

Aplicación de Técnicas de Ensayos No Destructivos para la Evaluación de Materiales  
Compuestos Utilizados en la Industria del Petróleo: Estado Del Arte

Brayan Sneyder Martínez García

Cristian Hernando Ramírez Galeano

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Directora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Codirector

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi agradecimiento primero a Dios que me ha dado la vida y la sabiduría para llegar a este punto, orgulloso del trabajo realizado y de los pasos que he seguido, lleno de salud y muchos sueños más por cumplir, segundo, a mi querida alma mater UIS, quien a mi parecer es la mejor universidad de Colombia, lugar donde conocí gente maravillosa y amigos que estarán conmigo el resto de mi vida. También quiero agradecer a mis profesores, los cuales desde el principio consideré como excelentes profesionales, aquí quiero hacer énfasis especial a la profesora Ana María y al profesor Mauricio no solo por lo que aportaron en cuanto a conocimiento en mi formación profesional si no, por la paciencia, dedicación, esfuerzo y demás, que tuvieron al recibirnos como sus estudiantes en la realización de este proyecto. Por último y no menos importante a mis padres, no alcanzan adjetivos para expresar el infinito agradecimiento y admiración que les tengo, siempre hicieron todo para permitir que mi sueño se hiciera realidad, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. En general a todos gracias por esta hermosa experiencia.

**Cristian Hernando Ramírez Galeano**

A mis padres Expedito Martínez y María Eugenia García por todo el esfuerzo, apoyo y amor dedicado, en esta etapa de mi vida. A mi hermana menor Jennifer Lorena Martínez por el apoyo brindado durante este proceso y a lo largo de mi vida. A los profesores Ana María Pérez y Mauricio Rincón por su colaboración y orientación en la elaboración de este proyecto. Por último, a mis compañeros y compañeras de clases que tuve durante toda la carrera hicieron agradable cada espacio de clase.

**Brayan Sneyder Martínez García.**

## Contenido

Introducción .....	9
2. Objetivos .....	10
2.1 Objetivo General .....	10
2.2 Objetivos Específicos.....	10
3. Materiales compuestos.....	11
3.1 Componentes de los materiales compuestos.....	12
3.1.1 Matriz.....	13
3.1.1.1 Matrices poliméricas termoestables .....	14
3.1.1.2 Matrices poliméricas termoplásticas.....	15
3.1.2 Refuerzos .....	16
3.1.2.1 Compuestos reforzados por partículas .....	17
3.1.2.2 Compuestos estructurales.....	17
3.1.2.3 Compuestos reforzados con fibras .....	18
3.1.3 Interfase.....	22
3.2 Materiales compuestos en la industria del petróleo. ....	22
3.2.1 Tuberías de resinas termoendurecibles reforzadas (RTRP).....	26
3.2.2 Tuberías termoplásticas reforzadas (RTP).....	27
3.2.3 Tuberías compuestas termoplásticas (TCP).....	27
4. Defectos en materiales compuestos GFRP .....	30
4.1 Tipos de defectos .....	30
4.1.1 Defectos en las fibras .....	30
4.1.2 Defectos en la matriz y en la unión matriz - fibra.....	30

4.1.3 Defectos en el apilamiento y bobinado..... 31

4.1.4 Defectos en servicio..... 32

4.2 Defectos en RTRP..... 33

5. Ensayos no destructivos..... 37

5.1 Técnicas de ensayo no destructivo más utilizadas para materiales compuestos..... 37

5.1.1 Inspección Visual (IV)..... 37

5.1.2 Emisión Acústica (EA) ..... 38

5.1.3 Ultrasonido (UT)..... 39

5.1.4 Termografía Infrarroja (IRT)..... 42

5.1.5 Radiografía (XRI) ..... 43

5.1.6 Shearografía ..... 45

5.1.7 Holografía Óptica..... 46

5.1.8 Corrientes inducidas..... 47

5.2 END en tuberías GFRP..... 48

6. Conclusiones..... 53

Referencias Bibliográficas ..... 56

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Clasificación de las matrices en los materiales compuestos</i> .....	13
Tabla 2 <i>Presentaciones comerciales de las fibras</i> .....	20
Tabla 3 <i>Aplicaciones de los materiales compuestos</i> .....	24
Tabla 4 <i>Defectos más comunes en RTRP</i> .....	34
Tabla 5 <i>END en la detección de defectos para tuberías GFRP</i> .....	50

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Componentes de los materiales compuestos.</i> .....	12
Figura 2 <i>Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo.</i> .....	16
Figura 3 <i>Materiales compuestos por fibras continuas y discontinuas.</i> .....	19
Figura 4 <i>Botellas acumuladoras compuestas</i> .....	23
Figura 5 <i>Componentes de un tubo RTP.</i> .....	28
Figura 6 <i>Componentes de un tubo TCP.</i> .....	29
Figura 7 <i>Defectos en servicio de un material compuesto reforzado con fibras.</i> .....	33
Figura 8 <i>Circuito básico del funcionamiento de las corrientes de Eddy</i> .....	48

## Resumen

**Título:** Aplicación de Técnicas de Ensayos No Destructivos para la Evaluación de Materiales Compuestos Utilizados en la Industria del Petróleo: Estado Del Arte\*

**Autor:** Brayan Sneyder Martínez García y Cristian Hernando Ramirez Galeano\*\*

**Palabras Clave:** Materiales compuestos, ensayos no destructivos, industria petrolera.

**Descripción:** Los ensayos no destructivos en materiales compuestos han venido siendo objeto de estudio, gracias al aumento de estos tipos de materiales en las diferentes industrias, sus excelentes propiedades han llamado la atención incluso en actividades de explotación petrolera, debido a los ambientes agresivos a los que están expuestos. La morfología característica de estos materiales supuso nuevos retos de inspección a la hora de detectar y evaluar los defectos presentes que conducen a la falla del material, ya que estos y los mecanismos de rotura son más complejos que los de los materiales convencionales. Es aquí donde empiezan aparecer nuevas alternativas no destructivas para la detección y evaluación de estos “nuevos” defectos.

El desarrollo de esta monografía está basado en la investigación de las técnicas no destructivas más comunes, para la inspección de los materiales compuestos más utilizados en la industria petrolera, teniendo en cuenta sus constituyentes para este tipo de aplicaciones y los defectos que se pueden encontrar presentes. A su vez se expone la importancia de complementar algunos métodos con otros, con el fin de hacer más rigurosa la inspección y detectar la mayor cantidad de defectos posibles, esto, puesto que no existe un método general, capaz de revelar todas las discontinuidades presentes en un material específico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Directora: Ana María Pérez Ceballos. PhD. Codirector: Mauricio Rincón Ortiz. PhD

### Abstract

**Title:** Application of Non-Destructive Testing Techniques for the Evaluation of Composite Materials Used in the Petroleum Industry: State of the Art\*

**Author(s):** Brayan Sneyder Martínez García y Cristian Hernando Ramirez Galeano\*\*

**Key Words:** Composite materials, non-destructive testing, petroleum industry.

**Description:** The non-destructive testing of composite materials has been the subject of study, thanks to the increase of these materials in different industries, their excellent properties have attracted attention even in oil exploitation activities, due to the aggressive environments to which they are exposed. The characteristic morphology of these materials brought new inspection challenges when detecting and evaluating the defects that lead to the failure of the material, since these and the breakage mechanisms are more complex than those of conventional materials. It is here where new non-destructive alternatives for the detection and evaluation of these "new" defects begin to appear.

The development of this monograph is based on the investigation of the most common non-destructive techniques for the inspection of the most used composite materials in the oil industry, taking into account their constituents for this type of applications and the defects that can be found present. At the same time, the importance of complementing some methods with others is exposed, in order to make the inspection more rigorous and detect as many defects as possible, since there is no general method capable of revealing all the discontinuities present in a specific material.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering. Advisor: Ana María Pérez Ceballos. PhD. Co-Advisor: Mauricio Rincón Ortiz. PhD

## **Introducción**

Las condiciones extremas de operación a las que se ven sometidos los materiales dentro de la industria del petróleo (altas presiones y temperaturas, abrasión, erosión, corrosión, ataque por hidrógeno, etc.) suponen un gran reto de análisis para tratar de mitigar los efectos negativos que son causales de pérdidas significativas en este tipo de aplicación; es por esto, que el desarrollo de otro tipo de materiales que puedan suplir con estas actividades sin verse mayormente afectados se ha convertido en una prioridad para tratar de reducir costos y mejorar la efectividad de los procesos. Los materiales compuestos como alternativa de uso nacen de la necesidad de crear un tipo nuevo de material que sea capaz de combinar las propiedades de los materiales cerámicos, plásticos y metálicos donde las características finales son superiores a las de los materiales por separado (Hull, 1987), ya que estos constan de dos o más materiales en donde uno actúa como matriz y el otro(s) como material de refuerzo, siendo la matriz la encargada de mantener las piezas unidas y compactas en una forma, mientras que, el refuerzo es el encargado de otorgar las propiedades mecánicas necesarias para su funcionamiento.

Por lo anterior, es necesario entender los nuevos retos que implica la implementación de materiales diferentes a los convencionales, como se estudiará en este caso, ya que los materiales compuestos pueden presentar fallas o defectos durante el servicio, perjudiciales para el desarrollo normal de las actividades dentro de la industria. Por esto, el conocimiento de la evaluación de materiales compuestos usando técnicas de ensayos no destructivos es de gran importancia, puesto que este tipo de ensayo permite exponer, inclusive durante el servicio, las discontinuidades y posibles defectos sin afectar las propiedades ni la integridad de los componentes evaluados, dando lugar a planes de reparación o reemplazo de los componentes defectuosos evitando de esta forma posibles fallas catastróficas durante el servicio.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Establecer el uso y la aplicación de técnicas no destructivas para la evaluación de los materiales compuestos más utilizados en la industria del petróleo, a partir de una revisión bibliográfica.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Identificar cuáles son los materiales compuestos más utilizados actualmente para la fabricación de componentes en la industria petrolera.

Determinar cuáles son las discontinuidades o defectos más frecuentes de los materiales compuestos utilizados en la industria petrolera.

Exponer la relación existente entre las características de los materiales compuestos, los defectos encontrados y la aplicación de los ensayos no destructivos para su inspección.

### 3. Materiales compuestos

Los materiales compuestos actualmente han tomado gran importancia dentro de las industrias ya que suponen una ventaja en cuanto a las propiedades con respecto a otros tipos de materiales utilizados convencionalmente. Esto se debe a que un material compuesto está formado por dos o más fases distintas (matriz y refuerzo), cuya combinación proporciona diferentes y mejores propiedades a las de sus constituyentes (Callister & Rethwisch, 2011). Se pueden diseñar materiales compuestos para aplicaciones específicas y con propiedades afines a estas, mediante la selección adecuada de sus componentes, es decir, el tipo de matriz, refuerzo, distribución, grado de cristalinidad, estructura, etc. (Chung, 2010). Así mismo existen una serie de materiales compuestos de origen natural como es el caso de la madera, la cual consiste en fibras de celulosa fuertes y flexibles, unidas y rodeadas por un material más rígido llamado lignina, otro ejemplo es el hueso, el cual es resultado de la combinación de un armazón proteico de colágeno más apatita (Stupenengo, 2011).

En los últimos años los materiales compuestos, plásticos y cerámicos han dominado los mercados internacionales, debido a sus propiedades mecánicas, químicas y a su baja densidad en comparación con los materiales convencionales (Dávila et al., 2011). Aunque el estudio y diseño de estos materiales es relativamente nuevo, el concepto de mejorar un material a partir de un refuerzo de fibra es bastante antiguo, como por ejemplo el hombre en los inicios de la civilización cuando utilizaba el adobe que consistía en la mezcla de una fibra de paja en una matriz de arcilla, la cual se utilizaba para la construcción de sus viviendas (Besednjak, 2009). Pero no fue hasta el siglo XIX cuando se emplearon barras de hierro para reforzar las mamposterías impulsando el desarrollo del hormigón armado, desde entonces se empezaron a investigar y desarrollar los

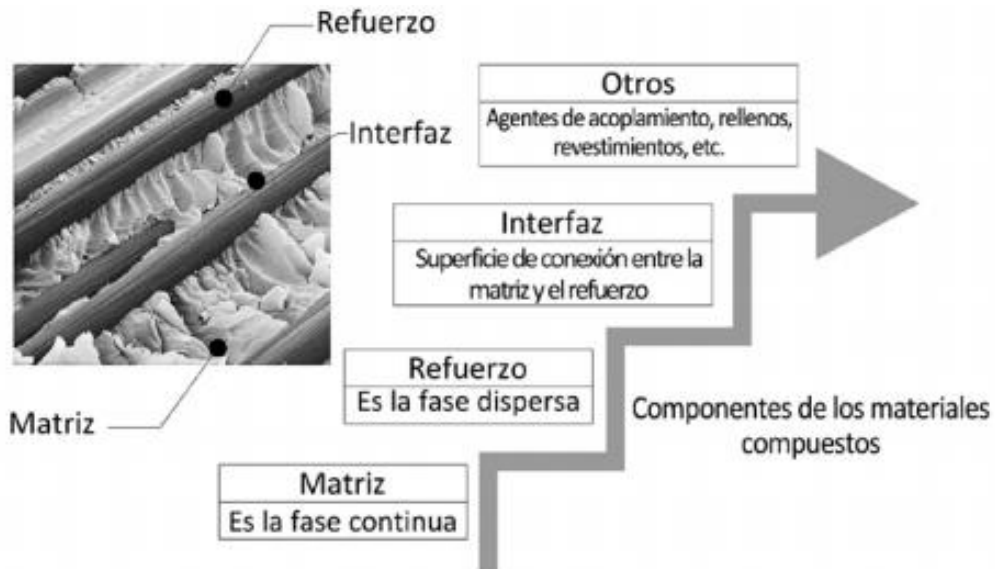
materiales compuestos que se conocen hoy en día, teniendo aplicaciones en sectores aeronáuticos, automotriz, artículos deportivos, biomédicos, la industria petrolera, etc. (Brigante, 2014).

En conclusión y para el presente documento se entenderá como un compuesto a aquel material multifase que se hace artificialmente a diferencia de uno que ocurre o se forma naturalmente, además las fases constituyentes deberán ser químicamente diferentes y estar separadas por una interfaz distinta (Callister & Rethwisch, 2011).

### 3.1 Componentes de los materiales compuestos

Para entender las razones de las características y propiedades de los materiales compuestos es conveniente conocer la relación existente entre sus componentes. Como se puede observar en la **figura 1**, los materiales compuestos están formados por una matriz y un refuerzo, mientras que la superficie de contacto entre estas dos se denomina interfaz. En algunos casos se adicionan agentes de acoplamiento, rellenos y revestimientos, con el fin de mejorar esta superficie y las propiedades del material (Dávila et al., 2011).

**Figura 1** Componentes de los materiales compuestos.



*Nota.* Tomado de (Dávila et al., 2011).

**3.1.1 Matriz**

Consiste en una fase continua en la que el material de refuerzo queda embebido, entre sus funciones básicas se destacan las siguientes: define las propiedades físicas y químicas, transmite las cargas al refuerzo, protege y brinda cohesión a la pieza, además de que da la forma estructural y determina la calidad de la superficie, también es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, y de la resistencia a temperaturas elevadas del material compuesto (Stupenengo, 2011).

Las matrices de los materiales compuestos se pueden clasificar, según su naturaleza, en orgánicas o inorgánicas como se muestra en la **Tabla 1**. A su vez, las matrices orgánicas se pueden dividir en termoestables y termoplásticas las cuales son el objetivo principal de estudio para este caso, debido a que son ampliamente utilizadas para el diseño y desarrollo de materiales en la industria petrolera.

**Tabla 1** Clasificación de las matrices en los materiales compuestos.

Inorgánicas	Cemento, geopolímeros, yeso, matrices metálicas, matrices cerámicas	
Orgánicas	Termoestables	Epoxi, vinilester, poliéster, fenólica, esteres cianato, bismaleimidias, poliimidias, polieteramida
	Termoplásticas	Policloruro de vinilo (PVC) copolímeros de estireno (ABS, SAN), polietileno (PE), polipropileno (PP), policarbonato (PC), polimetacrilato de metilo (PMMA), acetato, poliestireno (PS), polioximetileno (POM), polieterimida, PET, nylon, poliamida, PEEK, PAI, PAS.

*Nota.* Adaptado de (Miravete, 2012)

Por otro lado, los materiales compuestos se pueden clasificar según el tipo de matriz: materiales compuestos de matriz metálica, cerámica o polimérica. Las matrices metálicas más utilizadas son de aluminio, magnesio, cobre y níquel, donde comúnmente son reforzadas por fibras cerámicas y metálicas ya que ofrecen alta resistencia mecánica, elevada rigidez y se pueden utilizar a altas temperaturas de operación (Davim, 2012). Ahora, los materiales compuestos de matriz cerámica se destacan por presentar buenas propiedades a altas temperaturas, además de ser menos densos en comparación con los de matriz metálica, también por lo general, tienden a utilizarse fibras cerámicas como refuerzo ya que de esta manera logran obtener una mejor resistencia y tenacidad a la fractura en comparación con los cerámicos convencionales (Chung, 2010). Por último, los compuestos de matriz polimérica son los más utilizados en diferentes aplicaciones debido a su baja densidad (bajo peso), excelentes propiedades a temperatura ambiente, facilidad de conformado y costos de producción relativamente bajos en comparación con las matrices anteriormente mencionadas, además tienden a ser reforzadas por fibras naturales o sintéticas (Dávila et al., 2011). Las matrices poliméricas se pueden dividir en tres grupos: termoestables, termoplásticas y elastoméricas. Pero como se mencionó anteriormente las más utilizadas son las termoestables y las termoplásticas.

### **3.1.1.1 Matrices poliméricas termoestables**

También llamadas termoendurecibles, se destacan o caracterizan por ser infusibles, lo que implica que al aumentar la temperatura no pasan de estado sólido a líquido, esto debido a que una vez curada contienen una red molecular de enlaces altamente cruzados. Estas matrices son duras, quebradizas e insolubles, pero pueden ser atacadas por solventes y algunos agentes químicos, especialmente en condiciones de alta temperatura, provocando malformaciones y cambios en sus propiedades, además son siempre amorfas y diferenciables en su temperatura de transición vítrea

y en la resistencia al ataque por solventes. En cuanto a la fabricación, normalmente se obtienen a partir de sustancias líquidas o semisólidas que se endurecen irreversiblemente debido a una reacción química conocida como policondensación, polimerización o curado (Miravete, 2012; van der Woude & Lawton, 2010). Algunas de las propiedades que confiere la utilización de estas matrices termoestables sobre los materiales compuestos son: alta rigidez, bajo peso, alta estabilidad dimensional y térmica, buena resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga y buenas propiedades como aislante tanto térmico como eléctrico.

### **3.1.1.2 Matrices poliméricas termoplásticas**

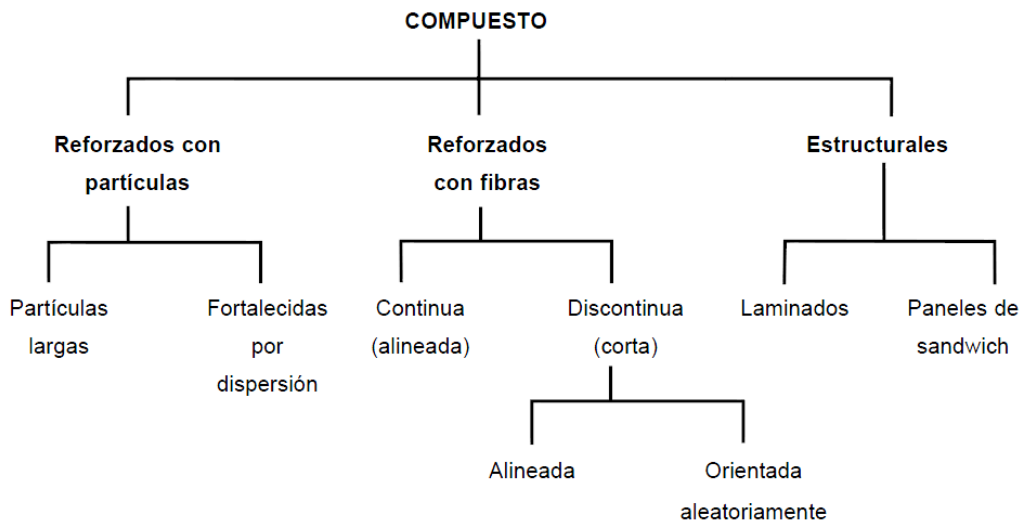
Son polímeros formados por moléculas orgánicas, unidas por enlaces lineales o ramificados sencillos, se caracterizan por su gran facilidad para fluir por un molde y conseguir la forma deseada al ser calentados (fundidos) a determinadas temperaturas, son sólidas a temperatura ambiente, además, no sufren un cambio químico por lo que el ciclo de fundición-solidificación se puede repetir indefinidamente (Besednjak, 2009). Las resinas termoplásticas pueden ser amorfas o parcialmente cristalinas, estas últimas suelen tener una mayor temperatura de distorsión y una mayor resistencia a los solventes (Miravete, 2012). Algunos ejemplos de matrices termoplásticas son el polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) entre otros derivados del petróleo, así como también algunos termoplásticos de origen natural, tales como el ácido poliláctico (PLA) o el polihidroxibutirato (PHB) (Dávila et al., 2011). Algunas de las ventajas más importantes que confiere la utilización de las resinas termoplásticas son: buenas propiedades como aislante térmico y eléctrico, alta relación resistencia/densidad, buena resistencia a los ácidos, disolventes y álcalis, moldeabilidad, procesos de fabricación relativamente sencillos, baja absorción de humedad y fácil reciclado de las resinas.

**3.1.2 Refuerzos**

En un material compuesto, el objetivo principal de los refuerzos es el de mejorar las características de las matrices, ya que estos son los encargados de soportar las cargas, además de proporcionar una serie de propiedades que pueden ser: conductividad o aislamiento eléctrico, estabilidad térmica, propiedades estructurales como la resistencia y la rigidez, entre otras (Dávila et al., 2011). Los compuestos más comunes son aquellos que utilizan fibras como refuerzo unidas por un aglutinante, sin embargo, también se pueden utilizar partículas o escamas, pero no son tan eficaces como estas. Al mismo tiempo se puede reforzar un material de acuerdo con la elaboración de su estructura, donde por ejemplo diferentes materiales se superponen para formar un producto mejorado, como es el caso de los materiales tipo sándwich, donde un material de núcleo ligero se inserta entre dos caras de materiales rígidos y resistentes (Barbero, 2010)

Según Callister & Rethwisch (2011), se pueden clasificar los materiales compuestos según el tipo de refuerzo como se puede observar en la **Figura 2**. Esta clasificación presenta tres (3) divisiones principales: materiales compuestos reforzados por partículas, reforzados con fibras y compuestos estructurales.

**Figura 2** Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo.



*Nota.* Mapa conceptual de la clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo, tomado de (Callister & Rethwisch, 2011).

### **3.1.2.1 Compuestos reforzados por partículas**

En cuanto a este tipo de refuerzo se pueden presentar como partículas de tamaño grande o partículas consolidadas por dispersión. Para compuestos formados por partículas de tamaño grande, este tipo de refuerzo no es eficiente desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, sin embargo, se utilizan para mantener el buen comportamiento de las propiedades a altas temperaturas y a largos periodos de tiempo, además de elevar la dureza e incrementar la resistencia a la compresión, así mismo, si las partículas son lo suficientemente suaves se puede mejorar la lubricidad y resistencia al desgaste (Larson, 2011). Por otra parte, es más comúnmente utilizado para mejorar otras propiedades o para incorporar características multifuncionales en un material, como por ejemplo el concreto, el cual es un tipo de compuesto formado por cemento (matriz) más arena y grava (partículas), otro ejemplo son las maderas plásticas, el cual corresponde a un material compuesto de matriz polimérica reforzada con partículas (polvo) de madera, utilizado en aplicaciones arquitectónicas y estructurales debido a su buena resistencia mecánica, menor densidad y mayor durabilidad que la madera común. Para el caso de los compuestos reforzados por partículas consolidadas por dispersión, se caracterizan por tener diámetros entre 10 y 100 nm, y se destacan o son más utilizadas para impedir o dificultar el movimiento de las dislocaciones en las matrices metálicas (Dávila et al., 2011).

### **3.1.2.2 Compuestos estructurales**

Son materiales compuestos en donde sus propiedades no dependen de los constituyentes sino de la geometría y diseño de los elementos estructurales (Moral & Nogueira, 2007). Las estructuras más utilizadas actualmente para fabricación de esta clase de compuestos son los

laminares y los paneles tipo sándwich. Un compuesto laminar es aquel donde sus constituyentes poseen una dirección preferencial de alta resistencia. Las capas son consolidadas mediante un adhesivo o algún otro tipo de unión, de tal manera que la orientación de las fibras varía una de otra, dando lugar así a una resistencia mejorada en dos dimensiones (Miravete, 2012).

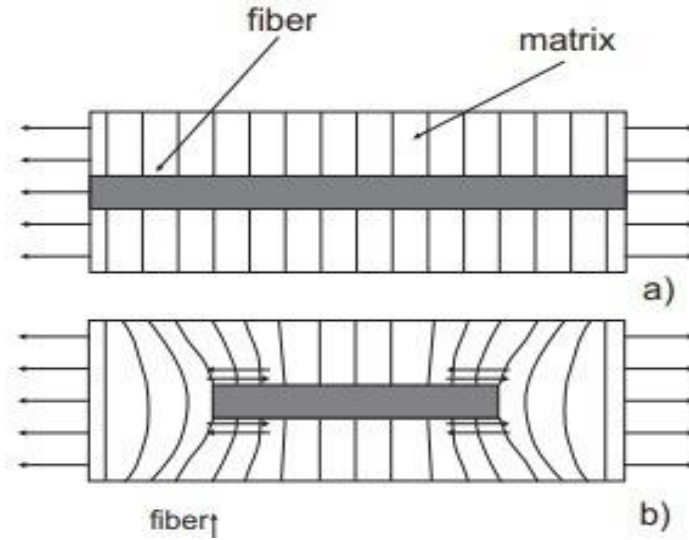
Los materiales compuestos tipo sándwich, se caracterizan por poseer dos caras externas fuertes, encargadas de soportar las cargas de flexión (tensión y compresión) separadas por un material menos denso (núcleo) con la capacidad de resistir los esfuerzos de corte (Moral & Nogueira, 2007). Para este tipo de materiales el aumento del espesor del núcleo supone una mejora significativa en la relación densidad-propiedades del material, siendo apetecido por la industria aeronáutica por esta característica, además de poseer buenas propiedades estructurales, eléctricas, de aislamiento y/o de absorción de energía (Campbell, 2010).

### **3.1.2.3 Compuestos reforzados con fibras**

Consiste en el material de refuerzo más utilizado actualmente en las industrias debido a que presentan las mejores prestaciones mecánicas, son las encargadas de proveer al material de resistencia mecánica, rigidez y dureza, además de otorgar sus principales propiedades. Para este tipo de refuerzos se pueden presentar las fibras de dos formas, continuas (a) o discontinuas (b) como se puede observar en la **Figura 3**. En los compuestos reforzados por fibras continuas o largas, la fibra atraviesa completamente la matriz del material, donde la carga es transferida por esta a lo largo de su orientación, aquí el proceso de fabricación es más costoso y lento en comparación con las fibras discontinuas. Por otro lado, estas últimas son fibras de menor tamaño obtenidas de cortar las fibras continuas, también pueden ser producidas directamente con el fin de ahorrar costos. Para estas, el mecanismo de transferencia de carga es diferente a los refuerzos de fibras continuas, ya que la calidad de la interfase fibra-matriz juega un papel importante debido a que esta carga se

transfiere de fibra a fibra a través de la matriz, por lo que el efecto del esfuerzo resultante será menor (Barbero, 2010).

**Figura 3** *Materiales compuestos por fibras continuas y discontinuas.*



*Nota.* a) material compuesto reforzado con fibras continuas, b) material compuesto reforzado con fibras discontinuas, tomado de (Barbero, 2010).

Actualmente las fibras se pueden encontrar de diversas maneras como se observa en la **Tabla 2** dependiendo de la necesidad de aplicación, las más utilizadas son: fibras cortas, mats, tejidos, mechas e hilados.

**Tabla 2** Presentaciones comerciales de las fibras.

<b>Presentaciones de las fibras</b>	<b>Definición</b>	<b>Ilustración</b>
Fibras cortas	Estas fibras son filamentos cortados o reducidos a pequeñas longitudes dependiendo de la aplicación.	
Mats	Los mats son materiales no tejidos, donde las hebras de fibras son cortadas y distribuidas uniformemente al azar en un plano horizontal, unidas con algún tipo de aglomerante. Existen tres tipos de presentaciones: mats de superficie, mats de hilos cortos y mats de hilos continuos.	
Tejidos	Los tejidos son una serie de mechas tejidas en formas distintas, con la finalidad de que las fibras estén orientadas en la misma dirección que las cargas aplicadas al material. Normalmente se utilizan en procesos de laminado manual.	
Mechas	Están constituidas por un conjunto de filamentos paralelos, comercialmente se encuentran en rollos y se utilizan en procesos de bobinado de filamentos.	
Hilados	Los hilados de fibras tienen una similitud con las mechas, la diferencia es que en los hilados se incorpora un giro en los filamentos.	

*Nota.* Presentaciones de fibras más comúnmente utilizadas dentro de las industrias. adaptado de: (Direct Industry, n.d.; Made-in-china, n.d.; Owens Corning, n.d.; Salazar & Guillermo, 2011; Viralsurf, n.d.; YuNiu, n.d.)

Una clasificación general, aceptada para los refuerzos de fibras en los materiales compuestos modernos es la señalada por Miravete 2012, el cual las divide en tres categorías diferentes: fibras de carbono, fibras inorgánicas y fibras poliméricas. Dentro de esta clasificación las fibras más utilizadas son las fibras de carbono, fibras de aramida y fibras de vidrio.

**Fibras de carbono y grafito:** utilizadas para la formación de compuestos de alto rendimiento debido a su alta gama de propiedades como, por ejemplo: alto módulo de Young, excelentes propiedades a la tracción y a la compresión, resistencia a la fatiga, además de que no se corroe, entre otras (Campbell, 2010).

**Fibras de aramidas:** Pertenecen a la familia del nylon, pueden ser orgánicas o sintéticas, se destacan por su alta resistencia y rigidez, su buena estabilidad mecánica, alto módulo elástico y gran tenacidad, sin embargo, la fuerza y rigidez se encuentran en un estado intermedio entre las de vidrio y las de carbono. Por otro lado, son principalmente comercializadas como kevlar (Campbell, 2010; Miravete, 2012)

**Fibras de vidrio:** Debido a su excelente relación costo propiedades es el refuerzo más utilizado actualmente para aplicaciones industriales. Está formada principalmente por sílice que se combina con diversos óxidos por medio de fusión pasando por una hilera y sometándose a una operación de estirado. Se destaca por ser aislante eléctrico y térmico, por poseer buena resistencia mecánica, alta adherencia entre la fibra y la matriz, y buena compatibilidad con las materias orgánicas, entre otras. Existen varios tipos de fibras de vidrio entre las que se destacan las siguientes por sus propiedades: Vidrio E, Vidrio S y el Cuarzo (Campbell, 2010; Miravete, 2012).

### **3.1.3 Interfase**

Conocida como la superficie entre la matriz y el refuerzo, debe garantizar la unión entre los constituyentes para un correcto funcionamiento. Para los materiales compuestos reforzados por fibras, el papel de la interfaz es más importante ya que de esta unión dependerán las propiedades mecánicas, si la unión es buena la carga aplicada sobre el material se transmitirá desde la matriz hacia los refuerzos, pero si no lo es, la fibra no cumplirá su papel de refuerzo y tenderá a salirse de la matriz. Por otro lado, la unión de los constituyentes del material compuesto puede ser de cuatro tipos dependiendo del tipo de refuerzo y matriz: unión mecánica, unión electrostática, unión química y unión mediante interdifusión (Dávila et al., 2011).

### **3.2 Materiales compuestos en la industria del petróleo.**

Los entornos agresivos para la producción de petróleo y gas han afectado desde su comienzo a esta industria, algunos problemas como la corrosión, erosión, ataque por hidrógeno, altas densidades de las estructuras, dificultades en el transporte e instalación, etc. han incentivado a la utilización de nuevos materiales, diferentes a los convencionales o comúnmente utilizados, que puedan presentar una solución a estos problemas, es el caso de los materiales compuestos, ya que debido a sus excelentes propiedades y gran desarrollo se han convertido en una gran alternativa de cambio estructural de algunas aplicaciones comunes dentro de la industria petrolera, sobre todo en operaciones en altamar (*offshore*).

Los materiales compuestos se introdujeron ampliamente en diferentes aplicaciones después de la segunda guerra mundial al ser utilizados para solventar los problemas de corrosión y desgaste dentro de los materiales convencionales como el acero, aluminio y la madera. Superar estos problemas fue el mayor atractivo que llevó al desarrollo y utilización de este tipo de materiales para satisfacer la demanda creciente del sector marino incluyendo la industria petrolera, la cual los

introdujo desde 1948 en sus plataformas petrolíferas a través de la incorporación del compuesto polimérico reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés), para aplicaciones secundarias como rejillas y paneles para pisos y paredes dentro de la estructura marina (Correia, 2015; Rubino, Nisticò, Tucci, & Carlone, 2020). En 1990 la compañía Lincoln Composites, fabricó unas botellas acumuladoras compuestas de 50 galones como se observa en la **Figura 4** (CABS, por sus siglas en inglés) para la plataforma MARS TLP en el golfo de México. Consisten en un recipiente a presión de carcasa híbrida de epoxi reforzado con fibra de carbono y vidrio, enrollado con filamentos sobre un polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), ésta forma parte del sistema de tensión del elevador (*Risers*) el cual consta de un anillo tensor y una estructura con cuatro u ocho cilindros hidráulicos y tienen la función de soportar y permitir el movimiento de este (Composites World, 2002).

**Figura 4** Botellas acumuladoras compuestas



*Nota.* Botellas acumuladoras fabricadas en materiales compuestos en la plataforma Mars TLP en el Golfo de México, tomado de (Composites World, 2002)

Un avance importante para el desarrollo e implementación de este tipo de materiales se produjo gracias a los pequeños yacimientos con tasas “pequeñas” de producción de petróleo y gas en altamar, donde no se justificaba la construcción de grandes y costosas plataformas, la manera actual y rentable de aprovechar estos yacimientos es a través de las plataformas no tripuladas, estudiadas desde 1995 por una alianza entre DuPont y Conoco Inc. Estas plataformas fueron diseñadas mayoritariamente con materiales compuestos debido a los beneficios que significan en cuanto a la reducción de peso y las necesidades de mantenimiento periódico de las instalaciones (Williams, 1999). Como se puede observar en la **Tabla 3**, estas piezas, equipos y partes estructurales son unos ejemplos de algunas de las partes remplazadas y fabricadas con materiales compuestos. Para el caso de las rejillas de acero galvanizado fueron remplazadas por rejillas de resinas fenólicas extruidas, presentando un buen rendimiento a la corrosión y al fuego como se requería, además de permitir un ahorro en peso de más del 50% (Melot, 2018).

**Tabla 3** *Aplicaciones de los materiales compuestos*

<b>Materiales compuestos en aplicaciones offshore</b>	
<b>Ubicación</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Plataforma a lecho marino</b>	Amarres, Cuerda de amarre, Riser
<b>Instalaciones de procesamiento</b>	Contenedores, Separadores, bombas
<b>Estructura secundaria de la parte superior</b>	Rejillas, Barandillas
<b>Estructuras de alojamiento y protección</b>	Alojamientos, Muros
<b>Tuberías de la parte superior</b>	Aguas residuales, Aguas contra incendios, Agua de mar, Agua potable, Desagües
<b>Tanques y recipientes a presión</b>	Recipientes de almacenamiento, Tanques, Acumuladores de presión

<b>Estructura de la plataforma</b>	Cubierta de mando, Cubierta principal, Casco, Columnas, Pontones
<b>Fondo de pozo</b>	Tubería enrollada, Tubería de perforación, Herramientas, Sensores
<b>Submarino</b>	Umbilical, Líneas de inyección, Líneas de flujo, Protección
<b>Aplicaciones en buques</b>	Tuberías, Contenedores, Paredes, Mástiles, Puertas, Bombas

*Nota.* Algunas de las aplicaciones de los materiales compuestos en las plataformas petrolíferas, Adaptado de (Williams, 1999).

Como se pudo observar en la tabla anterior, existe dentro de las plataformas petrolíferas gran potencial de aplicación de los materiales compuestos, sin embargo, también pueden ser utilizados para reparaciones estructurales, como el caso de 1995 por la plataforma Mobil Beryl B. donde fue el primer uso importante de los compuestos para el refuerzo de estructuras a través de la utilización de fibras de carbono de alto y ultra alto módulo, para aumentar el espesor de un muro de 8 metros de profundidad por 40 metros de largo, el método utilizado para el desarrollo de esta actividad fue el de moldeo por transferencia de resina in situ (Frieze & Barnes, 1996). En el 2006 debido a la importancia de regular las reparaciones y refuerzos estructurales con materiales compuestos, se creó una práctica recomendada por el proyecto DNV con el fin de garantizar la confiabilidad para este tipo de reparaciones relativamente innovadoras. Después de la creación de esta práctica se documentó la realización de dos ensayos exitosos, el primero fue en Norne FPSO en el mar de Noruega utilizado para la reparación de grietas y el segundo en la reparación de una cubierta corroída en el ABU Cluster FSO en el mar de la China meridional (Meniconi, Porciuncula, McGeorge, & Pedersen, 2010).

Uno de los casos particulares con mayor estudio y desarrollo dentro de los materiales compuestos es la fabricación de tuberías, donde según la combinación de las diferentes materias primas se logra obtener varios tipos con diferentes características y propiedades donde se destacan los siguientes: Tuberías de resinas termoendurecibles reforzadas (RTRP, por sus siglas en inglés), tuberías termoplásticas reforzadas (RTP, por sus siglas en inglés) y tuberías compuestas termoplásticas (TCP, por sus siglas en inglés) (Badeghaish, Noui-Mehidi, & Salazar, 2019).

En cuanto al enfoque principal de este documento, estará orientado hacia las tuberías compuestas de plástico reforzado con fibra de vidrio (RTRP) basados en la norma ISO 14692-4, puesto como se mencionaba anteriormente es la que más tiempo lleva en el mercado y por lo tanto la que más investigación y estandarización tiene.

### ***3.2.1 Tuberías de resinas termoendurecibles reforzadas (RTRP)***

Se han convertido en la principal competencia de las tuberías tradicionales de acero, para las líneas de flujo de procesos de fábricas y transporte de agua, debido a sus excelentes propiedades químicas que la vuelven resistente a la corrosión y al ataque químico, permitiéndole mantener una superficie interna lisa por periodos más prolongados de tiempo en comparación con sus competidoras, evitando así la pérdida considerable de carga en el transporte de los fluidos. Entre sus propiedades mecánicas se destacan alta resistencia específica, peso ligero, módulo de elasticidad relativamente bajo, buena resistencia a las vibraciones y a golpes internos, lo que la convierten en una alternativa de cambio suficiente capaz de suplir las necesidades y optimizar los procesos al disminuir costos de mantenimiento, transporte, instalación y reparación. Por otro lado, este tipo de tuberías están fabricadas con GFRP y se pueden clasificar en tres grupos principales según el componente de la matriz en: poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP, por sus siglas

en inglés), viniléster con fibra de vidrio (GRV, por sus siglas en inglés) y epoxi reforzado con fibra de vidrio (GRE, por sus siglas en inglés)(Rafiee, 2016).

En cuanto a los anteriores tipos de materiales mencionados, el más utilizado dentro de la industria de los hidrocarburos es el GRE tanto para tuberías como para revestimiento, este último, consiste en una capa externa de material compuesto que se deposita sobre tubos de acero con conexiones estándar para yacimientos petrolíferos. Esta práctica de revestimiento de tuberías de acero ha ganado una gran aceptación con el tiempo, ya que gracias al avance tecnológico los costos de implementación se han reducido lo suficiente para que sea viable su utilización, además, estos materiales se han venido fabricando para soportar entornos cada vez más severos, de temperatura y presión en comparación con otros tipos de recubrimientos. (Ross, 2001)

### ***3.2.2 Tuberías termoplásticas reforzadas (RTP)***

Son tubos compuestos resistentes a la corrosión, livianos, y fáciles de instalar a un costo relativamente bajo, fabricados de tres capas como se observa en la **Figura 5**, la capa intermedia es un material compuesto fabricado de cintas reforzadas, las cuales se entrelazan en el tubo con un ángulo de enrollamiento helicoidal, utilizan como matriz un termoplástico generalmente HDPE, y son reforzadas con fibras continuas de alta resistencia como vidrio, carbono o aramida. En cuanto a la capa externa e interna, generalmente corresponden a materiales termoplásticos, en donde el más utilizado es el HDPE y su principal función es contener al líquido y proporcionar una protección externa (Song, Yao, Chen, & Wang, 2019).

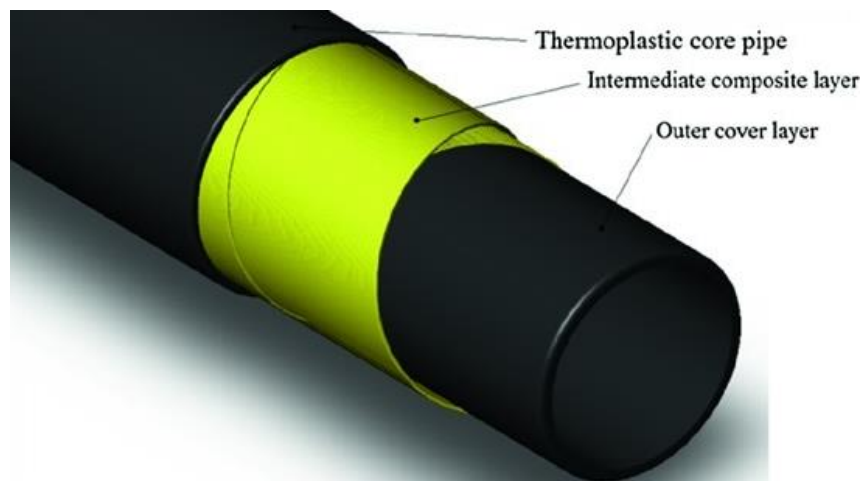
### ***3.2.3 Tuberías compuestas termoplásticas (TCP)***

Son tubos termoplásticos enrollables adheridos mediante un proceso de fabricación por consolidación in situ (**Figura 6**), que funde todas capas para formar una pared sólida fuerte y rígida a diferencia de los tubos RTP, lo que le permite tener un mayor rendimiento a pesar de que estén

fabricadas en algunos casos con los mismos materiales. Consisten en la nueva generación de tuberías para industria petrolera, en donde se destaca el gran potencial de aplicaciones como lo son las líneas descendentes, *jumpers*, *risers*, etc. además de su disponibilidad en largas longitudes y los eficientes métodos de instalación de enrollamiento, convirtiéndolas en una alternativa rentable para este campo. Debido a lo anterior y al aumento significativo en la utilización de este tipo de tuberías para diversas aplicaciones, existe una práctica recomendada que abarca todos los requisitos de diseño y cualificación para el sector *offshore* (DNV GL RP-F119).

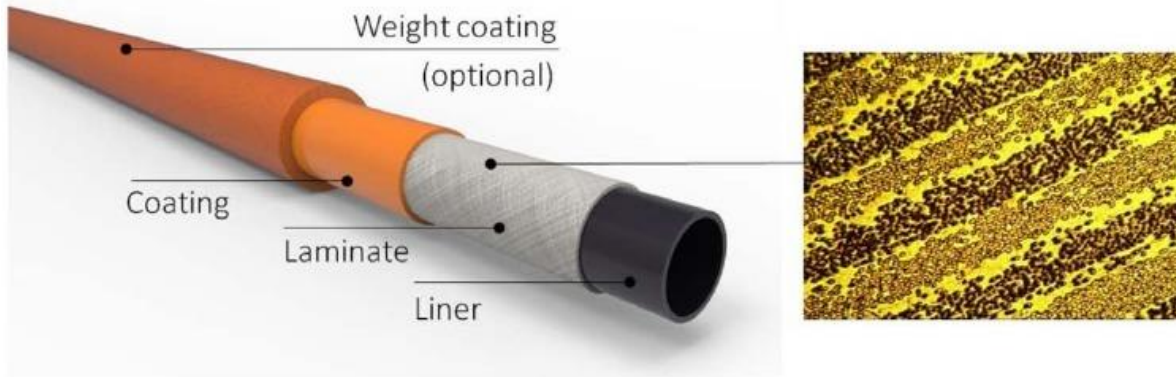
En cuanto a las propiedades y características, dependen específicamente del diseño y la selección de los materiales para la necesidad específica de cada proyecto, donde se destacan las siguientes tres combinaciones: HDPE reforzado con fibra de vidrio, PA12 (poliamida o nylon) reforzado con fibras de carbono y PVDF (fluoruro de polivinilideno) reforzado con fibras de carbono. La primera combinación se destaca por su baja permeabilidad y alta resistencia química, el segundo caso por su baja permeabilidad además de las altas presiones de operación en servicio que van hasta los 10 ksi y para la última, las altas temperaturas que puede soportar, llegando a los 121°C (Spruijt, 2018).

**Figura 5** Componentes de un tubo RTP.



*Nota.* Tubo RTP en donde los cilindros negros corresponde a las capas internas y externas fabricadas de materiales termoplásticos, mientras que el material intermedio de color verde corresponde a las cintas de material compuesto. Tomado de (Song et al., 2019).

**Figura 6** Componentes de un tubo TCP.



*Nota.* Capas de materiales que componen un tubo TCP donde el *coating* y el *liner* están fabricados del mismo material termoplástico y el *laminate* es un material compuesto. Tomado de (Spruijt, 2018).

## **4. Defectos en materiales compuestos GFRP**

### **4.1 Tipos de defectos**

La naturaleza de los defectos dentro de los materiales compuestos puede clasificarse de diferentes maneras, sin embargo, para Adams & Cawley, 1988. Es posible agruparlos en 4 secciones diferentes: defectos en las fibras, defectos en la unión matriz – fibra, defectos de apilamiento o bobinado y defectos en servicio. A continuación, se hará una breve descripción de cada tipo.

#### ***4.1.1 Defectos en las fibras***

Para este caso, se debe tener especial cuidado con el control de calidad puesto que en algunas ocasiones se ha evidenciado la utilización de fibras incorrectas durante el laminado, ocasionando así un cambio sensible en las propiedades, incumpliendo con las esperadas dentro del diseño original, también es posible que algunas fibras presenten torceduras en el momento de fabricación, disminuyendo la resistencia a la tracción y sobre todo a la compresión del material, ocasionando fallas prematuras (Adams & Cawley, 1988).

#### ***4.1.2 Defectos en la matriz y en la unión matriz - fibra***

Los problemas dentro de la matriz pueden empezar desde no realizar un buen diseño, de tal modo que no funcione correctamente en el entorno requerido. Por otro lado, un mal control en las condiciones de fabricación, una alta contaminación y un entorno húmedo en los procesos puede provocar en algunos casos sobre envejecimiento, mal curado, piezas contaminadas etc. dando como resultado una matriz con pobres propiedades mecánicas (Adams & Cawley, 1988). Otros factores para tener en cuenta debido a los problemas con la humedad y durante la fabricación del preimpregnado durante el ciclo de calentamiento es la formación de vacíos o poros, producto del encapsulamiento de burbujas de vapor de agua y diluyentes asociados dentro de las capas de la

matriz, actuando como concentradores de esfuerzos.(Greene, 2014) Por último, una mala o escasa adhesión entre la fibra-matriz puede conllevar a una baja resistencia del material compuesto, lo que produce un rápido deterioro en condiciones de fatiga y en entornos agresivos (Adams & Cawley, 1988).

#### ***4.1.3 Defectos en el apilamiento y bobinado***

Los defectos que se pueden presentar durante el bobinado del filamento o en la preparación de la inyección de la resina, se deben a una mala orientación de las fibras o a un ángulo incorrecto, lo que ocasiona que las fibras no estén en el lugar correcto para soportar las cargas de diseño. Por otro lado, estos defectos o errores son más sencillos de controlar cuando se utilizan procesos cada vez más automatizados y se involucra menos la participación humana. Para el caso del apilado se puede presentar un desalineamiento de las fibras resultado de la eliminación del exceso de resina líquida ya que estas son arrastradas en la dirección del flujo (Adams & Cawley, 1988). Otro tipo de defecto que puede presentarse ocurre cuando quedan zonas ricas en resina, lo que disminuye la capacidad del material de detener las grietas, además de convertirse en zonas concentradoras de esfuerzos (Greene, 2014). Los problemas más graves durante el bobinado se dan en la distribución de las fibras como los vacíos o poros, los cuales son concentradores de esfuerzos producto de una capa irregular o cuando las imperfecciones provocan desniveles, también es posible omitir una capa en el laminado si hay dos capas idénticamente orientadas juntas lo que ocasiona que el compuesto sea mucho más débil y flexible. Adicional, otro problema es cuando el laminado no logra quedar simétrico debido a la orientación incorrecta de una capa, esto puede causar un acoplamiento entre diferentes cargas. Por último, se tiene que durante la superposición de láminas se pueden presentar arrugas causadas por la eliminación de las burbujas de aire, también, cuando

deben unirse a tope dos láminas, siendo común la unión imperfecta lo que da lugar a discontinuidades en los bordes de estas (Adams & Cawley, 1988).

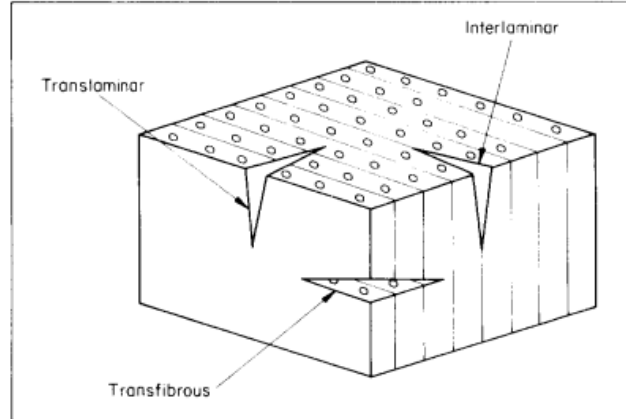
#### ***4.1.4 Defectos en servicio***

Además de los esfuerzos normales presentes en servicio se deben tener en cuenta las condiciones ambientales y de operación, como es el caso de la exposición a altas temperaturas, humedad, presiones y diversos productos químicos a las que se encuentra constantemente sometido el material compuesto, el resultado de todas estas condiciones a las que está sometido puede provocar los siguientes defectos representados en la **Figura 7**.

En primer lugar, se tienen las grietas translaminares, las cuales se refieren a la separación del material o a los agrietamientos que se producen en la matriz (resina) causadas por tensiones generadas por cargas mecánicas o térmicas y se caracterizan porque no son tan comunes, luego se tiene las grietas interlaminares, las cuales a diferencia de la anterior tienden a ser más comunes en servicio, estas a su vez son llamadas delaminaciones y se dan ya que el plano entre dos láminas suele ser débil debido al atrapamiento de aire durante el apilamiento y el exceso de resina. Por último, se tienen las grietas transfibras es decir la rotura de las fibras producto de las cargas de compresión que producen un amplio pandeo local, ocasionando así que el compuesto falle (Greene, 2014).

Por otro lado, el agua y otros líquidos producto de los factores medioambientales y operacionales, pueden penetrar y degradar la matriz de los materiales compuestos, además de provocar la pérdida de unión entre la fibra y la matriz (Adams & Cawley, 1988).

**Figura 7** Defectos en servicio de un material compuesto reforzado con fibras.



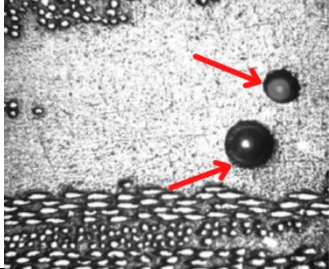

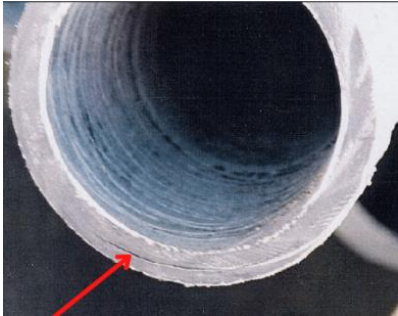
*Nota.* Defectos más comunes de un material unidireccional compuesto en servicio, tomado de (Adams & Cawley, 1988).

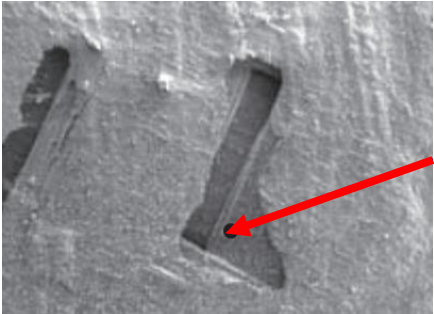


#### 4.2 Defectos en RTRP



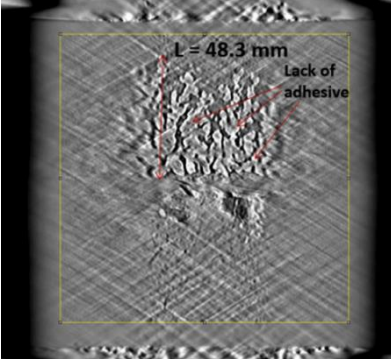
La mayoría de las tuberías compuestas utilizadas dentro de la industria petrolera están hechas a base de GFRP por su diversidad de aplicaciones, normalmente se fabrican por procesos de bobinados de filamentos (FW por sus siglas en inglés) a partir del curado de las fibras preimpregnadas apiladas en capas con orientaciones diferentes (Rafiee, 2016). En estos métodos de fabricación donde en algunos casos no existe un correcto control de calidad, se pueden provocar algunos tipos de defectos, como también por las condiciones ambientales, operacionales, de transporte etc. capaces de degradar la integridad de los materiales disminuyendo así sus propiedades mecánicas y acelerando su ruptura o falla (Miravete, 2015).

Siguiendo con el objeto de estudio de este documento y basados en la norma ISO 14692-4 se identificaron los defectos más comunes que pueden presentarse en este tipo de tuberías RTRP hechas a partir de polímeros reforzados con fibras de vidrio expuestos en la **Tabla 4**

**Tabla 4** Defectos más comunes en RTRP

Tipo de defecto	Descripción	Causa(s)	Imagen	Referencias
Burbujas de aire, vacíos o formación de ampollas	Vacío dentro del laminado o dentro del revestimiento exterior causado por aire atrapado.	Malas condiciones de fabricación, mal curado, humedad. Etc.		(Hamidi, Aktas, & Altan, 2004)
Deformación	Cambios dimensionales a largo plazo.	Funcionamiento a temperaturas y/o presiones superiores a las de diseño		(Thon & Melve, 2004)
Delaminación	Área "brillante" en laminado debido a la falta de unión entre la resina y las fibras. Separación de las capas de material en un laminado.	Fabricación de mala calidad y/o daños por impacto		(Thon & Melve, 2004)

Tipo de defecto	Descripción	Causa(s)	Imagen	Referencias
Fibra seca	Zona de película superficial incompleta en la que el refuerzo no ha sido humedecido por la resina, dejando las fibras expuestas al descubierto.	Fabricación de mala calidad		(Greenhalgh, 2009)
Fractura	Ruptura del laminado con penetración completa. La mayoría de las fibras se rompen.	Se superan las condiciones de diseño, carga y temperatura. Procedimientos operativos inadecuados		(Thon & Melve, 2004)
Grieta	Separación real del laminado, visible en superficies opuestas, que se extiende a través de la pared. Una grieta continua puede ser evidenciada por un área blanca	Impactos externos, mala manipulación o fabricación de mala calidad		(Thon & Melve, 2004)

Tipo de defecto	Descripción	Causa(s)	Imagen	Referencias
Impacto de baja energía	Área delgada con o sin fibras rotas	Incorrecto transporte y mala manipulación		(Gemi, Şahin, & Gemi, 2021)
Inclusiones	Materia extraña atrapada en el laminado	Malas condiciones de fabricación		(Weiguo Hou & Weifang Zhang, 2012)
Falta de adhesivo	Área no Adherida de la cara de la junta	Muy poco adhesivo o no se aplica uniformemente o un movimiento durante el curado.		(Silva, Lopes, Zscherpel, Meinel, & Ewert, 2021)

*Nota.* Defectos más comunes que se pueden producir en las tuberías GFRP, adaptada de la norma ISO 14692-4

## 5. Ensayos no destructivos

A lo largo de este proyecto, se ha mencionado que cada vez son más comunes las aplicaciones de los materiales compuestos en estructuras primarias dentro de la industria de los hidrocarburos, debido a sus enormes beneficios con respecto a otros materiales. En algunos casos el desempeño de estos tipos de compuestos se puede ver afectado por la presencia de defectos como se mencionó en el punto anterior, lo que a su vez puede llevarlo a la falla. Con el fin de evitar estas pérdidas significativas, se han venido investigando cada vez más técnicas de evaluación no destructivas las cuales tienen como fin examinar los materiales, de manera que no se perjudique la utilidad y capacidad de servicio futuras de este, detectando, midiendo, evaluando las fallas, la integridad, las propiedades, composición y midiendo características geométricas (ASTM E1316, 2022).

En cuanto a las técnicas más utilizadas actualmente para la inspección de materiales compuestos tenemos, la inspección visual, emisión acústica, ultrasonido, termografía infrarroja, radiografía, shearografía y holografía óptica. Por otro lado, la técnica de líquidos penetrantes se puede utilizar para encontrar defectos de rotura superficiales, sin embargo, se vuelve un problema eliminar el penetrante al finalizar el ensayo, causando problemas con las reparaciones posteriores. Por último, la técnica de ensayo por las corrientes de Eddy tiene una aplicación limitada debido a que dentro de sus constituyentes la pieza debe tener un material conductor. (Adams & Cawley, 1988).

### 5.1 Técnicas de ensayo no destructivo más utilizadas para materiales compuestos

#### 5.1.1 Inspección Visual (IV)

Es el método más simple y económico de todos los métodos, también la forma más común de inspección que se realiza siempre antes de utilizarse otro método complementario, puesto que

entre otras cosas se realiza para indicar en que parte se debe hacer un estudio más detallado. Se trata de una técnica subjetiva que depende de la experiencia y conocimiento del operador, además del ángulo de vista del observador, la fuente de iluminación y la orientación del material, también es común que dentro de esta técnica sea frecuente la utilización de equipos auxiliares como las lupas, microscopios y otros medios ópticos donde se destaca el boroscopio, que tiene como fin llegar a lugares de difícil acceso y cavidades estrechas. Dentro de la industria petrolera, la mayoría de los compuestos no son translucidos, por lo que la inspección se limita a detectar daños superficiales (daños por impacto, grietas, etc.), los cuales no necesariamente indican el estado interno del material (Miravete, 2015). La técnica de inspección visual utilizada en la industria petrolera para el análisis de sus materiales compuestos basados en polímeros reforzados con fibra de vidrio esta normalizada a través de la norma internacional ASTM D2563 (*Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts*).

### **5.1.2 Emisión Acústica (EA)**

Se trata de una técnica de inspección en tiempo real que capta la generación de ondas acústicas producto de la formación y propagación de micro fallas u otro tipo de fuentes de energía mecánica (Cupul, Laviada, & Soberanis, 2008). Para el desarrollo de la técnica se utilizan sensores piezoeléctricos o transductores altamente sensibles de frecuencias entre 50 kHz a 1 MHz, la información suministrada por el análisis permite determinar el tiempo y el parámetro de carga externa (cuando), la proporción (cuanto), amplitud y energía (intensidad) y la localización de las fuentes EA (donde) (Cupul et al., 2008).

El resultado del análisis depende de la relación existente entre la frecuencia de la señal de onda acústica y el mecanismo de falla o defecto, siendo de 30 a 150 kHz un agrietamiento en la

matriz, de 180 a 290 kHz un desprendimiento y extracción de la fibra y una rotura de fibra con valores de 300 a 400 kHz (Huguet, Godin, Gaertner, Salmon, & Villard, 2002).

En cuanto a este tipo de análisis, existen normas estandarizadas para su aplicación dentro de los materiales compuestos, como lo es la norma ASTM E1067 (*Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels*) para la inspección de tanques/recipientes de plásticos reforzados con fibras de vidrio, la norma ASTM E1118 (*Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP)*) para tuberías de materiales compuestos y la norma ASTM E2191 (*Standard Practice for Examination of Gas-Filled Filament-Wound Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission*) para recipientes a presión de material compuesto enrollado en filamentos (Wang, Zhong, Lee, Fancey, & Mi, 2020).

### **5.1.3 Ultrasonido (UT)**

Esta técnica hace uso de la energía sonora de alta frecuencia con rangos típicos de 0,5 MHz a 15 MHz en materiales compuestos, que viaja a través de la pieza a inspeccionar para localizar anomalías estructurales dentro de esta, se basa en la atenuación de la impedancia acústica entre la estructura y los defectos internos (Graham-Jones & Summerscales, 2016), la cual según Miravete, 2015, se puede dar por tres causas: efectos viscoelásticos en la resina, dispersión geométrica debido a la heterogeneidad del compuesto y la dispersión geométrica producida por daños internos. Este sistema de inspección consta de un pulsador/receptor el cual es un dispositivo electrónico capaz de convertir un pulso eléctrico de alto voltaje, en energía mecánica en forma de vibraciones, a su vez, transforma la señal de onda reflejada por la pieza en una señal eléctrica para ser representada en una pantalla (Greene, 2014). La sensibilidad en este tipo de técnica para la detección de daños depende de una correcta selección de la frecuencia de ultrasonido, además, de

un buen acoplamiento entre el transductor con la pieza, ya que la atenuación de las ondas depende en gran medida del acoplante, el cual puede ser líquido (agua, aceite, glicerina o grasas) o el mismo aire, sin embargo, este último solo es utilizado para frecuencias de trabajo muy bajas (20-50 KHz) (Boudenne, Ibos, Candau, & Thomas, 2011).

Por otro lado, existen dos técnicas para la utilización del acoplante, en donde el primer caso consiste en la inmersión de la pieza sobre un medio, el cual generalmente es agua, ya que esta penetra fácilmente en las regiones dañadas permitiendo que la impedancia acústica entre el agua-material sea mucho menor a la del aire-material, sin embargo este tipo de técnica presenta cierta desventaja a la hora de analizar piezas grandes debido a que es un proceso de inmersión total, para estos casos, se utiliza la técnica de chorro de agua la cual consiste en el enfrentamiento entre dos chorros por la misma línea pero en sentido contrario. La otra técnica también utilizada es la de contacto, aquí el transductor se coloca directamente sobre la superficie de la pieza la cual es normalmente recubierta con un acoplante líquido, es utilizada frecuentemente para inspecciones de campo, siempre y cuando la zona de inspección sea pequeña (Ajay, 2010; Miravete, 2015).

Existen diferentes métodos de aplicación de la técnica ultrasonido, entre los cuales se destacan para la inspección de materiales compuestos el método por pulso-eco y el de transmisión. En el primero, la onda emitida por el elemento emisor/receptor viaja a través del material hasta la cara opuesta donde se refleja y es recibida por el mismo transductor, aquí los defectos del material reflejan o dispersan parte de la energía incidente generando una indicación observable dentro de la pantalla de monitoreo, que permite calcular la posición y tamaño del defecto a partir del tiempo total de recorrido de los impulsos y de la amplitud, con este método se pueden detectar delaminaciones, grietas interlaminares, despegues, poros, humedad etc. (Graham-Jones & Summerscales, 2016; Miravete, 2015). El segundo método mencionado, es una técnica que suele

usar dos transductores, uno como emisor de la onda acústica y el otro como receptor, donde son puestos uno en frente del otro, también es llamada técnica de oscurecimiento, ya que mide la atenuación total causada por características que oscurecen el haz, de esta forma se puede comparar el contraste entre las diferentes muestras y regiones dentro de la pieza, es ideal para la detección de defectos tales como delaminaciones, porosidad, algunas inclusiones, cambios en la fracción de volumen de las fibras y algunas fibras desplazadas, sin embargo tiene como desventaja que no es posible conocer la profundidad del defecto (Ajay, 2010).

Para la representación y registro de los resultados de estas técnicas existen tres métodos: A-SCAN, B-SCAN y C-SCAN. La visualización típica de A-SCAN consiste en una serie de picos que representan la amplitud de la señal y su desplazamiento en función del tiempo. La amplitud, da una idea de las características de los defectos y el desplazamiento, la profundidad a la que se encuentran (Ajay, 2010), mientras que en B-SCAN se representa la profundidad y distribución del defecto en una sección transversal, por último, C-SCAN es el más popular y útil de sistemas de registro, representa las discontinuidades del material en un plano perpendicular al de emisión del haz, sin embargo, tiene como desventaja que no detecta la profundidad de los defectos (Hagemaiier, 1997; Miravete, 2015).

Por último, las técnicas de UT para la inspección de materiales compuestos utilizadas actualmente son la norma ASTM E2580 (*Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications*) para paneles planos de materiales compuestos y estructuras tipo sándwich y la norma ASTM E2981 (*Standard Guide for Nondestructive Examination of Composite Overwraps in Filament Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications*) para recipientes a presión con filamentos.

#### **5.1.4 Termografía Infrarroja (IRT)**

Consiste en una técnica de análisis infrarrojo que mide las variaciones de calor emitidas por un objeto y las muestra en forma de imágenes visuales, mediante el monitoreo de la radiación térmica resultante, por una cámara termográfica que la transmite a un software especializado (Greene, 2014). Al ser un método sin contacto resulta eficiente para la inspección de grandes áreas en cortos periodos de tiempo (Lizaranzu, Lario, Chiminelli, & Amenabar, 2015).

La termografía se puede dividir en dos métodos diferentes: pasivos y activos. La termografía activa requiere que la pieza se estimulada por una fuente externa de calor o frio, donde esta excitación térmica necesaria para realizar el ensayo puede proporcionarse de diferentes dispositivos, como equipos mecánicos (vibrotermografía), eléctricos (termografía por corrientes de Eddy) o térmicos (calentamiento por pasos, flash, bloqueo, pulsado/transitorio) (Lizaranzu et al., 2015). Por otro lado, la termografía pasiva se refiere a los casos en los que no es necesaria la estimulación por calentamiento o enfriamiento externo, si no que, se vigilia la respuesta del material de prueba a un cambio de temperatura aplicado por otros procesos, como los de fabricación (Adams & Cawley, 1988).

El funcionamiento de la termografía se basa el aislamiento de anomalías por la diferencia entre las propiedades térmicas. Para la ejecución del ensayo el calentamiento de la pieza puede darse de dos formas: desde el mismo lado la cámara de imagen térmica o del lado opuesto de esta, dependiendo del acceso a la estructura, y del diseño del laminado, de cualquier forma el calor viaja uniformemente por la pieza hasta que encuentra una discontinuidad o defecto (delaminación, desprendimiento, inclusiones, poros , vacíos etc.) con tasas de conductividad térmica más bajas, ocasionando que el calor quede atrapado localmente generándose un gradiente de temperatura que permite identificar por contraste la presencia de los defectos, mostrando su ubicación y el tamaño

aproximado (Greene, 2014; Lizaranzu et al., 2015). La sensibilidad de este ensayo depende fuertemente de la conductividad térmica del material inspeccionado y del efecto del tipo de defecto sobre esta propiedad (Miravete, 2015).

La norma encargada de normalizar el proceso de inspección para materiales compuestos y parches de reparación es la ASTM E2582 (Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications).

### **5.1.5 Radiografía (XRI)**

Consiste en un método sin contacto en la cual se obtiene una imagen de dos dimensiones en diferentes tonalidades de grises, a partir de un sólido bombardeado con rayos X o gamma (Quintero, Villamizar, & Fonseca, 2014). Esta radiación se genera eléctricamente en un tubo similar al de los rayos catódicos siendo necesario de 10 a 800 Kv para acelerar los electrones (Miravete, 2015). Para la ejecución de este tipo de ensayo la radiación emitida debe ser generada y proyectada a través del objeto y además se debe tener acceso a ambos lados de este, en donde la radiación no absorbida pasa a través de la pieza y se captura en una película o fotosensor. En la imagen obtenida el contraste generado se debe a la diferencia de absorción de la radiación del objeto, debido a las variaciones en la densidad, espesor, composición química del material, discontinuidades, etc. (Chaverri-Quirós & Conejo-Solís, 2017).

Para la inspección de materiales compuestos existe cierta dificultad a la hora obtener imágenes radiográficas con contrastes suficientes, ya que en comparación con los metales son prácticamente transparentes, lo que conlleva a la utilización de voltajes, intensidades y tiempos de exposición en función del espesor de la muestra, además se debe tener en cuenta la distancia entre la probeta y el generador (Miravete, 2015).

En cuanto a la aplicación de la técnica para la inspección de materiales compuestos, es más común su utilización dentro de los materiales reforzados con fibra de vidrio o boro, ya que los reforzados con fibra de carbono presentan cierta dificultad debido a que las características de absorción de la fibra y la matriz son muy similares, además de que la absorción global es muy baja (Adams & Cawley, 1988). En cuanto a la detección de defectos por este tipo de técnica, se tiene que es ideal para la determinación de vacíos, porosidad, inclusiones, grietas translaminares, relación resina-fibra, desplazamiento y orientación general de las fibras, calidad del tejido, pliegues, arrugas, etc. (Prakash, 1980). Por otro lado, este método resulta poco eficiente para la determinación de delaminaciones ya que tienden a ser normales al haz de rayos X, sin ocasionar una gran diferencia en la absorción global (Adams & Cawley, 1988), así mismo se tiene que los defectos interlaminares como las grietas y poros sin profundidad apreciable no pueden ser detectados a menos de que sean paralelos al haz de radiación, por último, no se considera una técnica apropiada para medir la fracción volumétrica de las fibras (Quintero et al., 2014).

En la actualidad los avances tecnológicos han permitido desarrollar la radiografía digital o computarizada, la cual consiste en una imagen obtenida por rayos X observable directamente en una computadora, en este método la radiación incidente es detectada por un sensor especial y convertida equivalentemente en cargas eléctricas para luego ser transformada en imágenes de alta calidad gracias al alto contraste entre las áreas de diferente densidad (Chaverri-Quirós & Conejo-Solís, 2017), así mismo, gracias a la utilización de un software, este método permite la representación tridimensional de la muestra al tomar múltiples imágenes de rayos X alrededor de un eje de rotación, con el fin de detectar vacíos, delaminaciones o desunión (Ferreira et al., 2020). Las normas recomendadas para la aplicación de esta técnica es la norma ASTM E2033 y la norma ASTM E2662 (*Standard Practice for Radiographic Examination of Flat Panel Composites and*

*Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications*), esta última aplica para paneles de compuestos planos y materiales de núcleo tipo sándwich.

### **5.1.6 Shearografía**

Se trata de una técnica de inspección óptica basada en laser la cual no requiere de contacto. Un rayo láser impacta sobre la superficie de la muestra dispersándose y reflejándose a través de un dispositivo de cizallamiento que lo divide en dos imágenes coherentes, utilizando prismas de Wollaston, rejillas de difracción, cuñas etc., donde una de estas imágenes del objeto es registrada y monitoreada sin ningún tipo de excitación o perturbación, mientras que la otra imagen corresponde a la muestra perturbada durante una deformación aplicada, debido a cargas controladas que pueden ser térmicas, mecánicas, de vibración o microondas ya que para revelar los defectos internos y superficiales del material es necesario inducir un cambio o deformación (KRISHNASWAMY, 2000; Wang et al., 2020). El patrón interferométrico se capta y se graba mediante un dispositivo o cámara de carga acoplada que lo envía a un software especializado. Esta técnica es una grabación en vivo que compara las superficies de la muestra excitada con la de la muestra no estresada en una sola imagen, con el fin de visualizar y cuantificar los defectos como fugas, delaminaciones, desplazamientos, deformaciones, curvaturas, tensiones residuales y análisis mecánico entre otras (Wang et al., 2020). En cuanto a su ejecución para la aplicación en materiales compuestos esta normalizada por la norma ASTM E2581 (*Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications*) para compuestos de polímeros y materiales de núcleo tipo sándwich.

### *5.1.7 Holografía Óptica*

La holografía es una ciencia que consiste en registrar un frente de onda óptico con información tanto de amplitud como de la fase, y almacenarlo en un material de grabación adecuado, este registro se conoce como holograma, que a diferencia de una fotografía convencional que registra una escena tridimensional en un formato bidimensional, registra información tridimensional real sobre la escena con una alta resolución (Shakher & Ghatak, 2005). La holografía como técnica de ensayo no destructivo permite registrar una imagen de un objeto en 3 dimensiones con la ayuda de una luz laser coherente y monocromática, que suele ser helio-neón, argón o rubí (Miravete, 2015). Consiste en una técnica sin contacto con una rápida velocidad de inspección ya que se pueden obtener imágenes de un área amplia instantáneamente, utilizada generalmente en objetos opacos con superficies ópticamente rugosas como es el caso de los materiales compuestos, esta técnica se basa en la comparación superficial de dos superficies de un mismo objeto en diferentes estados o cargas, ya que para revelar los defectos internos del material, es necesario inducir un cambio o deformación superficial anómalo, producto del desplazamiento normal a la superficie de las imperfecciones del material cuando es alterado (Krishnaswamy, 2000; Miravete, 2015). Los tres métodos de carga más comunes para la realización de este ensayo son: carga acústica, la cual hace vibrar acústicamente un objeto a diferentes frecuencias con la ayuda de dispositivos electromecánicos, esta carga es utilizada para la detección de desprendimientos y delaminaciones subsuperficiales, otro método de carga es el de la carga por presión, la cual consiste en la aplicación de una carga mecánica lenta utilizada para ensayos en recipientes a presión, estructuras de panel y laminados compuestos que presenten despegues algo profundos dentro de la estructura, por último, también es utilizada una carga térmica la cual consiste en un método sin contacto y sencillo utilizado en materiales con difusividad térmica lenta como es el caso de los

materiales compuestos poliméricos, la carga consiste en calentar el objeto de inspección localmente utilizando lámparas de flash o láseres y controlar la deformación estructural resultante a medida que el objeto se calienta o se enfría, este método es muy útil para la detección de delaminaciones (Krishnaswamy, 2000).

#### ***5.1.8 Corrientes inducidas***

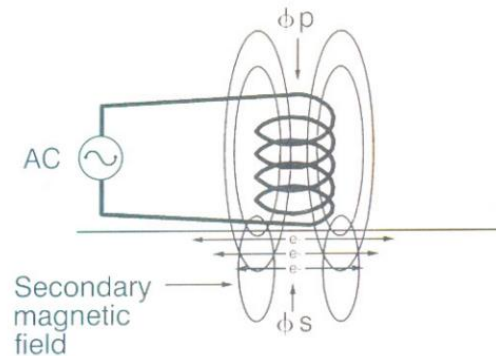
También llamadas corrientes parasitas o corrientes de Eddy, es un método de inspección sensible a la fracción de volumen y a la integridad del componente conductor, su uso más común dentro de los materiales compuestos es como método complementario a los ultrasonidos de los materiales CFRP, ya que suele ser más sensible a algunos defectos difíciles de visualizar por esta técnica. Las corrientes de Eddy están limitadas a materiales compuestos con una fase que tenga buenas propiedades eléctricas (Adams & Cawley, 1988), por ejemplo, el compuesto ya mencionado el cual consiste en un polímero reforzado con fibras de carbono, siendo este último elemento reforzante, el que le confiere la capacidad conductora (Prakash, 1980). Algunas ventajas de esta técnica son la ausencia de contacto, por lo que requiere una menor preparación previa de la superficie del material, además presenta una alta velocidad y bajo costo. Por otro lado, este ensayo no es posible para la detección de algunos defectos que no influyen en la conductividad del material, como el caso de las delaminaciones, grietas en la matriz, porosidad e inclusiones no conductoras (Du, Li, Xie, Yang, & Chen, 2020).

Este método consiste en colocar una sonda cilíndrica sobre el material a inspeccionar, el diseño de este componente juega un papel importante ya que puede influir en la sensibilidad y rendimiento cuando se utiliza para la detección de defectos (Ramos & Ribeiro, 2017), normalmente una sonda convencional es un tubo alargado donde se monta un bobinado, haciéndole pasar una corriente alterna, generándose a su vez un campo magnético variable sinusoidal como

se puede observar en la **Figura 8**, el cual se llamará campo magnético primario ( $\phi_p$ ), cuando este campo se aproxima a la pieza a inspeccionar, es cuando se generan las corrientes parásitas, las cuales se distribuyen en sentido circular de mayor a menor medida dentro de la pieza, así mismo, estas corrientes que circulan dentro, generaran un campo magnético secundario ( $\phi_s$ ), opuesto a la fase del campo magnético primario. Cuando la impedancia de la bobina cambia, altera la corriente de flujo dentro de esta y estos cambios pueden ser monitoreados por el equipo de corrientes parásitas (Fava & Ruch, 2007; Monsalvo, 2007).

Los factores que pueden cambiar la impedancia de la bobina son: la conductividad (inclusiones conductoras), espesor, grietas, separación entre partes (roturas de fibras) y permeabilidad (Monsalvo, 2007)

**Figura 8** Circuito básico del funcionamiento de las corrientes de Eddy



*Nota.* Se puede observar el circuito básico de las corrientes de Eddy, cuando se acerca la sonda al material conductor y como estos interactúan. Tomado de (Monsalvo, 2007).

## 5.2 END en tuberías GFRP

Uno de los materiales que ha sido mayormente utilizado en la industria *offshore* es el GFRP, debido a esto existen normas estandarizadas que cubren desde la fabricación hasta el monitoreo e inspección como es el caso de la norma, *Petroleum and natural gas industries - Glass-reinforced plastics (GFRP) piping - Part 4: Fabrication, installation and operation* (ISO 14692-

4:2017). A continuación, en la **Tabla 5** y basados en la anterior norma mencionada, se presentan los defectos más importantes durante la fabricación y el funcionamiento de una tubería GFRP en aplicaciones petroleras, así mismo, las técnicas de END más recomendadas y otras potencialmente factibles junto con los criterios de aceptación y las medidas correctivas.

**Tabla 5** END en la detección de defectos para tuberías GFRP

Tipo de defecto	Método END recomendado	Otros métodos potenciales END	Criterio	Acción correctiva Manufactura	Acción correctiva Operación y Servicio
Burbujas de aire, vacíos o formación de ampollas	Inspección visual	Radiografía (120 kV - 130 kV a 4 Amperios, exposición = 1,5 a 2,5 min). Ultrasonido PE (0,25 MHz - 2,25 MHz)	No se permiten diámetros superiores a 3 mm	Rechazar	Reparación menor si se encuentra dentro de la capa externa.
Deformación	Inspección visual	Ninguno	No se aceptan fugas	No aplica	Se acepta, pero requiere control.
Delaminación	Inspección visual	Radiografía computarizada (100 kV a 98 $\mu$ A, exposición = 2 a 10 s). Ultrasonido PE (0,25 MHz - 0,5 MHz)	Ninguna permitida	Rechazar	Acepta reparación menor, pero se requiere supervisión. Reparación mayor si el servicio no es de agua marina o potable.
Fibra seca	Inspección visual	Ninguna	Ninguna permitida	Rechazar	Reparación mayor

Tipo de defecto	Método END recomendado	Otros métodos potenciales END	Criterio	Acción correctiva Manufactura	Acción correctiva Operación y Servicio
Fractura	Inspección visual	Emisión acústica (300 - 400 KHz, 85 -100 dB)	Ninguna permitida	Rechazar	Reparación mayor
Grieta	Inspección visual	Radiografía (60 - 70 kV a 10 mA, exposición = 2,5 min). Ultrasonido PE (0,25 MHz - 2,25 MHz)	Profundidad máxima de la grieta debe ser igual o menor que la capa de la resina	Reparación menor	Se acepta
			Profundidad máxima de la grieta mayor que la capa de la resina	Rechazar	Reparación mayor
Impacto de baja energía	Inspección visual con fuente de luz en el interior de la tubería	Termografía (Cámara térmica AGEMA 900 SW con una lámpara infrarroja de 500 W). Ultrasonido PE (0,25 MHz - 2,25 MHz)	Zonas "sólidas brillantes" circulares o elipsoidales (diámetro superior a 25 mm) cuando no hay fugas, ninguna permitida.	Rechazar	Aceptar/Reparación menor si el servicio es de mar o de agua potable, pero requiere control.
			Zonas circulares de diámetro inferior 25 mm cuando no hay fugas	Reparación mayor	Aceptar/reparación menor; Reparación mayor si se trata de un servicio distinto al mar o agua potable
			Fuga en el funcionamiento	No aplica	Reparación mayor

Tipo de defecto	Método END recomendado	Otros métodos potenciales END	Criterio	Acción correctiva Manufactura	Acción correctiva Operación y Servicio
Inclusiones	Inspección visual	Ultrasonido de transmisión acoplado con aire (100 kHz - 200 kHz). Radiografía (70 kV a 3 mA, exposición = 30 a 60s)	No se permite ninguna	Rechazar	No aplica
Falta de fibras	Inspección visual	Radiografía (10 Kv - 70 kV)	No se permite ninguna	Rechazar	No aplica

*Nota.* La reparación mayor se define como: sustitución permanente, junta laminada temporal antes de la sustitución permanente o abrazaderas temporales antes de la sustitución permanente. La reparación menor se define como una reparación in situ mediante: el lijado, limpieza y aplicación de resina/endurecedor o laminado. Adaptado y referenciado de: (Abdul Majid et al., 2015; Berketis, Tzetzis, & Hogg, 2009; ISO 14692-4, 2017; Oliveira, Soares, & Lopes, 2011; Santulli, 2003; Schilling, Karedla, Tatiparthi, Verges, & Herrington, 2005).

## 6. Conclusiones

Como resultado de la investigación del estado del arte sobre los ensayos no destructivos para la evaluación de materiales compuestos utilizados en la industria petrolera, se llegó a las siguientes conclusiones:

Este estudio está enfocado en los materiales compuestos más utilizados en el sector *offshore*, debido a que por la naturaleza del mar las condiciones medioambientales son más agresivas y favorecen la corrosión y el desgaste dentro de los materiales convencionales como lo son el acero, el aluminio y la madera. Su desarrollo e implementación también se vio favorecido debido a la necesidad de la industria a reducir el peso y el mantenimiento periódico de las plataformas de producción de crudo, permitiendo una disminución significativa en los costos. La composición de la mayoría de los materiales compuestos para este sector está basada en matrices orgánicas termoestables reforzadas con fibras de vidrio, obteniéndose así, un material con excelentes propiedades capaz de cumplir las exigencias del entorno para el que ha sido fabricado.

Los primeros materiales compuestos utilizados en este sector de la industria fueron los compuestos poliméricos reforzados con fibra de vidrio, también llamados GFRP, para aplicaciones secundarias como rejillas, escaleras, paneles para pisos entre otras, así como para la reparación de algunas tuberías y estructuras sobre las plataformas petroleras. Actualmente el desarrollo e investigación se ha enfocado en aplicaciones más importantes como tuberías, un ejemplo son los *risers*, tuberías de aguas residuales, tuberías de agua potable, líneas de inyección entre otras, donde se destacan tuberías termoplásticas reforzadas (RTP), tuberías compuestas termoplásticas (TCP), y las tuberías de resinas termoendurecibles reforzadas (RTRP). Se tuvo especial énfasis en estas últimas, puesto que existen normas estandarizadas que cubren desde la fabricación, hasta el monitoreo e inspección, puesto que está fabricada a base de materiales GFRP.

Los procesos de fabricación, transporte, condiciones de carga en servicio y operacionales pueden acelerar el deterioro normal del compuesto si no se tiene un correcto control de calidad durante el desarrollo de cada uno de los procesos, por lo que la generación de defectos se puede agrupar en 4 secciones diferentes: defectos en las fibras, en la unión matriz y fibra, apilamiento y bobinado y defectos en servicio. Según la agrupación anteriormente mencionada, la mayoría de los defectos se pueden presentar durante los procesos de fabricación, sin embargo, el defecto que puede conllevar a más fallas es la delaminación la cual es consecuencia mayoritariamente de las condiciones de servicio.

Dentro de los ensayos no destructivos convencionales, las técnicas utilizadas actualmente para la inspección de los materiales compuestos son: inspección visual, ultrasonido y radiografía. En cuanto a los líquidos penetrantes se pueden utilizar para encontrar defectos abiertos a la superficie, pero debido a que algunos materiales compuestos pueden absorber este líquido y es difícil eliminarlo no se suele utilizar dentro de esta industria. Debido a lo anterior, se han venido empleando otras técnicas alternativas de inspección como es el caso de la termografía, holografía, shearografía, emisión acústica y en algunos casos corrientes inducidas. En cuanto a la emisión acústica, es considerada como una técnica de monitoreo en tiempo real más que un ensayo no destructivo y solo se pueden detectar defectos de crecimiento o propagación como fracturas y grietas que ocurren en el momento.

Según la norma ISO 14692-4 para la inspección y monitoreo de tuberías GFRP y mediante la adaptación de la tabla A1 en este documento (**Tablas 4 y 5**), se detectaron los defectos más comunes que pueden presentarse en este tipo de material durante su manufactura, operación y servicio, teniendo en cuenta los criterios de aceptación y las acciones correctivas que permiten mantener la integridad de la tubería para su óptimo funcionamiento, aquí se evidencia que la

inspección visual es el ensayo no destructivo que se realiza antes de cualquier otro método y es capaz de revelar gran cantidad de defectos, además de indicar las áreas donde se puede llevar a cabo un estudio más detallado, mediante la aplicación de otras técnicas de END complementarios. Se tuvieron en cuenta las variables operacionales de algunos métodos de ensayo para la detección de los defectos específicos en cada caso, como lo es el voltaje, corriente, y el tiempo de exposición para la radiografía, la frecuencia para los ultrasonidos y emisiones acústicas etc.

### Referencias Bibliográficas

- Abdul Majid, M. S., Afendi, M., Daud, R., Gibson, A. G., Assaleh, T. A., Hale, J. M., & Hekman, M. (2015). Acoustic emission monitoring of multiaxial ultimate elastic wall stress tests of glass fibre-reinforced epoxy composite pipes. *Advanced Composite Materials*, 24(1), 1–16.  
<https://doi.org/10.1080/09243046.2013.871175>
- Adams, R. D., & Cawley, P. (1988). A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT International*, 21(4), 208–222.  
[https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90333-1](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90333-1)
- Ajay, K. (2010). Best practice guide: non-destructive testing of composite materials. *Natl. Compos. Netw. TWI*, 2010(1–48), 8.
- ASTM E1316. (2022, January). Standard Terminology for Nondestructive Examinations. Retrieved January 24, 2022, from ASTM website: <https://www.astm.org/e1316-21d.html>
- Badeghaish, W., Noui-Mehidi, M., & Salazar, O. (2019). The Future of Nonmetallic Composite Materials in Upstream Applications. *Day 2 Tue, October 22, 2019*. SPE.  
<https://doi.org/10.2118/198572-MS>
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to Composite Materials Design*. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781439894132>
- Berketis, K., Tzetzis, D., & Hogg, P. J. (2009). Noncontact ultrasonics used for impact damage detection on long-term water-immersed GFRP composites. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 4(1), 34–44.
- Besednjak, A. (2009). *Materiales Compuestos*. UPC, S.L., Edicions. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=gMSg5rURr6sC>

- Boudenne, A., Ibos, L., Candau, Y., & Thomas, S. (2011). *Handbook of Multiphase Polymer Systems*. Somerset, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=693298>
- Brigante, D. (2014). Composite Materials. In *New Composite Materials* (pp. 1–17). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-01637-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01637-5_1)
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering* (Vol. 5). John wiley & sons New York.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. Materials Park, UNITED STATES: A S M International. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=3002447>
- Chaverri-Quirós, Ó., & Conejo-Solís, M. A. (2017). Radiografía Industrial: comparación entre el método tradicional y digital empleando rayos X. *Revista Tecnología En Marcha*, 30(3), 119–128. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i3.3278>
- Chung, D. D. L. (2010). *Composite Materials: Science and Applications*. Springer London. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=vGstB0vDe04C>
- Composites World. (2002, January 1). Composite Accumulator Bottles Perform In Service CompositesWorld. Retrieved October 26, 2021, from <https://www.compositesworld.com/articles/composite-accumulator-bottles-perform-in-service>
- Correia, J. R. (2015). Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites. In *Materials for Construction and Civil Engineering* (pp. 501–556). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_11)

- Cupul, J. C., Laviada, J. A. R., & Soberanis, C. R. R. (2008). Detección del daño generado en materiales compuestos de matriz polimérica empleando la técnica de emisión acústica. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 9(2), 149–159.
- Dávila, J. L., Gales, S., Guerrero, V. H., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *NUEVOS MATERIALES: APLICACIONES ESTRUCTURALES E INDUSTRIALES* (Primera edición; V. H. Guerrero, Ed.). Quito.
- Davim, J. P. (2012). *Machining of Metal Matrix Composites* (J. P. Davim, Ed.). London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-938-3>
- Direct Industry. (n.d.). Fibra de vidrios E - Vetrotex - cortada. Retrieved March 23, 2022, from <https://www.directindustry.es/prod/vetrotex/product-52874-919209.html>
- Ferreira, C. G., Lopes, R. T., dos Santos, T. M. P., Oliveira, D. F., Martins, F. D. F., & Pereira, G. R. (2020). Non-destructive inspection of laminated pipe joints in polymeric composite material reinforced by fiberglass. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 954, 161154. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.113>
- Frieze, P. A., & Barnes, F. J. (1996). Composite Materials for Offshore Application - New Data and Practice. *All Days*. OTC. <https://doi.org/10.4043/8143-MS>
- Gemi, D. S., Şahin, Ö. S., & Gemi, L. (2021). Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes. *Composite Structures*, 275, 114428. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114428>
- Graham-Jones, J., & Summerscales, J. (2016). *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*. Elsevier. Retrieved from

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMAAFRC03/marine-applications-advanced/marine-applications-advanced>

Greene, E. (2014). Marine composites non-destructive evaluation. *Ship Structure, 1*, 416–427.

Greenhalgh, E. S. (Ed.). (2009). 7 - Defects and damage and their role in the failure of polymer composites. In *Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites* (pp. 356–440). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845696818.356>

Hagemaijer, D. (1997). Nondestructive Evaluation of Composites. *All Days*. OTC. <https://doi.org/10.4043/8457-MS>

Hamidi, Y. K., Aktas, L., & Altan, M. C. (2004). Formation of Microscopic Voids in Resin Transfer Molded Composites. *Journal of Engineering Materials and Technology, 126*(4), 420–426. <https://doi.org/10.1115/1.1789958>

Huguet, S., Godin, N., Gaertner, R., Salmon, L., & Villard, D. (2002). Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Composites Science and Technology, 62*(10–11), 1433–1444. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00087-8)

Hull, D. (1987). *Materiales compuestos*. Editorial Reverte. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=FiYSkhjInm4C>

ISO 14692-4. (2017). Petroleum and natural gas industries - Glass-reinforced plastics (GRP) piping - Part 4: Fabrication, installation and operation. *UNE-EN ISO 14692-4*. Retrieved from <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-14692-4-2017-n0058927>

KRISHNASWAMY, S. (2000). Optical Methods of Inspecting Composites (Holography and Shearography). In *Comprehensive Composite Materials* (pp. 447–468). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00083-8>

- Larson, B. (2011). Composite Structures. Retrieved November 20, 2021, from <https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Introduction/composites.xhtml>
- Lizaranzu, M., Lario, A., Chiminelli, A., & Amenabar, I. (2015). Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools. *Infrared Physics & Technology*, 71, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.02.006>
- Made-in-china. (n.d.). China Good Price Automotive Fittings Powder Fiberglass Chopped Strand Mat - China Fiberglass, Fiberglass Price. Retrieved March 23, 2022, from <https://haisan.en.made-in-china.com/product/SXpJHThGOgUK/China-Good-Price-Automotive-Fittings-Powder-Fiberglass-Chopped-Strand-Mat.html>
- Melot, D. (2018). *Present and Future Composites Requirements for the Offshore Oil and Gas Industry*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65145-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65145-3_9)
- Meniconi, L. C., Porciuncula, I. N., McGeorge, D., & Pedersen, A. (2010). Structural Repair at a Production Platform by Means of a Composite Material Patch. *All Days*. OTC. <https://doi.org/10.4043/20657-MS>
- Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos I*. Editorial Reverte. Retrieved from <https://elibro.net/es/lc/uis/titulos/46726>
- Miravete, A. (2015). *Materiales compuestos II*. Editorial Reverte. Retrieved from <https://elibro.net/es/lc/uis/titulos/46731>
- Moral, A., & Nogueira, M. (2007). Materiales de ultima generación y materiales eficientes: materiales compuestos-composites. *Universidad de Granada, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Granada, España*.
- OLIVEIRA, D. F., SOARES, S. D., & LOPES, R. T. (2011). Inspection of Composite Pipelines using Computed Radiography. *5th Pan American Conference for NDT. Cancun, Mexico*.

- Owens Corning. (n.d.). Compósito Roving Directo. Retrieved March 24, 2022, from [https://owenscorning-brazil.com/es-es/compositos-productos-produto\\_id=17.html](https://owenscorning-brazil.com/es-es/compositos-productos-produto_id=17.html)
- Prakash, R. (1980). Non-destructive testing of composites. *Composites*, 11(4), 217–224. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(80\)90428-0](https://doi.org/10.1016/0010-4361(80)90428-0)
- Quintero, L. A., Villamizar, J. A., & Fonseca, J. M. (2014). Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 78–85.
- Rafiee, R. (2016). On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. *Composite Structures*, 143, 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.037>
- Ross, K. (2001). GRE Composite-Lined Tubular Products in Corrosive Service: A Study in Workover Economics. *All Days*. SPE. <https://doi.org/10.2118/70027-MS>
- Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.3390/jmse8010026>
- Salazar, V., & Guillermo, H. (2011). Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación. *Escuela Politécnica Nacional*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4036>
- Santulli, C. (2003). IR Thermography For Impact Damage Evaluation Of Automotive Composites And Components. *Journal of Nondestructive Testing*, 8(9), 1–8.
- Schilling, P. J., Karedla, B. P. R., Tatiparthi, A. K., Verges, M. A., & Herrington, P. D. (2005). X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix

- composites. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2071–2078.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2005.05.014>
- Shakher, C., & Ghatak, A. K. (2005). Overview: Holography. In *Encyclopedia of Modern Optics* (pp. 151–156). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809283-5.00699-6>
- Silva, W., Lopes, R., Zscherpel, U., Meinel, D., & Ewert, U. (2021). X-ray imaging techniques for inspection of composite pipelines. *Micron*, 145, 103033.  
<https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103033>
- Song, P., Yao, D., Chen, B., & Wang, C. (2019). *The Development of a New Reinforced Thermoplastic Pipe with Large Diameter for Oil and Gas Transmission Pipeline*.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-13-5947-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-13-5947-7_15)
- Spruijt, W. (2018). Installation of the World's First Subsea Thermoplastic Composite Flowline for Hydrocarbon Service. *Day 3 Thu, March 22, 2018*. OTC. <https://doi.org/10.4043/28540-MS>
- Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas*. Buenos Aires.
- Thon, H., & Melve, B. (2004). Non-Destructive Evaluation of Composite Pipes and Tanks: Development of Inspection Strategies. *23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 2*, 983–1022. ASMEDC.  
<https://doi.org/10.1115/OMAE2004-51597>
- van der Woude, J. H. A., & Lawton, E. L. (2010). Composite Design and Engineering. In *Fiberglass and Glass Technology* (pp. 125–173). Boston, MA: Springer US.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0736-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0736-3_3)
- Viralsurf. (n.d.). Tejido sarga de carbono C193 3K HR - 193gr / m<sup>2</sup> - ancho 100cm - VIRAL SURF. Retrieved March 24, 2022, from <https://www.viral-surf.com/es/tejidos-de-refuerzo-especiales/4544-tejido-sarga-de-carbono-c193-3k-hr-193gr-m-ancho-100cm.html>

- Wang, B., Zhong, S., Lee, T.-L., Fancey, K. S., & Mi, J. (2020). Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(4), 168781402091376. <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>
- Weiguo Hou, & Weifang Zhang. (2012). Advanced Composite Materials defects/damages and health monitoring. *Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing)*, 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PHM.2012.6228804>
- Williams, J. G. (1999). Composite material offshore corrosion solutions. *Proceedings of the International Workshop on Corrosion Control of Marine Structures and Pipelines*.
- YuNiu. (n.d.). Vagueación/aerosol de la vagueación/SMC del) del Multi-fin del (de MultiEnd de la fibra de vidrio encima de vagar - fibra de vidrio de YuNiu. Retrieved March 24, 2022, from <http://www.fiberglassyn.mx/Vagueaci%C3%B3n-aerosol-de-la-vagueaci%C3%B3n-SMC-del-del-Multi-fin-del-de-MultiEnd-de-la-fibra-de-vidrio-encima-de-vagar-id546160.html>