

ANÁLISIS DE FALLA Y APTITUD PARA EL SERVICIO DE TUBERÍAS DE RESINA EPOXI REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO, ERFV

P. Fazzini ^a, E. Ayarzal^a, M. Santini ^a, A. Barrios^b

^aGIE S.A.-Área Integridad Mecánica – Argentina

^b YPF S.A. UN TDF

fazzini@giegroup.net, ayarzal@giegroup.net, santini@giegroup.net, a.barrios@ypf.com

Sinopsis

Se presentan tres casos típicos de fallas en tuberías de materiales compuestos, específicamente de resina Epoxi Reforzada con Fibra de Vidrio (ERFV), y un análisis de aptitud para el servicio de una línea que, al momento de ser analizada, no presentaba fallas.

En dos de los tres casos correspondientes a fallas de los tubos, la causa principal fue error de montaje. En todos estos casos, la vida útil del tubo se redujo de la estimación teórica entre cinco y siete años. Es por eso que, ajustarse a las recomendaciones del fabricante respetando los procedimientos de montaje y torqueado, se entiende como una premisa fundamental para garantizar el normal desempeño del tubo.

En el tercer caso, la falla del tubo se debió principalmente a la degradación de la matriz del material, producto de la exposición a altas temperaturas durante un tiempo considerable. Se supo que la muestra operó largo tiempo a una temperatura superior a su máxima temperatura de operación (MTO).

Finalmente, en el cuarto caso presentado, se analizaron ciertos parámetros característicos de los tubos que pueden ser identificados como “factores de riesgo” y que pueden indicar una degradación prematura del material por efectos térmicos.

Introducción

El objetivo principal del presente trabajo es exponer los modos de falla más típicos que ocurren en tuberías roscadas de materiales compuestos contruidos con Epoxi Reforzada con Fibra de Vidrio, ERFV (o *GFRP de sus siglas en ingles*), que se encuentran en la industria del petróleo. Al mismo tiempo, se presentarán los análisis necesarios para monitorear la aptitud para el servicio de líneas contruidas con materiales compuestos.

En primer lugar, y a fin de mostrar los casos de falla más típicos, se presentarán tres casos de falla ocurridas en materiales compuestos de matriz epoxídica.

Debido a que las fallas conllevan un gran costo asociado y producen efectos adversos sobre el medio ambiente, es necesario tomar acciones conducentes a prevenir su ocurrencia. Por un lado, es fundamental la ejecución de un Análisis de Falla, de modo de capitalizar la experiencia para prevenir futuras fallas. En ese sentido, se presentarán tres casos típicos de fallas en tubos de material compuesto.

A medida que se avanza con el conocimiento del sistema y de las causas principales de falla surge la necesidad de ir un paso más adelante mediante la ejecución de un análisis de aptitud para el servicio (FFS) y la determinación del estado de integridad mecánica de los componentes involucrados en cierto sistema.

Las tuberías ERFV tienen aplicaciones de todo tipo, ya sean líneas de conducción de petróleo crudo y/o gas, agua de recuperación, agua de proceso, líneas de transmisión y/o inyección, redes de incendio, etc. Sus principales características son la alta resistencia a la corrosión y a los depósitos de parafinas y/o carbonatos, baja pérdida de carga, la capacidad para ser desmontadas y vueltas a montar, bajo peso, no conductor eléctrico, además del bajo costo de manipuleo, instalación y transporte.

Por otro lado, no requieren instalación de protección catódica o revestimientos dieléctricos.

En el caso de los tubos de ERFV, existen una serie de parámetros que permiten identificar el grado de daño presente sobre la muestra analizada. La determinación del grado de daño permite concluir si el componente se encuentra en condiciones de continuar operando normalmente, si debe ser retirado de operación o si es necesario tomar acciones con el fin de extender su vida útil. Al respecto, se presentará finalmente un caso de análisis de aptitud para el servicio, realizado sobre un tubo que no manifestó la falla a simple vista.

En resumen, se presentarán cuatro casos concretos de análisis realizados sobre tuberías de ERFV, tal como se indica a continuación:

- CASO 1: Falla producida en rosca macho de una unión roscada.
- CASO 2: Falla producida en rosca hembra de una unión roscada.
- CASO 3: Falla de una línea que sufrió daños por temperatura y tensiones de piping.
- CASO 4: Aptitud para el Servicio de una línea en buen estado estructural.

El análisis de estos casos permitirá conocer los modos de falla típicos en estos materiales y la manera de ejecutar un monitoreo que conlleve a determinar el estado de integridad y la aptitud para el servicio de las líneas de ERFV.

Desarrollo

Caso 1: Análisis de falla producida en rosca macho

El análisis surge a partir de la necesidad de determinar la causa de la falla registrada en un tubo de epoxi reforzado con fibras de vidrio (ERFV base anhídrido) de 6" de diámetro y 5,59 mm de espesor de pared. La falla se manifestó como una desvinculación en la unión roscada entre ambos tubos. Para el análisis, se contó con ambos lados de la unión roscada, es decir, con la rosca macho y con la rosca hembra. (**Fig. 1.1**). En la **Tabla 1.1** se muestran las condiciones de operación de la unión y sus características.



Figura 1.1: Detalle de la unión roscada a ser analizada.

Sobre el tubo hembra se apreciaron múltiples sitios con pérdida de material, producto de un proceso erosivo en la zona de la rosca, particularmente sobre el diámetro externo. Se registraron rastros de rosca macho en los filetes de la rosca hembra. (**Fig. 1.2**).

En cuanto al tubo macho se detectaron pérdidas de espesor en la zona de la rosca, propio de procesos erosivos, así como la pérdida del material de los filetes (**Fig. 1.3**). La zona roscada posee una longitud total de 105 mm. Se distinguió una zona de 30 mm con faltante de material de rosca, la cual no muestra signos de erosión. Es a partir de estos 30 mm que comienzan a registrarse las pérdidas de material por erosión. Se encontraron múltiples zonas con falta de material de rosca, en donde se observa una superficie lisa y sin marcas de erosión.

Tabla 1.1: Características de la junta.

Tipo	flowline
Servicio	agua de formación
Diámetro	6"
Espesor de pared	5,59 mm
Rating	800 psi
MTO [°C]	65°C
Presión de trabajo [kg/cm ²]	35
Temperatura de trabajo [°C]	35-40°C

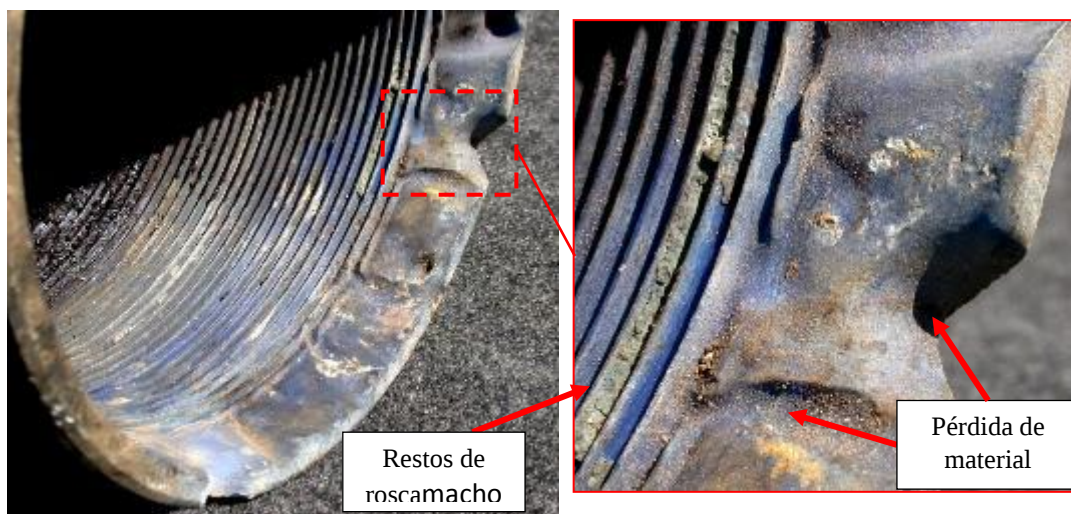


Figura 1.2: Tubo hembra. Se observan pérdidas de espesor localizada en la zona de la rosca y presencia de restos de rosca macho, así como la pérdida del material de los filetes.

Se realizó un corte longitudinal sobre la rosca macho, en una zona que conservaba parcialmente los filetes, para la observación microscópica. La microestructura del material base presenta una matriz de resina epoxi reforzada con fibras de vidrio, en la cual existe cierta porosidad debido a la incompleta expulsión de gases durante la fabricación del tubo. Mediante análisis de imágenes se calculó el diámetro medio de las fibras, como así también el porcentaje de poros sobre la matriz, lo cual se resume en la **Tabla 1.2**. Se aprecia un diámetro medio de 12.5 μm , y un porcentaje medio de porosidad que ronda el 1 %.

Se observó que el material de la rosca posee agregados que le confieren diferentes características a las del material base del tubo (**Fig. 1.3 y 1.4**). Sobre los valles y bases de los filetes de la rosca se encontraron numerosas fisuras en sentido del espesor. Estas fisuras se originaron en la interfaz rosca-matriz y produjeron la separación entre ambas caras. Se observó que las fisuras propagan a través de la interfaz entre la matriz epoxi y las fibras de vidrio. No se encontraron fisuras que propagaran desde la superficie interior del tubo.

Se encontraron fisuras de idéntica morfología, pero de mayor longitud (300-400 μm) y en mayor densidad sobre la sección del tubo con faltante de material. Nuevamente, estas fisuras se extienden en el sentido del espesor, observándose ramificaciones en algunos casos. Estas tienen origen en ambas superficies del tubo, con preponderancia desde la superficie exterior. (**Fig. 1.5**).

En resumen, las fisuras se iniciaron en la superficie o interfaz formada entre el material agregado de rosca y el material base del tubo. Se presume que dichas fisuras iniciaron por los esfuerzos de corte en la interfaz formada, que producen el despegue entre ambos materiales. A su vez, son estos mismos esfuerzos de corte los que producen la propagación.

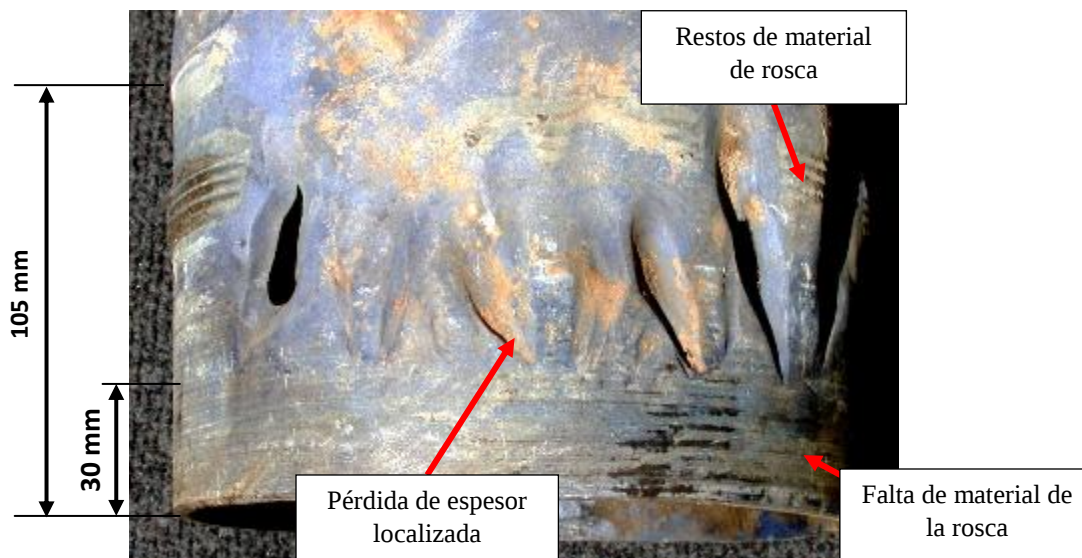


Figura 1.3: Tubo macho. Se observan pérdidas de espesor localizada en la zona de la rosca, así como en material de los filetes. Se indica la longitud de la zona roscada, y la longitud de zona con falta de material de rosca y sin erosión.

Tabla 1.2: Determinación de porosidad y diámetro de fibras.

Diámetro de fibras [μm]	12.5 ± 0.8
Porosidad [%v/v]	1.0 ± 0.3

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial sobre el material del tubo. Las probetas fueron cortadas orientadas cada 60° para obtener resultados representativos. Los resultados fueron comparados con valores estándar de lotes de iguales características, de donde surge que los valores medidos satisfacen los requerimientos establecidos para la tensión de rotura. Se muestra el resultado promedio de tres ensayos por muestra. **Tabla 1.3.**

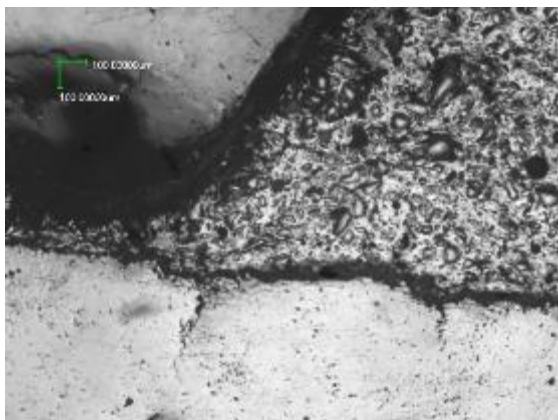


Figura 1.4: Micrografía de fondo de rosca. Se observan distintas microestructuras para la pared del tubo y los filetes de rosca, y fisuras que propagan a partir de la interfaz.

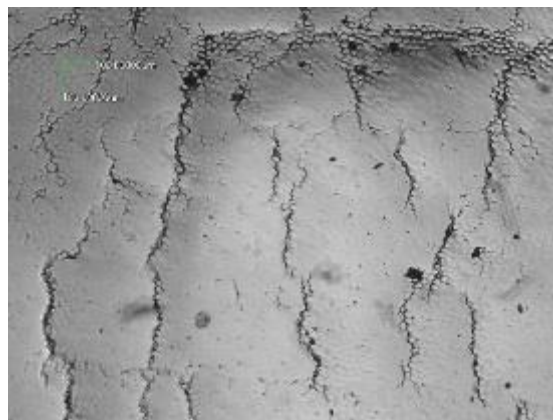


Figura 1.5: Micrografía de extremo del tubo. Se observa fisuración de igual morfología y mayor densidad. Se señala cambios de orientación de la propagación de las fisuras.

Tabla 1.3: Resistencia a la tracción.

Tubo Macho	76 ± 3 MPa
Tubo Hembra	77 ± 1 MPa

Conclusiones Caso 1

En el tubo macho se observaron múltiples sitios con pérdidas de espesor localizada en la zona de la rosca, a una distancia de 30 mm del extremo del tubo, propia de procesos erosivos. Se apreció que los filetes de la rosca se despegaron del material base dejando una superficie lisa y sin erosión.

Se cree que la secuencia de eventos que condujo a la falla fue la siguiente: arranque de filetes del tubo macho, pérdida de fluido transportado y posterior erosión con material particulado del suelo circundante.

En base a la inspección microscópica realizada sobre diferentes secciones del tubo, se puede concluir que las fisuras encontradas se iniciaron en la interfaz formada entre el material agregado de rosca y el material base del tubo, para luego propagar a través del espesor. Dichas fisuras iniciaron y propagaron por los esfuerzos de corte en la interfaz, conllevando al despegue entre ambos materiales.

Los esfuerzos que dieron lugar al despegue de la rosca pueden haber sido producto de un **excesivo torque durante el procedimiento de armado de las juntas, sumado a esfuerzos propios de la operación y tensiones de piping**. Tras el despegue del material de la rosca, el tubo macho se desplazó de su posición original, dando lugar a la fuga del fluido transportado a través de la rosca. Una vez fuera de su posición, la fuga de fluido en conjunto con el material del terreno, produjeron erosión externa sobre el tubo macho, hasta lograr perforar por completo el espesor de pared.

Los ensayos mecánicos mostraron que el material base del tubo posee una tensión de rotura que satisface con los requerimientos establecidos para este material. No se observó degradación térmica de la matriz de los tubos.

Caso 2: Análisis de falla producida en rosca hembra

En este caso, se determinaron las causas de falla en un tubo de ERFV de 3" de diámetro interno y 9.6 mm de espesor de pared. El tubo presentó daños apreciables a nivel macroscópico con pérdida de material en las cercanías de las roscas de unión (**Fig. 2.1**). En la **Tabla 2.1** se resumen las condiciones de operación y datos del tubo.

Se relevaron los defectos principales con el objeto de determinar sus dimensiones. Se observó que la totalidad de los defectos encontrados poseen una zona por donde fugó fluido transportado y zonas

en las que se aprecia una coloración más clara, que se debe a la delaminación de capas de fibras (**Fig. 2.1**). Los defectos no superan un tamaño de 46 mm, aproximadamente. Si bien uno de los defectos llega hasta el extremo del tubo, la zona en donde comenzaron los diferentes puntos de fugas se situó entre 17 y 75 mm del extremo del tubo hembra.

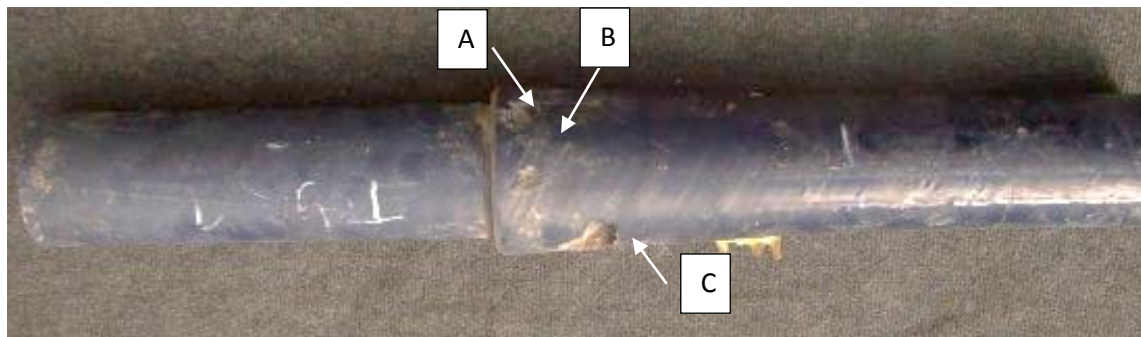


Figura 2.1: Tubos de ERFV 3" de diámetro interno y 9.6 mm de espesor de pared. Se indican los defectos volumétricos presentes en los tubos.

Tabla 2.1: Condiciones de la junta.

Tipo	Flowline
Servicio	Agua de formación
Diámetro	3"
Espesor	9.6 mm
Rating	2000 psi
MTO [°C]	65°C
Fecha Instalación	2010
Presión de trabajo [kg/cm2]	127
Temperatura de trabajo [°C]	20-25°C

Se detectaron fisuras en la pared del tubo hembra que propagan paralelas a las caras interna y externa. En la Fig. 2.3 se muestra el defecto C, donde se distingue la zona de fuga altamente erosionada, que dañó tanto la rosca hembra como la rosca macho (**Fig. 2.3 y 2.4**). Se aprecia que la erosión avanzó prácticamente la totalidad del espesor del tubo, dejando un ligamento de tan solo unas pocas capas de fibras.

Se practicó un corte longitudinal de tubo y se observó que la fisura que dio lugar a la fuga comenzó sobre el fondo de rosca del último filete de la rosca macho, y propagó por delaminación a lo largo de las capas de fibras hasta llegar a la superficie externa. Esta fisura es circunferencial y se encuentra en prácticamente todo el perímetro interno. Se encontraron fisuras secundarias en zonas en donde incluso no llega la rosca macho. (**Fig. 2.5**).

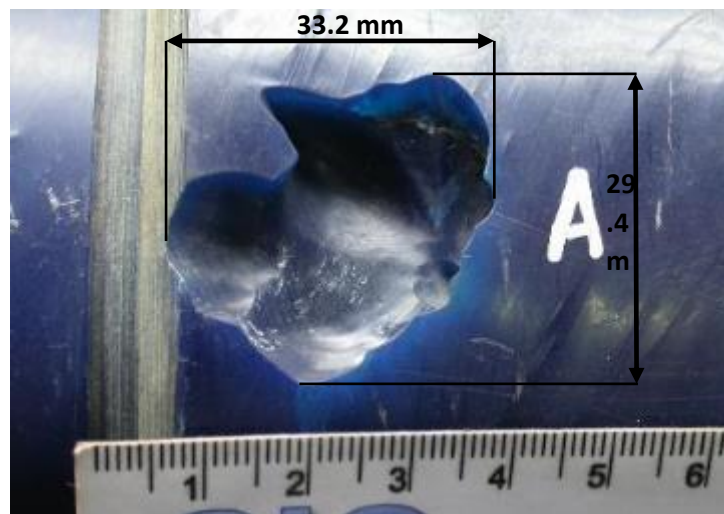


Figura 2.2: Dimensiones del defecto "A", referencia Figura 2.1.

Mediante inspección bajo microscopia óptica y electrónica, se analizó una de las fisuras secundarias situadas en el fondo de rosca y se detectó que dicha fisura comienza en una región sin fibras. Una vez iniciada propaga indistintamente por la interfaz fibra-matriz o bien atravesando fibras. (**Fig. 2.6**).

Se determinó el porcentaje, distribución y diámetro de fibras y el espesor de capa reforzada. Para esto se utilizaron aumentos que alcanzaron los 700x. Los resultados se resumen en la **Tabla 2.2**. El porcentaje de fibras se calculó a partir de 6 imágenes tomadas de diferentes zonas de material base. El espesor de las capas se obtuvo como promedio de 5 mediciones, mientras que el diámetro medio de las fibras se obtuvo en base a 10 determinaciones. Cabe destacar que el espesor de capa de fibras es poco homogéneo, en tanto que los restantes valores son típicos en este tipo de tecnología.

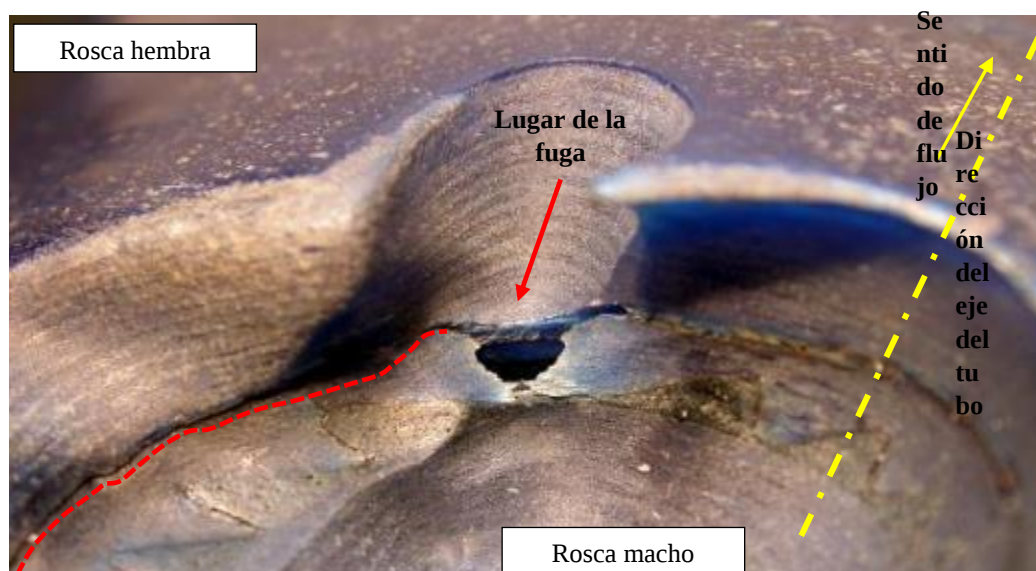


Figura 2.3: Se señala la zona de la fuga y fisuras propias de procesos de delaminación de fibras. Se observa una fisura en el espesor sobre la rosca hembra, y en la zona central la zona de la fuga.

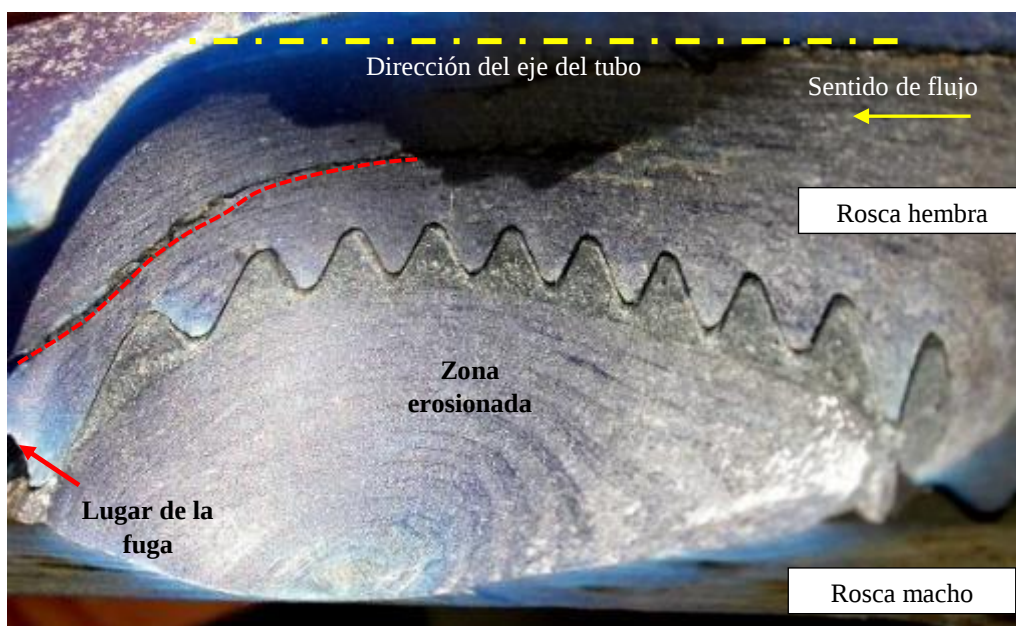


Figura 2.4: Se señala la zona de la fuga y fisuras propias de procesos de delaminación de fibras. Se observa una fisura en el espesor sobre la rosca hembra, y en la zona central la zona de la fuga.

Tabla 2.2: Porcentaje, distribución y diámetro de fibras y espesor de capa sin reforzar determinado bajo microscopio electrónico de barrido.

Porcentaje de fibras	Espesor de capa de fibras [μm]	Diámetro de fibras [μm]	Espesor de capa sin reforzar [μm]
62 ± 2	331 ± 100	24 ± 2	245 ± 57

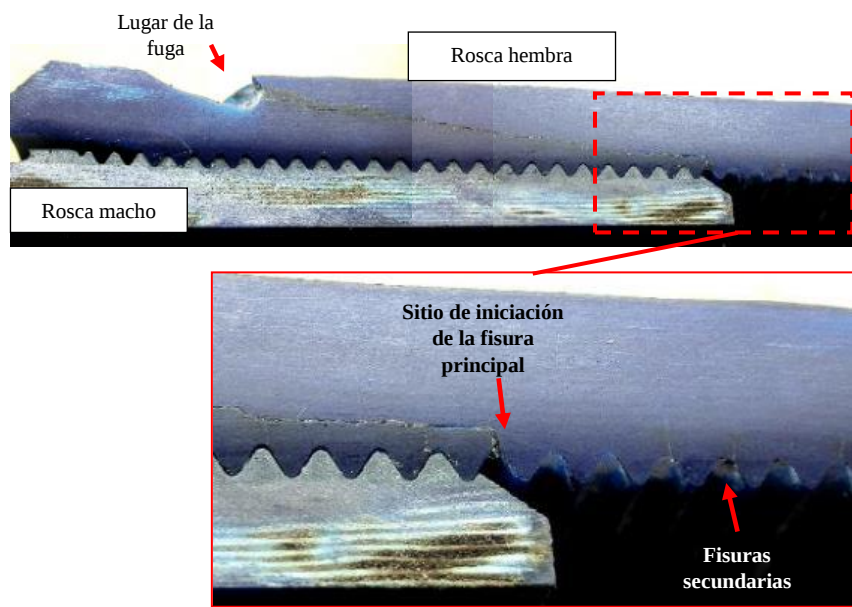


Figura 2.5: Corte longitudinal del defecto "C". Se observa el lugar de iniciación de la fisura principal, la propagación en el espesor y el lugar de la fuga. Se aprecian fisuras secundarias.

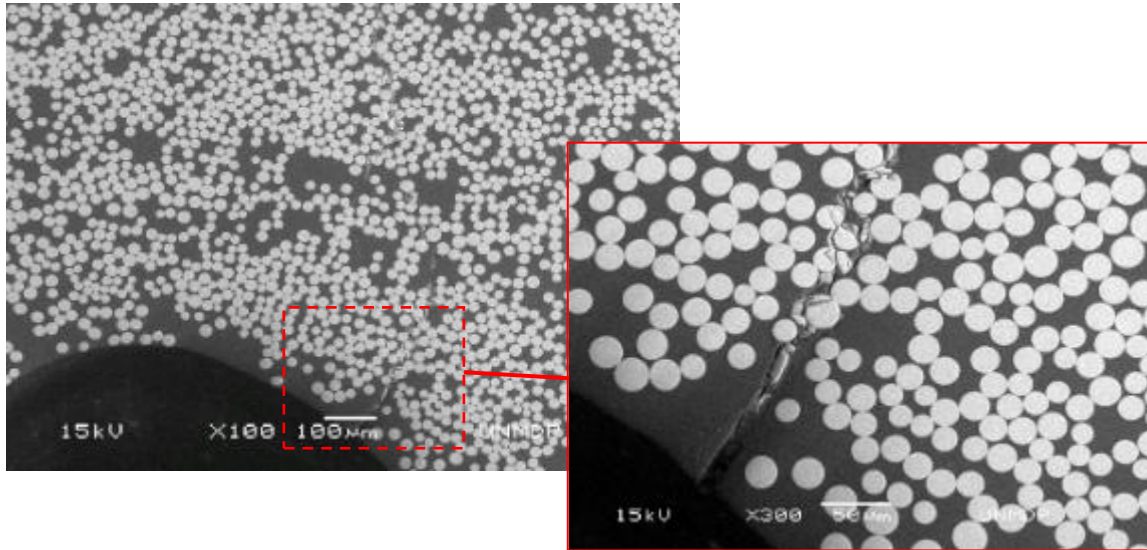


Figura 2.6: Filetes de la rosca, detalle de fisura secundaria. Se observa que la fisura comienza en una región sin fibras y propaga tanto por la interfaz fibra-matriz, así como también atravesando fibras.

Conclusiones Caso 2

Se encontraron múltiples defectos sobre la superficie externa, la totalidad de ellos sobre las roscas hembra. Se detectaron múltiples fisuras en el fondo de rosca hembra, las cuales propagaron tanto por la interfaz fibra-matriz como a través de las fibras.

Se encontró que la distribución de fibras en los filetes de la rosca hembra y el espesor de capa de fibras no es homogénea. Dichos sitios pueden haber otorgado puntos preferenciales de iniciación de las fisuras.

La fisura que dio lugar a la falla se situó sobre el final de la rosca macho y se encuentra en prácticamente en toda la circunferencia de la rosca hembra. Esto indica que **la fisura se inició tras un excesivo torque durante el procedimiento de armado.**

La fisura principal propagó a través del espesor y a lo largo del tubo mediante delaminación de capas de fibras asistida por esfuerzos inducidos por presión interna. Una vez que la fisura alcanzó la superficie externa, el fluido provocó erosión debido a la contención del suelo.

Por último, cabe aclarar que no se observó degradación térmica de la matriz de los tubos.

CASO 3: Análisis de Falla de una línea que sufrió daños por temperatura y tensiones de piping

Se presenta a continuación el estudio de la falla en tubo de ERFV de 2" de diámetro. El tubo se encontraba notoriamente curvado y con una coloración oscura en un sector.

El diámetro y espesor se incrementan hacia el extremo roscado. (**Fig. 3.1**). El máximo espesor medido resultó ser de 6,85mm en la zona de la rosca, mientras que el espesor nominal varía entre 1,85 y 2mm.

Las características del ducto analizado se resumen en la **Tabla 3.1**.

En la superficie externa, y desde la sección de mayor diámetro hasta el extremo del niple, se observó la presencia de restos de mortero cementicio adherido al tubo. Tanto desde la superficie externa como desde la interna, se observó una zona con infiltración severa de fluido, evidenciada por una coloración oscura. (**Fig. 3.2**).

Se realizaron cortes en distintas zonas del tubo y se prepararon muestras pulidas para ser observadas bajo microscopio óptico y electrónico (SEM). El material base del tubo presentó signos de delaminación entre capas y poros en la matriz. Cerca del 93% del total del espesor del tubo presentó refuerzo con fibra de vidrio, siendo el porcentaje de fibras cercano al 47% (valor calculado en material base sin delaminación). Este último valor se encontró por debajo del valor normal esperado para este tipo de material.

Tabla 3.1: Características del tubo analizado.

Tipo	flowline
Servicio	Petróleo + agua (1.5m ³ oil + 120m ³ agua)
Diámetro	2"
Rating	800 psi
MTO [°C]	65°C
Fecha Instalación	2002
Presión Trabajo [kg/cm ²]	5
Temperatura de Trabajo [°C]	67

El grado de porosidad (10,2%), calculado a partir del tratamiento digital de imágenes, resultó ser elevado.

Se observaron delaminaciones por infiltración en las tres secciones analizadas. Las delaminaciones se presentaron en diferentes sectores del tubo, lugares donde se evidenció poca adherencia de las fibras a la matriz, quedando aquellas al descubierto a simple vista. (**Fig. 3.3**).

Algunas de las capas de fibras, si bien se encuentran en buen estado, se observaron poco homogéneas en cuanto a su espesor, presentando una desviación de aproximadamente 14%. La

distribución de fibras también se detectó como poco homogénea, observándose zonas ricas en resina y otras ricas en fibras. Los resultados del análisis por imagen se resumen en **Tabla 3.2**.

Para determinar la resistencia y el módulo elástico en dirección longitudinal del material que compone los tubos, se extrajeron probetas de la superficie del mismo según norma ASTM D3039.

Tabla 3.3.

El módulo elástico se encontró en torno a los 11,8 GPa, valor que resulta aceptable para materiales compuestos tipo ERFV con secuencias de apilamiento de $\pm 54^\circ$. La resistencia a la tracción se encontró alrededor de 40 MPa, valor que se encuentra muy por debajo del esperado.

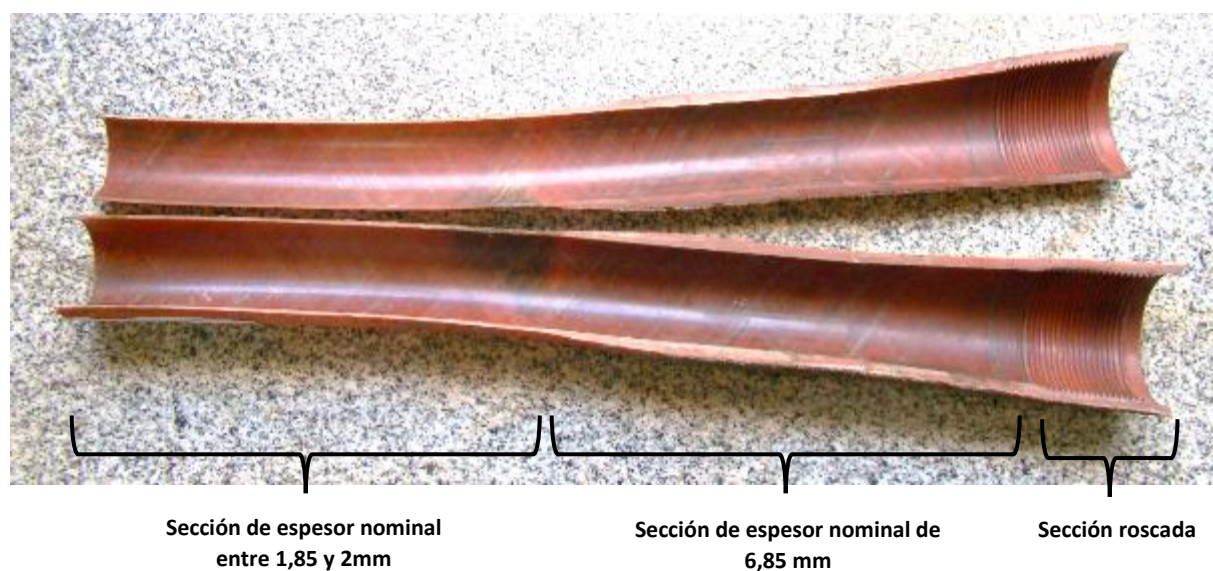


Figura 3.1: Tubo en condición de recepción.



Figura 3.2: Superficie exterior del niple. Se observa la porción con cemento adherido y la zona infiltrada, rodeada por un círculo.

Se determinó a su vez la Temperatura de Transición Vítrea (T_g) mediante la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), según lo sugerido por la norma API 15HR y ASTM D1519. Se tomaron a tal efecto muestras de la región interior y exterior de cada uno de los tubos. El material del tubo presentó en ambas superficies un pico endotérmico de baja temperatura ($<100^\circ\text{C}$), que podría relacionarse con la desorción de fluido absorbido. Los resultados de este ensayo se resumen en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.2: Resultados de análisis por imágenes.

Contenido de fibras [v/v%]	Porosidad [v/v%]	Espesor de capa de fibras [μm]	Diámetro de fibras [μm]	Espesor de pared no reforzada [μm]
47.00 ± 0.02	10.20 ± 1.32	282 ± 40	16 ± 2	190 ± 80

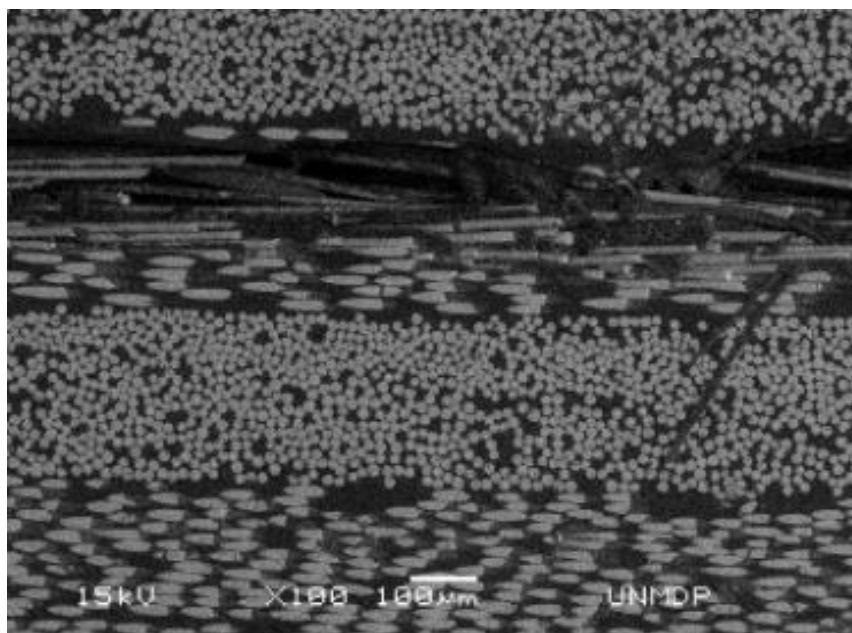


Figura 3.3: Corte transversal del tubo. Se observan zonas con delaminación entre fibras y resina. SEM x100.

Tabla 3.3: Propiedades mecánicas.

Muestra	Módulo elástico en tracción [GPa]	Módulo elástico promedio [GPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
M1	5,95		44,91	
M2	12,19		35,1	
M3	8,91	11,71 ± 4,36	40,98	40,75 ± 3,57
M4	14,73		42,14	
M5	16,81		40,62	

Tabla 3.4: Temperatura de transición vítrea.

Muestra	Lado interno [°C]	Lado externo [°C]
Progresiva 501	130.9	126.2

Conclusiones Caso 3

Se evidenció una zona con signos de infiltración que atraviesa todas las capas desde el interior del tubo hacia el exterior, sin signos de golpes o daño físico. La inspección visual interior mostró un grado de infiltración moderado evidenciado por las fibras teñidas.

El grado de porosidad interna resultó ser mayor al límite recomendado para este tipo de tubos. El contenido de fibras de refuerzo determinado por métodos ópticos evidenció que se encuentra por debajo de los valores recomendados. El análisis de la microestructura por métodos ópticos y electrónicos permitió observar la estructura interna de la secuencia de laminado, resultando poco homogénea y con numerosas infiltraciones entre capas y a través de ellas. El análisis por DSC mostró una temperatura de transición vítrea dentro de lo esperado. Por otro lado, la resistencia a la tracción se encuentra muy por debajo de los valores esperables para este tipo de tubos ERFV de matriz epoxi-anhídrido, mientras que el módulo elástico permanece en valores aceptables. **Se entiende que el tubo sufrió un proceso de degradación de la matriz producto de la exposición en el tiempo a alta temperatura.** Es menester, de todos modos, separar lo que fue causa de consecuencia. Las propiedades bajas probablemente sean consecuencia de la exposición a alta temperatura, pero los signos de porosidad y baja densidad de fibras, son falencias de fabricación que seguramente colaboraron en la falla.

Es necesario advertir que la porción del tubo que evidenció los más severos signos de infiltración fue precisamente la zona del cambio de sección entre espesor nominal y el comienzo de la transición cónica. Además, el daño se produjo en una zona donde no pueden desestimarse **la influencia de la sollicitación externa de flexión**, la cual puede haber generado las condiciones aptas para infiltración de fluido desde el interior al exterior del tubo.

CASO 4: Aptitud para el Servicio de una línea en buen estado estructural

Se presenta a continuación un resumen de las actividades realizadas para evaluar la aptitud para el servicio de un ducto de ERFV de 3" de diámetro, sin daño evidente a la vista. **(Fig.4.1).** Las características del ducto a analizar se resumen en la **Tabla 4.1.**



Figura 4.1: Muestra a analizar.

Tabla 4.1: Características del ducto.

Tipo	Oleoducto
Servicio	Petróleo+agua (47m ³ oil + 196m ³ agua)
Diámetro	3"
Rating	800 psi
MTO [°C]	65

Fecha Instalación

Junio 2000

Presión de trabajo [kg/cm²]	14
Temperatura de trabajo [°C]	38

A fin de evaluar la aptitud para el servicio, el operador seleccione sectores representativos de la línea, de donde se extrajeron muestras del ducto. Por ejemplo, el niple con rosca macho (izquierda en la Figura 5.1) fue cortado en dos mitades y limpiado para su inspección. El interior se encontró en buen estado, con una superficie interna relativamente lisa, con cierta rugosidad en las primeras capas de fibras debido al faltante de resina. Las primeras capas de la superficie interna, especialmente sobre una de las medias cañas observadas, se encuentran teñidas debido a una moderada infiltración de fluido. No se observaron ampolladuras de ningún tipo sobre dicha superficie. La superficie interna se encontró en buen estado, con excepción de algunas zonas donde se evidencian poros. (**Fig. 4.2**). Los poros se hallaron alineados siguiendo la dirección de la capa depositada de fibras, lo que permite inferir que pueden deberse a un defecto constructivo.

La superficie externa se encontró en buen estado, sin marcas de golpes o roturas. Se advirtieron zonas de fibras depositadas de manera irregular, defecto generado durante la fabricación del tubo.

A través del análisis digital de imágenes se pudo observar y determinar el porcentaje, distribución y diámetro de fibras y el espesor de capa reforzada. (**Fig. 4.3**). Para esto se utilizaron aumentos que alcanzaron los 700x. Los resultados se resumen en la **Tabla 4.2**.

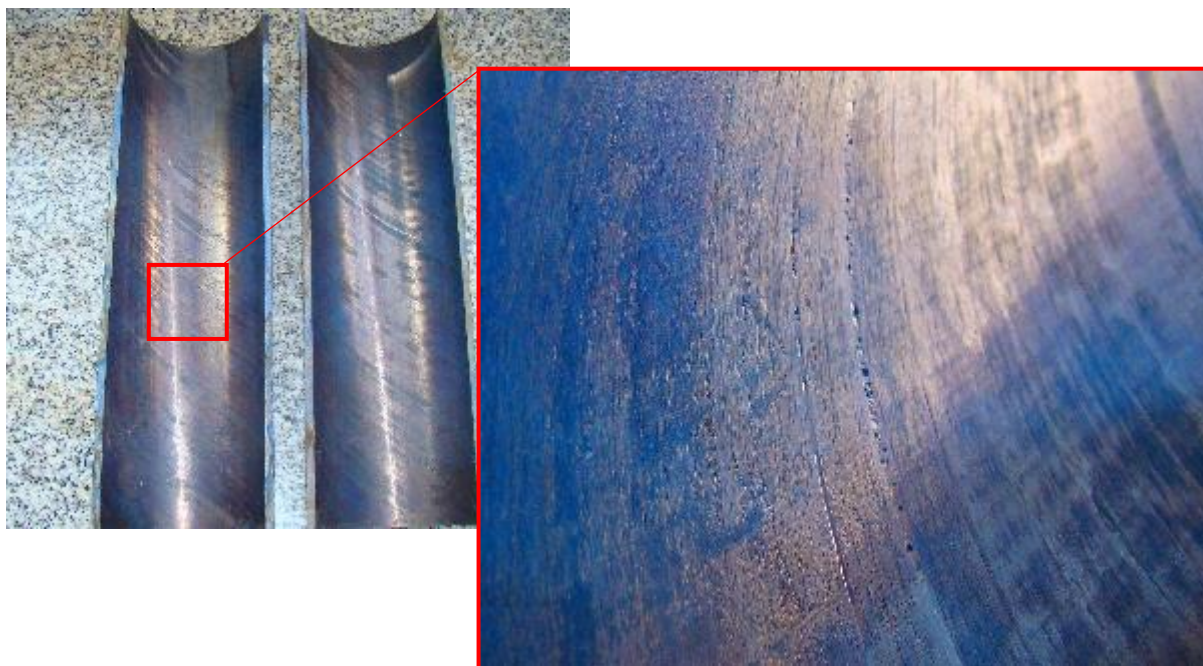


Figura 4.2: Poros encontrados en la superficie interna del tubo.

Se preparó una probeta metalográfica de una sección transversal del tubo, pudiendo notarse como, por encima de los poros superficiales, se genera una zona con decohesión de fibras generada por cierta infiltración de fluido.(Fig. 4.4).

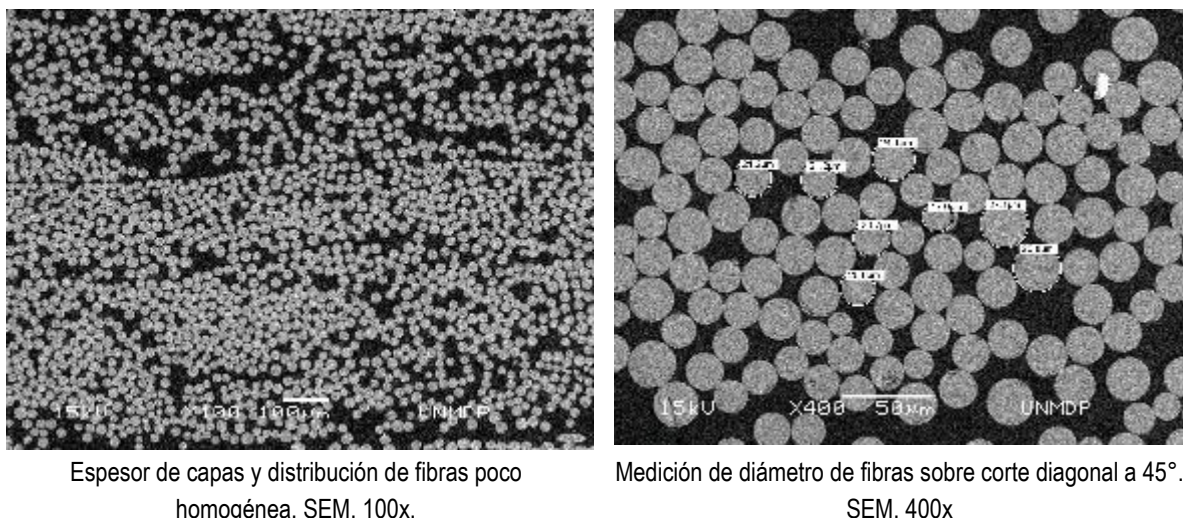


Figura 4.3.

Tabla 4.2: Porcentaje, distribución y diámetro de fibras y espesor de capa reforzada.

Contenido de fibras [v/v%]	Porosidad [v/v%]	Espesor de capa de fibras [μm]	Diámetro de fibras [μm]	Espesor de pared no reforzada [μm]
57 ± 4	2.5 ± 0.6	257.6 ± 13.6	21.5 ± 2.9	364.7 ± 45.2

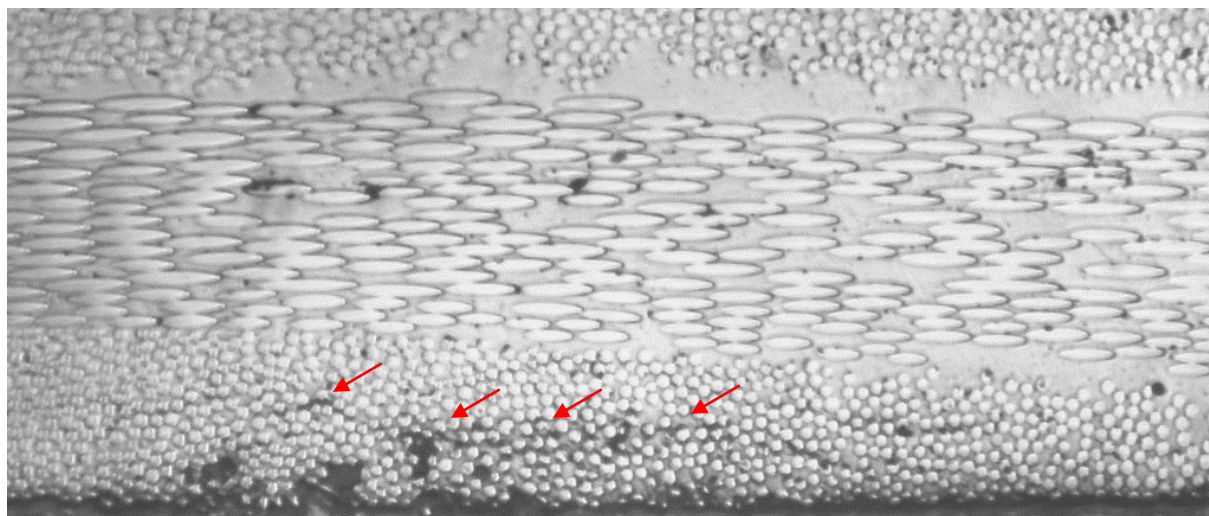


Figura 4.4: Porción con signos de decohesión de fibras. Microscopio óptico. 100X.

Los valores de resistencia a la tracción resultaron ser menores a los registrados sobre el mismo ducto en el año 2014, en donde la resistencia promedio fue de 72 MPa.

Se obtuvieron las temperaturas de transición vítrea en el orden de los 110 °C, valor aceptable, y se observaron picos endotérmicos irreversibles a temperaturas menores a 100°C, los cuales pueden estar relacionados con la desorción de fluido o especies de bajo peso molecular.

Los resultados de este ensayo se resumen en la **Tabla 4.4**.

Tabla 4.3: Resultados ensayo de tracción.

Tubular	Muestra	Módulo elástico en tracción	Módulo elástico promedio	Resistencia a la tracción	Resistencia promedio
		[GPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]
CS-LSB	M1	11.4	9.18 ± 1.49	63.29	63.20 ± 1.89
	M2	8.16		60.75	
	M3	8.51		65.38	
	M4	8.66		63.37	

Tabla 4.4: Temperatura de transición vítrea.

Muestra	Lado interno [°C]	Lado externo [°C]
Progresiva 5813 Pozo CS-LSB	110.7	107.3

Conclusiones Caso 4

El estado general del tramo de tubo analizado es aceptable. La inspección visual exterior indica un buen estado, sin signos de golpes o daño físico, a pesar de haberse observado deposición irregular de fibras. La inspección visual interior reveló que el mismo se encuentra en aceptable estado, pero observándose signos de infiltración entre capas de fibras más superficiales, cierta rugosidad y zonas con faltante de resina.

El grado de porosidad interna resultó aceptable, por debajo del límite recomendado, aunque se detectaron zonas con poros con acceso a la superficie interna del tubo. El contenido de fibras de refuerzo se encuentra dentro de los valores recomendados. El análisis de la microestructura por métodos ópticos y electrónicos permitió observar la estructura interna de la secuencia de laminado, resultando la misma poco homogénea.

El análisis por DSC mostró una temperatura de transición vítrea dentro de lo esperado. La resistencia en tracción y el módulo elástico se encuentran por debajo de los valores aceptables para este tipo de tubos ERFV, siendo menores que el valor informado por el fabricante.

Los ensayos mecánicos realizados arrojaron valores de módulo elástico y resistencia a la rotura menores a los esperados para este tipo de materiales. La resistencia a la tracción se redujo en un 13% entre el análisis del 2014 y el de 2016, cayendo de 72 MPa a 63,2 MPa.

En base al análisis realizado, y asumiendo que el material analizado es representativo del estado de la sección del ducto, se consideró que el material es apto para continuar en servicio para las mismas condiciones de operación. Si bien el material se encuentra en buen estado general, el faltante de resina observado en algunas zonas, sumado a los signos de porosidad en la superficie interna y la disminución de las propiedades mecánicas representan factores de riesgo que deben ser monitoreados de cerca.

Conclusiones generales

Se han presentado a modo de resumen tres casos típicos de fallas en tubulares de ERFV y un análisis de aptitud para el servicio de una línea que no presentaba falla al momento de ser analizada.

En dos de los tres casos correspondientes a fallas de los tubos, el causante principal estuvo relacionado a deficiencias de montaje, en particular, un torque excesivo. En todos estos casos, la vida útil del tubo se redujo de la estimación teórica entre cinco y siete años. Es por eso que ajustarse a las recomendaciones del fabricante, respetando los procedimientos de montaje y torquizado, se entiende como una premisa fundamental para garantizar el normal desempeño del tubular.

En el caso 3, la falla del tubo se debió principalmente a la degradación de la matriz del material, producto de la exposición del mismo a altas temperaturas durante un tiempo considerable. Se supo que la muestra operó largo tiempo a una temperatura superior a su MTO.

Finalmente, se analizaron ciertos parámetros característicos de los tubos que pueden ser identificados como “factores de riesgo” y que pueden indicar una degradación prematura del material por efectos térmicos.

La degradación térmica se refiere a los procesos físicos y químicos que ocurren en polímeros a elevadas temperaturas. El aumento de temperatura acelera la mayoría de los procesos de degradación que ocurren en polímeros tales como la oxidación, ataque químico y creep mecánico. El proceso de la degradación térmica normalmente involucra un largo período de inducción durante el cual un deterioro muy pequeño es observado. Al final de este período se experimenta un rápido aumento en la degradación que conduce a una reducción significativa en las propiedades mecánicas del polímero. Este período de inducción es sensible a la temperatura y se reduce significativamente a temperaturas elevadas, normalmente puede ser considerado como el tiempo de vida útil del polímero.

Esta tendencia de degradación se muestra claramente en la **Fig. 5.1**, extraída de la norma ISO 2578 – “*Plastics -- Determination of time-temperature limits after prolonged exposure to heat*”, donde se grafica la pérdida relativa de una propiedad analizada (por ej. el módulo elástico) en base a la exposición durante un período de tiempo a diferentes temperaturas. Este tipo de curvas se realiza para cada tipo de material en condiciones aceleradas y luego se usan para extrapolar los resultados a la vida útil del tubo.

La evaluación del grado de deterioro sufrido durante la operación de tubulares de ERFV requiere la comparación de los resultados obtenidos con los provenientes de la caracterización del tubular al momento de la compra/recepción/instalación. Es decir, se requiere un valor de referencia para cuantificar el deterioro en las propiedades a causa de las características de la vida en servicio del material. Esta comparación con el material “virgen” suele ser difícil de ser llevada a cabo, dado que por lo general no se cuenta con el material disponible. Es por eso que, al no contar con los valores de la caracterización inicial, los resultados de los ensayos realizados pueden compararse sólo con datos recogidos a partir de la experiencia.

Como se ha visto en los casos 3 y 4, la incorrecta distribución de capas de fibras y resina, la presencia de porosidad y de fisuras por delaminación de capas, la disminución de la resistencia a la tracción, entre otros, son indicios de una disminución en la performance del tubo. Una vez detectados es necesario evaluar si el tubo debe ser descartado y si se deben modificar las condiciones de operación.

Resulta muy común en la industria el desconocimiento de las propiedades y características de los tubos instalados. Del mismo modo, resulta aún más común el desconocimiento del grado de degradación que puede tener la tubería por haber sido sometida a condiciones de operación severas. La realización periódica de ensayos de aptitud para el servicio como el planteado en los casos 3 y 4, permite al operador disponer de un análisis de base que pueda utilizarse como comparación futura del estado de su línea. De este modo se puede conocer fehacientemente si las condiciones de operación del tubo están afectando la integridad de la línea y si traerán consecuencias al corto o mediano plazo, evitando salidas de servicio imprevistas y sus gastos asociados.

Como regla general, se recomienda a los operarios realizar controles de calidad de las partidas de tubos en el momento de la recepción. Alternativamente, conservar muestras sin utilizar de cada partida de tubos, debidamente identificadas y almacenadas, que sirvan de referencia en el futuro.

La determinación de los modos de falla fue realizada por el personal experto de GIE y dichos ensayos son recomendables toda vez que deba lograrse una estimación de la vida remanente y un procedimiento de montaje.

Los problemas que trae aparejados la rotura de un flowline son conocidos por cualquier operador. Pérdidas de producto, costos de reparación y saneamiento, multas, etc son parte de los costos asociados a una falla. Una simple estimación económica del costo de reemplazo de un tubo fallado, contemplando los costos de repuestos, mano de obra específica, maquinarias, horas de supervisión y sumado a la remediación ambiental de una fuga, asciende fácilmente a un valor que ronda los AR\$ 188.000.

Por otro lado, si una línea de conducción típica de unos 750m de longitud se ve afectada por la temperatura de trabajo y es requerido hacer el reemplazo total de la línea, el costo puede rondar los AR\$ 800.000. A este valor debería sumarse otros factores como lo son la producción diferida, debido a la gestión de permisos gubernamentales y ante el superficiario. Hoy en día la autorización del tendido de un ducto demora entre 75 y 90 días en el mejor de los casos.

Los altos costos asociados, directa e indirectamente, a una falla sitúan a los análisis de integridad en una posición clave para operar ductos plásticos eficientemente, de forma rentable y segura. Debido a los altos cortes de agua que hoy maneja la industria del petróleo, es indispensable, en este tipo de ductos, el continuo monitoreo de las temperaturas en el inicio de cada uno y de sus propiedades a lo largo de la vida del activo, previniendo fallas y garantizando la disponibilidad operativa de las líneas.

Se plantea en la **Tabla 5.1** un resumen de las fallas registradas durante los últimos diez años. Puede notarse que, en el recuento, el daño por temperatura resulta ser el más pernicioso, seguido por las fallas en roscas hembras y machos producto de instalaciones incorrectas. A partir de la experiencia, se pueden plantear algunas reglas empíricas para aumentar la vida de las tuberías plásticas. Manteniendo la temperatura de trabajo entre el 91-93% de la MTO otorgada por el fabricante y las presiones de trabajo entre el 92-94% de la MPO otorgada por el fabricante se ha disminuido la tasa de fallas.

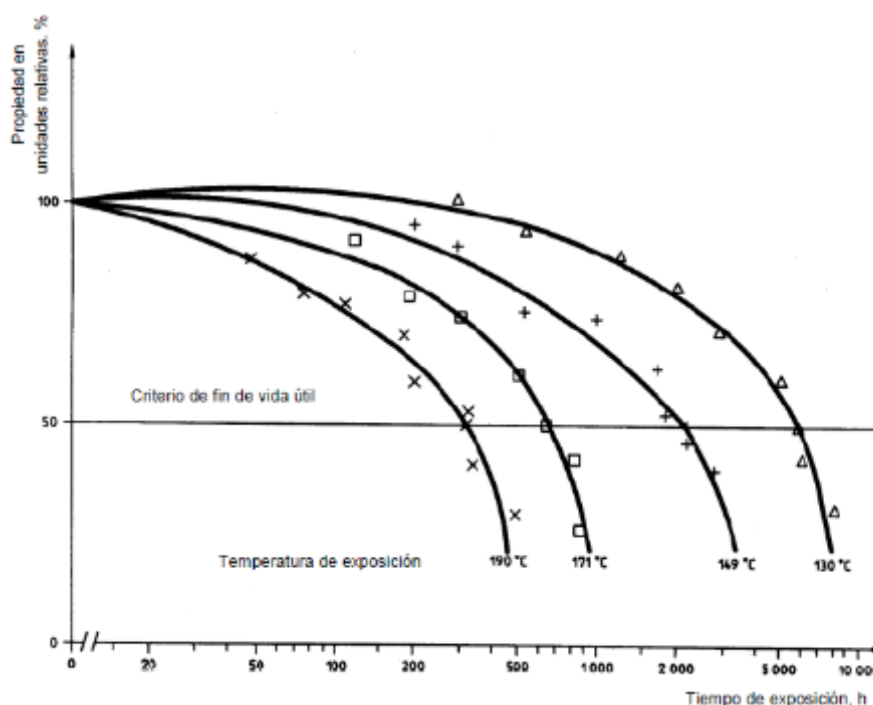


Figura 5.1: Determinación del tiempo de falla para cada temperatura de exposición. Fuente: ISO 2578 – 1993.

Tabla 5.1: Recuento de fallas en tuberías plásticas.

CAUSA	AÑO											TOTAL
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Instalación (Rosca Cruzada)	1		2				1		1		1	6

Falla en rosca macho	1		1	3		1	1		1	8	
Daño por Temperatura		1	4		1	3			2	1	12
Daño por terceros			1		1	1	2			2	7
Falla en rosca hembra			1			1	3		1	2	8
Instalación (Junta Errónea)			1	1			1				3

Bibliografía

- Failure analysis and fractography of polymer composites. Emile S. Greenhalgh. 2009, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.
- Informes de análisis de falla y aptitud para el servicio realizados por GIE e YPF.

Curriculum vitae

Pablo Fazzini



Ingeniero Mecánico graduado de la Universidad Nacional de Mar del Plata en el año 2000. Es investigador y profesor adjunto en la Universidad. Ha realizado más de 20 publicaciones en revistas científicas tecnológicas. Se desempeña como Gerente de la Unidad de Negocios Integridad Mecánica en Gie S.A, con 16 años de experiencia y más de 100 proyectos dirigidos, en proyectos que involucran trabajo de campo y de laboratorio para la realización de análisis de falla, ACR, análisis tensional y evaluación de materiales.

Ezequiel Ayarzabal



Ingeniero en Materiales graduado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Desde hace 4 años se desempeña en GIE como analista de integridad mecánica, llevando a cabo proyectos de análisis de falla de ductos y componentes mecánicos. Es inspector nivelado en Ensayos No Destructivos según SNT-TC-1A. Encargado técnico de numerosos proyectos de corrosión en ductos, en análisis de falla de materiales compuestos de ERFV y componentes mecánicos. Curso presencial NACE “Corrosion Control in the Refining Industry”, Houston, 2015.

Marcelo Santini

Ingeniero Mecánico graduado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad



Nacional de Mar del Plata. Desde hace 4 años se desempeña en GIE como ingeniero analista en el área de Integridad Mecánica, llevando a cabo proyectos de Análisis de Cauda Raíz y Análisis de Falla de ductos y componentes mecánicos. Desde el año 2014 se ha especializado en investigaciones de eventos no deseados mediante la metodología Análisis de Causa Raíz, tanto en Argentina como en Perú.



Ariel Barrios: Ingeniero Químico graduado en de la Facultad Regional Río Grande de la Universidad Tecnológica Nacional; Desde 2008 se desempeña como responsable del Departamento de Integridad, liderando la Gestión de Corrosión, Productos Químicos, Ensayos ICDA/ECDA, Mantenimiento de Ductos y Estáticos; Desde 2009, se ha desarrollado como Ingeniero de Producción, diseñando y optimizando instalaciones de superficie; Ensayos dinamométricos, manejo de contaminante metálicos en fluidos de producción. Actualmente ocupa el cargo de Jefe de Ingeniería de Integridad en la UN TDF.