [2]. Las reparaciones pueden ser de tipo A donde no existe fugas o pérdidas del espesor total o tipo B en caso contrario. Las reparaciones tipo A se deben diseñar siguiendo uno de los 3 métodos,

- Método 1: aplicable a daños producidos por corrosión de bajo nivel según lo considerado por el diseñador y donde no se dispone de datos de rendimiento a largo plazo. La norma establece una deformación máxima admisible que debe ser inferior a la deformación de diseño dada por (4):

$$\varepsilon_c = \frac{P_{eq} D}{2E_c t_{min}} - \frac{s t_s}{E_c t_{min}} - \frac{P_{live} D}{2(E_c t_{min} + E_s t_s)} \quad (4)$$

Donde  $P_{live}$  es la presión interna en la tubería en el momento de la aplicación de la reparación,  $E_c$  el módulo de elasticidad circunferencial,  $s$  el esfuerzo permisible del material,  $t_{min}$  el espesor mínimo del laminado de reparación y  $t_s$  el espesor del material del sustrato. Habiendo obtenido la deformación unitaria circunferencial ( $\varepsilon_c$ ) máximo permisible según la clase, es posible calcular el espesor mínimo  $t_{min}$  que este no deberá exceder del espesor dado por  $D/6$ .

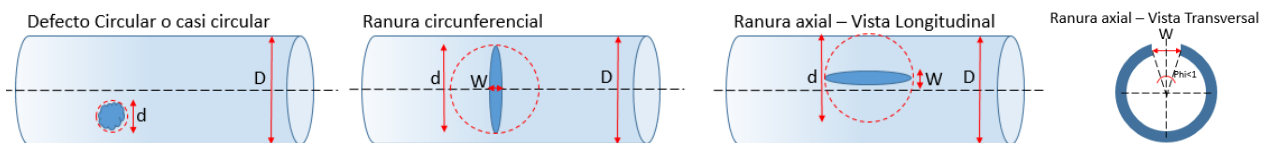


Figura 7. Tipos de defecto pasante establecidos en ASME PCC2.

- Método 2: aplicable a los casos en que, debido a un alto daño por corrosión o a la falta de pruebas de resistencia mecánica, no se puede confiar en la capacidad de la tubería de acero y en los que no se dispone de datos de rendimiento a largo plazo. Este método se utiliza para tuberías sin desprendimientos de material o delaminaciones si el diseñador decide ignorar la resistencia restante de la tubería corroída en la capacidad de carga debido a la corrosión de alto nivel o la falta de información adecuada sobre el alcance y la geometría de la corrosión y las propiedades mecánicas de la tubería existente. Este método calcula el espesor de reparación basándose únicamente en la deformación compuesta permitida.

- Método 3: elaborar un diseño basado en datos de pruebas de rendimiento a largo plazo. El diseñador puede optar por este enfoque siempre y cuando tenga acceso a datos de rendimiento a largo plazo.

Para el defecto Tipo B se diseña usando uno de los tres métodos anteriores, más la condición de defecto pasante, los resultados deben ser comparados, eligiendo el escenario más conservativo. Por definición, un defecto dentro de la tubería es pasante si el espesor restante de la pared de la tubería en cualquier punto es de 1 mm o menos o si se espera que sea así al final de la vida útil de diseño prolongada (después de la reparación) de la tubería.

Además la ISO 24817 introduce un término de gravedad de carga cíclica,  $R_c$ , como la relación entre la presión mínima y máxima a la que está expuesto el sistema [27]. En ISO 24817 se considera el cálculo de un factor de reducción,  $f_c$ , basado en  $R_c$  y el número de ciclos que se prevé que experimente la zona reparada durante su vida útil.

### 5.3. Diseño y análisis por elementos finitos

El estudio y análisis de estos sistemas suelen requerir del uso de los elementos finitos, debido a la complejidad física del problema como condiciones de contacto, posibilidad de grandes deformaciones, presencia de grietas y modelos materiales complejos como ortotropía en compuestos y plasticidad en metales. En cuanto al contacto entre el sustrato y la capa de material compuesto, se han establecido diversos modelos para la capa adhesiva [46].

Al examinar los detalles específicos de una reparación en tuberías de alta presión, el ingeniero de diseño debe tener en cuenta el impacto de la carga cíclica en dicha reparación. Se presentan tres posibles modos de falla en las reparaciones de FRP cuando se someten a carga

cíclica: desembocadura cíclica del adhesivo, falla interlaminar y falla adherente. Aunque los polímeros reforzados han demostrado generalmente ser menos susceptibles a la fatiga en comparación con los metales, aún existe la posibilidad de que se produzca una falla por fatiga. Por lo tanto, es recomendable asegurar que el material opere dentro de ciclos de carga bajos o con una resistencia al límite  $s_{lt}$ , evitando así la región intermedia de la curva de Wohler [54].

## 6. Conclusiones

En los últimos años, se ha observado una inclinación hacia el diseño de revestimientos que no solo enfrentan la presión interna de la tubería, sino que también resisten la presión externa generada por el tráfico y la carga del suelo. En este contexto, el progreso y la proyección futura en la mayoría de los componentes apuntan a la reducción de dimensiones, la disminución de peso, el fortalecimiento, la eficiencia económica y la entrega acelerada con un rendimiento mejorado. La reparación compuesta de sistemas de tuberías de alta presión no queda al margen de esta tendencia, gracias a su versatilidad en diversos sistemas de aplicación, evitando paradas de planta y la ejecución de trabajos que impliquen el uso de fuentes de calor en áreas clasificadas. Si bien los costos de mantener y reforzar las tuberías pueden ser significativos, no deberían ser el factor determinante al considerar la protección y restauración de la integridad de las mismas. Es fundamental buscar un enfoque óptimo al seguir protocolos y evaluar los beneficios que dichos refuerzos pueden ofrecer a la industria. Esto implica ajustar los precios de manera adecuada para satisfacer las diversas necesidades presentes, como la seguridad tanto de la empresa como de los usuarios, además de consideraciones económicas a mediano y largo plazo.

El trabajo de asignar el material compuesto adecuado para el desarrollo de su reparación va de la mano con los modelos de ecuaciones planteados en la norma ASME PCC2 e ISO 24817, pero este puede tener un gran apoyo con los métodos que permiten establecer los beneficios del reforzamiento en las tuberías, como un plus en el momento de cambiar la idea de emplearlos y los beneficios que puede brindar dejando atrás los métodos tradicionales.

Entre las posibilidades futuras se encuentra el empleo de nuevos materiales como el grafeno, nanotubos de carbono, y demás refuerzos de altas prestaciones para mejorar la resistencia de la reparación, [55]. Además, la determinación de la vida remanente usando inteligencia artificial prometen incrementar la confiabilidad en el uso de estos sistemas [56].

## Financiación

Este trabajo es financiado por el gobierno de Colombia a través de la Convocatoria 911 de Minciencias y la Corporación para la Investigación de la Corrosión.

## Contribución de los autores

J. León-Becerra: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. C. Hernández-Salazar: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. F. Corzo-Álvarez: Conceptualización, Escritura-revisión y edición

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

## Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

## Declaración de consentimiento informado

No aplica.

## References

- [1] K. Osouli-Bostanabad, A. Tutunchi, M. Eskandarzade, “The influence of pre-bond surface treatment over the reliability of steel epoxy/glass composites bonded joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 75, pp. 145–154, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.006>
- [2] ASME, “ASME PCC-2: Repair of Pressure Equipment and Piping,” 2018.
- [3] I. Lambrescu, V. A. Chebanenko, D. V. Gusakov, and A. V. Morgunova, “Assessment of the Reinforcement Capacity of Composite Repair Systems for Pipelines with Interacting Defects,” in *Engineering Materials*, 2018, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56579-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56579-8_20)
- [4] W. Sum and K. Leong, “Numerical study of annular flaws/defects affecting the integrity of grouted composite sleeve repairs on pipelines,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 6, pp. 556–565, 2014, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684413503721>
- [5] A. Oulad Brahim, I. Belaidi, S. Khatir, C. Le Thanh, S. Mirjalili, and M. Abdel Wahab, “Strength prediction of a steel pipe having a hemi-ellipsoidal corrosion defect repaired by GFRP composite patch using artificial neural network,” *Compos. Struct.*, vol. 304, p. 116299, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116299>
- [6] N. Saeed, H. Baji, H. Ronagh, “Reliability of corroded thin walled pipes repaired with composite overwrap,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 85, pp. 201–206, Dec. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.08.020>
- [7] H. S. da Costa Mattos, J. M. L. Reis, L. M. Paim, M. L. da Silva, R. Lopes Junior, V. A. Perrut, “Failure analysis of corroded pipelines reinforced with composite repair systems,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 223–236, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.007>
- [8] I. Alsyouf, “The role of maintenance in improving companies’ productivity and profitability,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 105, no. 1, pp. 70–78, Jan. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- [9] O. A. González Estrada, A. D. Pertuz Comas, “Estudio de la fatiga en láminas de tubería compuesta de matriz epóxica con fibra de vidrio para cargas de tracción,” *Sci. Tech.*, no. 4, pp. 479–488, 2018, doi: <https://doi.org/10.22517/23447214.18531>
- [10] C. Alexander, “Advanced Techniques for Establishing Long-Term Performance of Composite Repair Systems,” *International Pipeline Conference*, 2014, doi: <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33405>
- [11] C. Alexander, J. Bedoya, “Repair of Dents Subjected to Cyclic Pressure Service Using Composite Materials,” in *2010 8th International Pipeline Conference*, Volume 1, 2010, vol. 1, pp. 781–789.
- [12] J. M. Duell, J. M. Wilson, M. R. Kessler, “Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 85, no. 11, pp. 782–788, Nov. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.08.001>
- [13] E. Mahdi, E. Eltai, “Development of cost-effective composite repair system for oil/gas pipelines,” *Compos. Struct.*, vol. 202, pp. 802–806, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.025>

- [14] H. S. da Costa-Mattos, J. M. L. Reis, R. F. Sampaio, V. A. Perrut, “An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3581–3591, Oct. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.026>
- [15] P. C. Porter and A. J. Patrick, “Using Composite wrap crack arrestors saves money on pipeline conversion,” *Pipeline Gas J.*, vol. 229, no. 10, pp. 65–67, Oct. 2002.
- [16] J. Bai, *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [17] Y. A. Al-Salloum, T. H. Almusallam, “Rehabilitation of the Infrastructure Using Composite Materials: Overview and Applications,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30777-3](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30777-3)
- [18] T. Rehberg, M. Schad, “Non-metallic composite repair systems for pipes and pipelines”, *GWF, Gas - Erdgas*, vol. 152, no. 4, pp. 232–237, 2011.
- [19] F. A. Hoffstadt, “Cured-in-place composite pipe structures in infrastructure rehabilitation,” *Int. SAMPE Symp. Exhib.*, vol. 45, 2000.
- [20] M. Shamsuddoha, M. M. Islam, T. Aravinthan, A. Manalo, and K. Lau, “Characterisation of mechanical and thermal properties of epoxy grouts for composite repair of steel pipelines,” *Mater. Des.*, vol. 52, pp. 315–327, Dec. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.068>
- [21] M. Mohamadi and M. Heshmati, “Failure analysis of glass-reinforced polyester mortar pipes with different cores subjected to combined loading,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 21, no. 8, pp. 2616–2653, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/1099636217720214>
- [22] R. J. Jackson, I. D. Moore, and A. S. Genikomsou, “A linear elastic design model for sprayed liners in damaged reinforced concrete pipes,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 132, p. 104901, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104901>
- [23] K. S. Lim, S. N. A. Azraai, N. M. Noor, and N. Yahaya, “An Overview of Corroded Pipe Repair Techniques Using Composite Materials,” *Int. J. Mater. Metall. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 19–25, 2016.
- [24] Li, Tsai, Yang, “A Novel Strengthening Method for Damaged Pipeline under High Temperature Using Inorganic Insulation Material and Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Material,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 21, p. 3484, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12213484>
- [25] J. Leon-Becerra, O. A. González-Estrada, and H. Sánchez-Acevedo, “Comparison of Models to Predict Mechanical Properties of FR-AM Composites and a Fractographical Study,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 3546, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14173546>
- [26] V. M. Karbhari, *Rehabilitation of pipelines using Fiber-reinforced polymer (FRP) composites*. 2015.
- [27] ISO, “Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Composite repairs for pipework — Qualification and design, installation, testing and inspection,” 2018.
- [28] J. Santon, “Regulation changes create opportunities for pipeline manufacturers,” *Materials Performance*, vol. 38 no. 9, pp. 27-29, 1999.
- [29] H. S. da Costa Mattos, J. M. L. Reis, F. C. Amorim, J. F. S. Brandao, L. D. M. Lana, V. A. Perrut, “Long-term field performance of a composite pipe repair under constant hydrostatic pressure,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 130, p. 105765, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105765>
- [30] R. Frassine, “Long-term performance of a polymer composite repair system for gas pipelines,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 33–43, 1997, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199721\)16:1<33::AID-ADV4>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199721)16:1<33::AID-ADV4>3.0.CO;2-K)
- [31] S. Kulkarni and C. Alexander, “An Operator’s Perspective in Evaluating Composite Repairs,” in *2010 8th International Pipeline Conference*, Volume 1, 2010, vol. 1, pp. 945–957.
- [32] V. S. Parameswaran, T. S. Krishnamoorthy, K. Balasubramanian, “Current research and applications of fiber reinforced concrete composites in India,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1226, pp. 1–6, 1989.
- [33] R. A. Esmael, M. A. Khan, and F. Taheri, “Assessment of the Environmental Effects on the Performance of FRP Repaired Steel Pipes Subjected to Internal Pressure,” *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 134, no. 4, Aug. 2012, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4005944>

- [34] P. S. C. Vieira, G. A. S. da Silva, B. J. Lopes, J. R. M. D’Almeida, A. H. da Silva, and D. C. T. Cardoso, “Hygrothermal aging of steel/FRP pipe repair systems: A literature review,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 201, p. 104881, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijvpv.2022.104881>
- [35] Anon, “Two new web applications help guide composite repair decision-making,” *Pipeline Gas J.*, vol. 238, no. 6, pp. 26–28, Jun. 2011.
- [36] O. Okolie, J. Latto, N. Faisal, H. Jamieson, A. Mukherji, J. Njuguna, “Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on the in-situ Performance of Thermoplastic Composite Pipes in Oil and Gas Applications,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 30, no. 1, pp. 231–306, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10066-9>
- [37] CSNRI-SGX, “SynthoGlass ® XT,” pp. 1–2, 2021.
- [38] CSNRI-SGX, “ThermoWrap ®,” 2021.
- [39] W. R. True, “Composite wrap approved for U.S. gas-pipeline repairs,” *Oil Gas J.*, vol. 93, no. 41, 1995.
- [40] Y. A. Al-Salloum, T. H. Almusallam, “Rehabilitation of the Infrastructure Using Composite Materials: Overview and Applications,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30777-3](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30777-3)
- [41] W. S. Chin, D. G. Lee, “Development of the trenchless rehabilitation process for underground pipes based on RTM,” *Compos. Struct.*, vol. 68, no. 3, pp. 267–283, May 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.03.019>
- [42] A. Moreton, “Performance of Segmental and Posttensioned Bridges in Europe,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 543–555, Dec. 2001, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2001\)6:6\(543\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(543))
- [43] D. C. Lee, V. M. Karbhari, “Rehabilitation of Large Diameter Prestressed Cylinder Concrete Pipe (PCCP) with FRP Composites — Experimental Investigation,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 31–44, Jan. 2005, doi: <https://doi.org/10.1260/1369433053749634>
- [44] X. Liu, A. Nanni, P. F. Silva, “Rehabilitation of Compression Steel Members Using FRP Pipes Filled with Non-Expansive and Expansive Light-Weight Concrete,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 129–142, Apr. 2005, doi: <https://doi.org/10.1260/1369433054038029>
- [45] S. Dong, D. Wang, E. Hui, C. Gao, H. Zhang, and Y. Tan, “An Overview of the Application of Fiber-Reinforced Cementitious Composites in Spray Repair of Drainage Pipes,” *Buildings*, vol. 13, no. 5, p. 1119, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13051119>
- [46] M. F. Köpple, S. Lauterbach, W. Wagner, “Composite repair of through-wall defects in pipework – Analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817,” *Compos. Struct.*, vol. 95, pp. 173–178, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.06.023>
- [47] J. I. Press, “Акциональность и сталальность; их соотношение в русских конструкторских причастиях на -н, -м,” *Russ. Linguist.*, vol. 15, no. 2, pp. 165–167, Jun. 1991, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02528357>
- [48] T. S. Mally, A. L. Johnston, M. Chann, R. H. Walker, M. W. Keller, “Performance of a carbon-fiber/epoxy composite for the underwater repair of pressure equipment,” *Compos. Struct.*, vol. 100, pp. 542–547, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.015>
- [49] A. A. Mohammed et al., “Effectiveness of a novel composite jacket in repairing damaged reinforced concrete structures subject to flexural loads,” *Compos. Struct.*, vol. 233, p. 111634, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111634>
- [50] R. L. Darwin, F. W. Williams, “The Development of Water Mist Fire Protection Systems for U.S. Navy Ships,” *Nav. Eng. J.*, vol. 112, no. 6, pp. 49–57, 2000, doi: <https://doi.org/10.1111/J.1559-3584.2000.TB03380.X>
- [51] H. Toutanji, S. Dempsey, “Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, no. 2, pp. 153–165, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00049-5)

[52] E. M. Knox, S. Lafferty, M. J. Cowling, S. A. Hashim, “Design guidance and structural integrity of bonded connections in GRE pipes,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 2, pp. 231–241, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00114-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00114-7)

[53] Z. A. Alsharif, “Design model of damaged steel pipes for oil and gas industry using composite materials. Part II: Modeling,” *Adv. Struct. Mater.*, vol. 54, pp. 147–156, 2014, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07383-5\\_12/FIGURES/11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07383-5_12/FIGURES/11)

[54] M. Kiani, D. Gribble, T. Mally, R. Walker, E. Locke, “Finite Element Analysis and Non-Metallic Composite Repairs, an Examination of Advanced Modeling Techniques for Safe Designs on Complex Geometries,” *Materials Performance and Welding Technologies Conference and Exhibition*, pp. 1–6, 2017.

[55] H. H. Arifin et al., “Stress distribution analysis of composite repair with Carbon Nanotubes reinforced putty for damaged steel pipeline,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 194, p. 104537, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104537>

[56] S. Kumar, F. Taheri, “Neuro-fuzzy approaches for pipeline condition assessment,” *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 22, no. 1, pp. 35–60, 2007, doi: <https://doi.org/10.1080/10589750701327858>