

COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE TRES TIPOS DE REPARACIONES PARA DUCTOS EN EL CONTROL DE LAS DEFORMACIONES EN DEFECTOS DE CORROSIÓN EXTERNA

M.A.Rosas, DNV GL, marco.perez@dnvgl.com
M.Rodrigues, DNV GL, marcos.rodrigues@dnvgl.com
R.D.Vieira, PUC-Rio, rdvieira@puc-rio.br
J.L.F.Freire, PUC-Rio, jfreire@puc-rio.br

Sinopsis

Este artículo tiene como objetivo comparar la eficacia de tres tipos diferentes de reparaciones comúnmente utilizados en ductos para transporte de hidrocarburos. Se presenta un estudio de las deformaciones actuantes en tres tubos, en los cuales fueron fabricados defectos para simular corrosión externa, luego fueron aplicados reparos en la región defectuosa. Estas reparaciones utilizan mangas de fibra de vidrio, fibra de carbono y camadas metálicas coladas. Las deformaciones presentes en la región del defecto y fuera del defecto fueron medidas con extensómetros de resistencia eléctrica. Con estos resultados fueron hechas análisis para determinar la eficacia de estos tres tipos de reparaciones en el control de las deformaciones en región del defecto.

1 - Introducción

En los últimos años, reparaciones de material compuesto son utilizados en la industria como una alternativa efectiva para la recuperación de ductos. Estos ofrecen varias ventajas sobre las reparaciones metálicas que utilizan soldadura para su instalación. El estudio “Analysis of a Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System” /1/, muestra que los reparos de material compuesto son, en promedio, 24% más económicos que las reparaciones de duplo canalón metálico soldado y 73% más económico que la sustitución de la sección defectuosa.

La reparación de material compuesto prácticamente consiste en envolver la sección defectuosa con fibra de alta resistencia en una matriz de resina. Las fibras normalmente utilizadas son: fibra de vidrio (GRP), fibra de carbono (CFRP) y fibra de aramida (AFRP) /2/. La matriz (que junto con las fibras forman el material compuesto) puede ser: poliéster, viniléster y epoxi, siendo este último el más utilizado /2/. La reparación de láminas metálicas coladas consiste en reforzar la sección defectuosa con chapas finas de acero coladas con adhesivo epoxi, estas chapas pueden ser aplicadas de forma continua o camada por camada /3/.

Este estudio buscó determinar cuál tipo de reparación consigue restringir de manera más eficiente las deformaciones que se presentan en la región defectuosa, especialmente desde el régimen elástico del material, ya que, otros trabajos pueden ser encontrados donde la efectividad de los reparos es efectuada teniendo como parámetro de comparación la presión de ruptura de un ducto sin defecto, ignorando las deformaciones presentes en la región del defecto, las cuales, dependiendo del tipo de operación del ducto, pueden ser bastante críticas. Este estudio también muestra que el control de las deformaciones en la región defectuosa depende del módulo de elasticidad y del espesor de la reparación utilizado, como indicado en la referencia /3/.

2 – Procedimiento Experimental

2.1 – Geometría de los Cuerpos de Prueba Tubulares

Para la fabricación de los cuerpos de prueba tubulares fueron utilizados segmentos de tubo de acero de clasificación SAE 1020 con 3 pulgadas de diámetro nominal, como muestra la Figura 1 y Tabla 1.

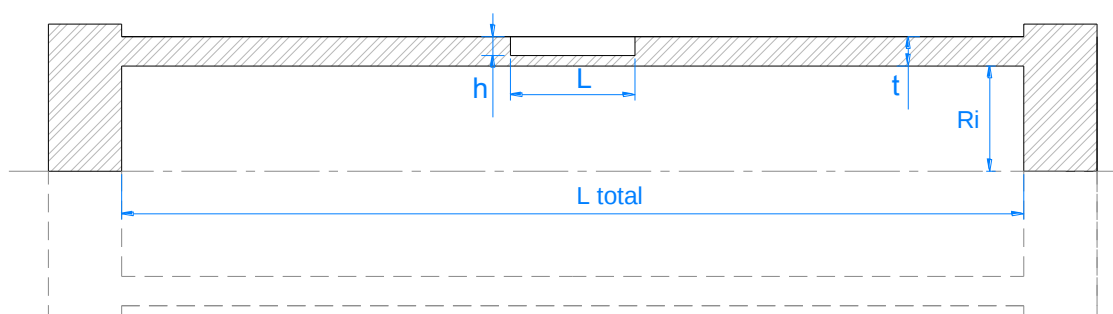


Figura 1 – Geometría de los cuerpos de prueba tubulares

Tabla 1 – Geometría de los cuerpos de prueba tubulares

	Cuerpo de prueba reparado con chapa metálica	Cuerpo de prueba reparado con fibra de carbono	Cuerpo de prueba reparado con fibra de vidrio
Radio interno del tubo, R_i (mm)	36.1	35.7	35.7
Espesor de pared, t (mm)	2.0	2.2	2.2
Longitud del cuerpo de prueba, L_{total} (mm)	600	602	590
Profundidad del defecto, h (mm)	1.4	1.5	1.2
Longitud del defecto, L (mm)	75	80	80
Ancho del defecto (mm)	14	14	14

2.2 – Caracterización de los Materiales

Fueron realizados ensayos de tracción del material de los tubos y de las reparaciones utilizadas. Para la fabricación de los cuerpos de prueba de los tubos y de la chapa metálica fue utilizada la norma ASTM A370 /5/ y para los cuerpos de prueba de material compuesto de fibra de vidrio y fibra de carbono fue utilizada la norma ASTM D3039 /6/. En todos los casos fueron confeccionados tres cuerpos de prueba para obtención del valor representativo. Los ensayos fueron realizados en el ITUC - Instituto Tecnológico de la PUC-Rio.

En la Tabla 2 son presentados los valores medios de los testes de tracción del material de los tubos utilizados.

Tabla 2 – Propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba tubulares

	Cuerpo de prueba reparado con chapa metálica	Cuerpo de prueba reparado con fibra de carbono	Cuerpo de prueba reparado con fibra de vidrio
Límite de fluencia S_y (MPa)	263	332	332
Resistencia a tracción S_u (MPa)	310	365	365
Deformación máxima (%)	34	19	19

En la Tabla 3 son presentados los valores medios de los testes de tracción de las reparaciones de fibra de vidrio, fibra de carbono y chapa metálica

Tabla 3 – Propiedades mecánicas de los materiales de las reparaciones utilizadas

	Chapa metálica	Material compuesto Fibra de carbono	Material compuesto Fibra de vidrio
Límite de fluencia S_y (MPa)	168	-	-
Resistencia a tracción S_u (MPa)	295	1330	228
Módulo de elasticidad (GPa)	200	95	14
Deformación máxima (%)	35	1.4	2.1

En la Figura 2 son presentados los gráficos Tensión vs deformación de los ensayos de tracción da chapa metálica, material compuesto de fibra de carbono y fibra de vidrio.

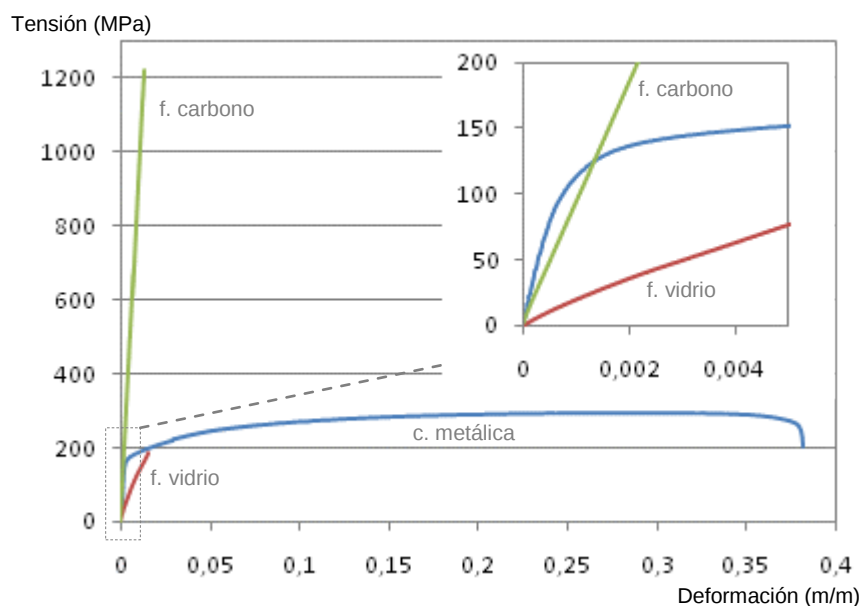


Figura 2 – Tensión vs deformación en los materiales de las reparaciones utilizadas

2.3 – Instrumentación de los Cuerpos de Prueba Tubulares

Para medir las deformaciones fueron utilizados extensómetros de resistencia eléctrica. los extensómetros localizados en los defectos son de marca TML tipo YEFLA-5, estos sensores soportan grandes deformaciones. Estos fueron colados con adhesivo epoxi Araldite AV 138 y endurecedor HV 998 fabricado pela empresa Huntsman. Los extensómetros localizados en las regiones fuera de la reparación (donde no existe defecto) son de la marca KYOWA tipo KFG-5-120-C1-11, y para su instalación se utilizó el adhesivo Loctite 496.

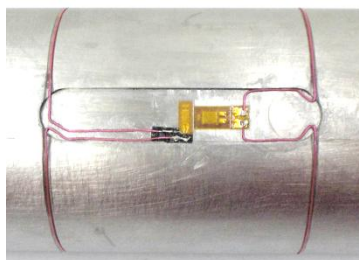


Figura 3 – Instalación de los extensómetros

2.4 – Dimensionamiento de las Reparaciones

Para la determinación del espesor de las reparaciones fue utilizado el procedimiento de la referencia /3/. En el caso de las reparaciones de material compuesto son impuestos los siguientes dos criterios para su dimensionamiento:

(a) La ruptura debe acontecer fuera de la región reparada y (b) el nivel de tensión alcanzado en el reparo no debe ser mayor que el 50% de su resistencia última a tracción, como indicado en la norma ISO/TS 24817, sección 4.5.2 /3/.

Para la determinación del espesor necesario de la reparación de chapa metálica también son impuestas las siguientes dos condiciones:

(a) La ruptura debe acontecer fuera de la región reparada y (b) y el nivel de tensión alcanzado en la reparación no debe superar el 72% de su resistencia última a tracción.

Los espesores de reparación calculados son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4 – Espesores de reparación calculados utilizando el procedimiento de la referencia /3/

	Chapa metálica	Fibra de vidrio	Fibra de carbono
Espesor calculado (mm)	2	4.1	1.6

Utilizando el modelo analítico de la referencia /3/ se obtienen las tensiones equivalentes (von Mises) actuantes en el defecto, en el reparo (arriba del defecto) y en epoxi que llena el defecto. También son calculadas las presiones que ocasionan la ruptura y la fluencia en cada uno de los componentes del conjunto tubo-reparación

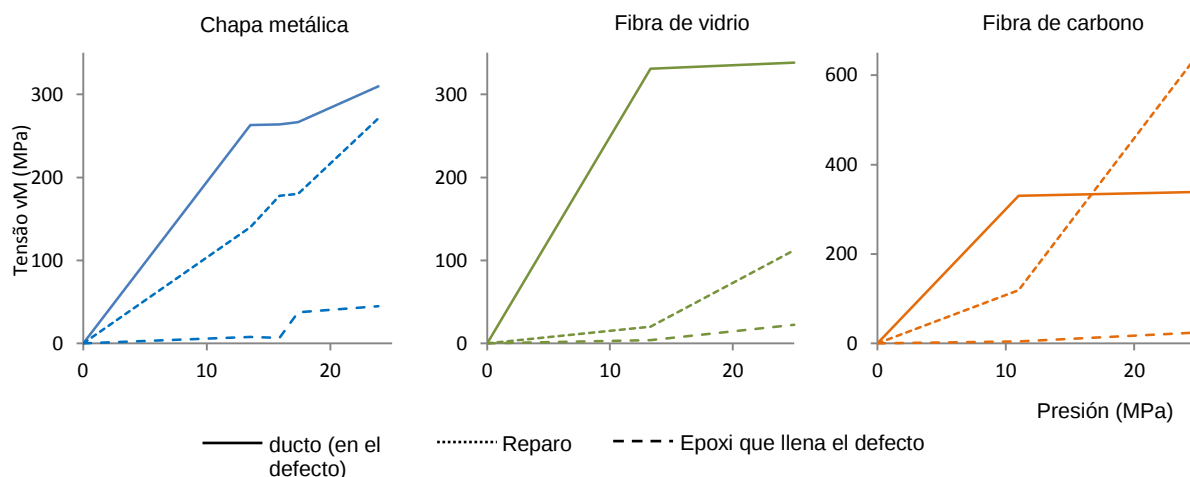


Figura 4 – Gráficos Tensión equivalente vs Presión interna obtenidos con el modelo analítico de la referencia /3/

Las tensiones máximas alcanzadas por las reparaciones son:

- 271MPa - chapa metálica (alcanza una tensión superior la recomendada, 90%>72%)
- 112MPa - fibra de vidrio (alcanza una tensión próxima la recomendada, 49%<50%)
- 648MPa - fibra de carbono (alcanza una tensión próxima la recomendada, 48%<50%)

Existen algunos otros criterios para el dimensionamiento de la reparación para ductos que pueden ser utilizados, por ejemplo, (c) limitar la deformación circunferencial máxima del reparo de material compuesto a 0.25%, de acuerdo con la norma ISO/TS 24817 /2/ y (d) limitar la deformación de la

pared del tubo en el defecto a 1%. Estas condiciones pueden ser satisfechas mudando los parámetros módulo de elasticidad del material de la reparación y el espesor de la reparación utilizada.

2.5 – Ejecución de los Testes Hidrostáticos

Los testes experimentales fueron realizados en el laboratorio de Fotomecânica e Comportamento Mecânico dos Materiais da PUC-Rio, que posee una instalación adecuada para testar cuerpo de pruebas tubulares sobre presión interna.

La presión es proporcionada por una bomba hidráulica de pistón Haskel NS-110 accionada por aire comprimido. El flujo de líquido de la bomba es controlada por una válvula manual que regula la entrada de aire. Las presiones de la entrada de aire y salida de agua son medidas por manómetros tipo Bourdon. La presión hidrostática es monitoreada por un transductor de presión.

El sistema de adquisición de datos permite leer y registrar presiones y deformaciones en función del tiempo. El sistema es formado por un módulo adquisidor de 16 entradas analógicas, marca Lynx, modelo AI-2160 que permite la conexión de señales provenientes de los extensómetros eléctricos y del transductor de presión. El transductor de presión trabaja con una fuente de tensión propia, marca Goldstar DC Power Supply GP-430 3D. Por último, es adicionada una cámara de video para reconocer el tipo de falla que se presenta en el cuerpo de prueba.

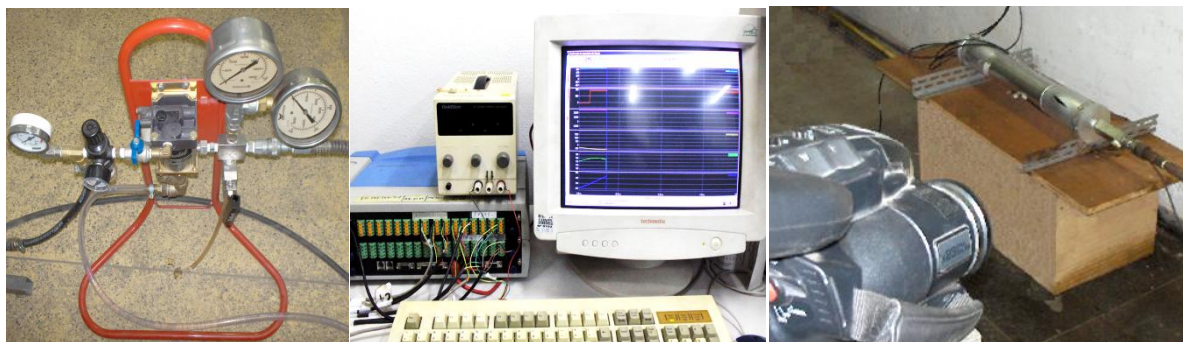


Figura 5 – Dispositivo experimental

3 – Resultados

En los cuerpos de prueba reparados con chapa metálica y material compuesto de fibra de carbono, la falla ocurrió fuera de la sección reparada, en la región sin defecto. El cuerpo de prueba reparado con material compuesto de fibra de vidrio, la falla ocurrió en la soldadura existente entre la tapa metálica y el cuerpo del tubo, más esto no influenció en el análisis de los resultados ya que la falla ocurrió a una presión tan alta como la presión que provoca la ruptura de un ducto sin defecto.

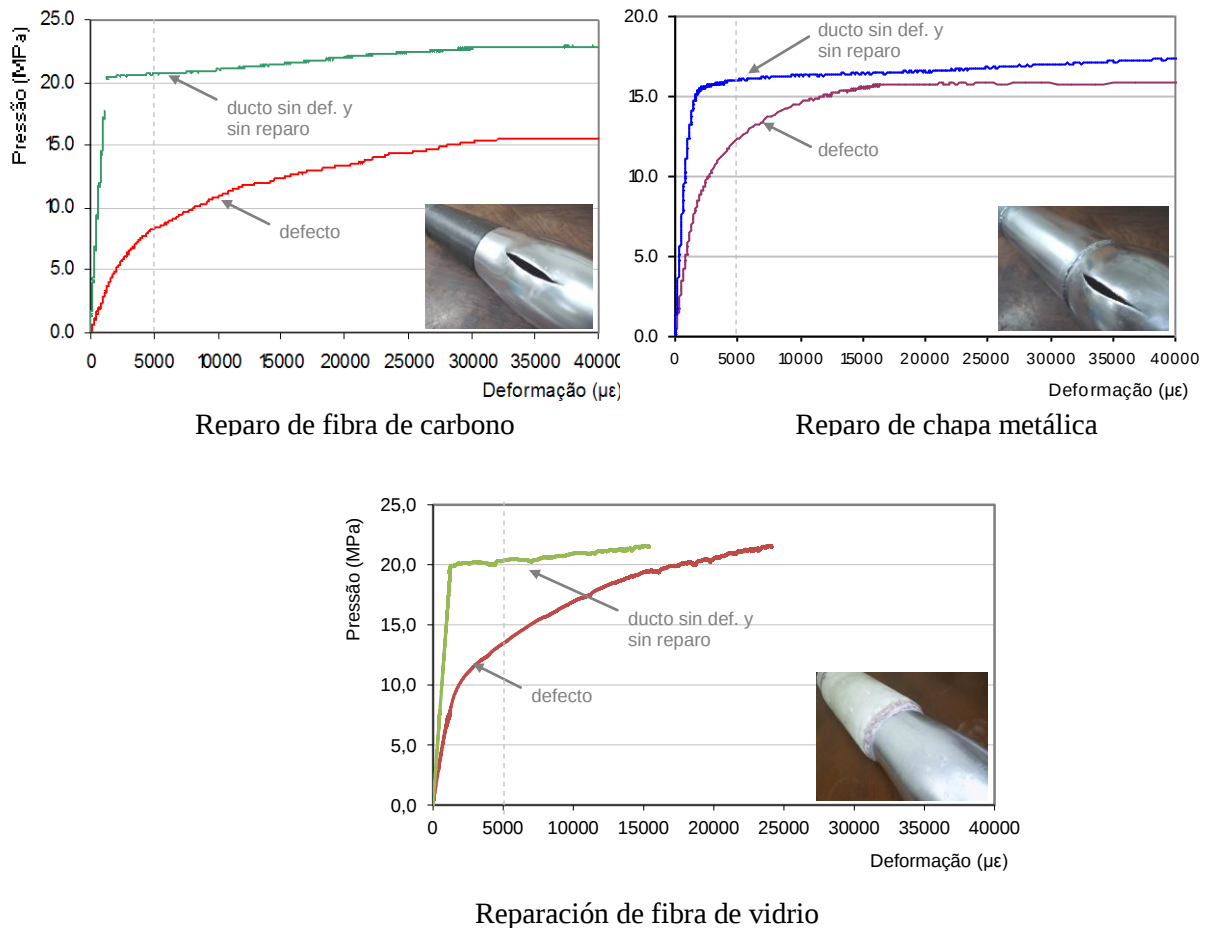


Figura 6 – Comparación das deformaciones en la reparación de chapa metálica y material compuesto

En la Figura 7 se presentan los resultados de la Figura 6 de forma adimensional. El eje horizontal corresponde a la relación entre las deformaciones que ocurren fuera de la reparación y las deformaciones que ocurren en el defecto multiplicado pelo factor $(t/tr)(t/e)$ donde t es el espesor de pared del tubo, tr es el espesor residual en la región con defecto y e representa el espesor total de la reparación. El eje vertical corresponde a la relación entre la presión y una tensión media entre S_u y S_y do material do tubo conocida como $S_{flow} = (S_u + S_y)/2$.

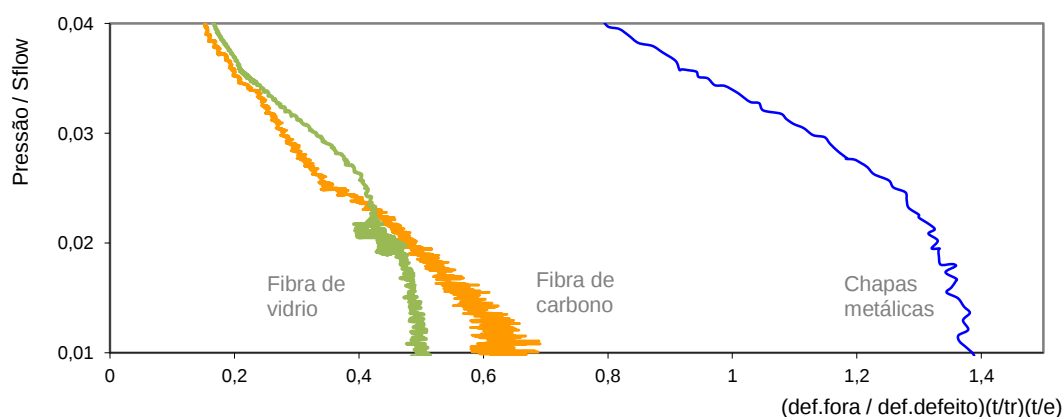


Figura 7 – Gráfico de presiones vs deformaciones adimensionales

La Figura 7 es utilizada para comparar reparaciones diferentes en relación a su capacidad de restringir las deformaciones en la región del defecto. Cuanto más a la derecha esté la curva de algún tipo de reparación, mejor su eficacia para controlar las deformaciones circunferenciales en la región del defecto. Como se puede ver, la reparación de chapas metálicas es el que presenta mejor eficacia para el control de las deformaciones en la región del defecto.

En la Tabla 5 es presentada el análisis de los resultados

Tabla 5 – Comparación de los resultados de los tres tipos reparaciones

Reparación de fibra de carbono	Reparación de fibra de vidrio	Reparación de chapa metálica
La región del defecto reparado fluye a 8.3MPa de presión interna (0.5% de deformación total), de esta forma: - La región sin reparo y sin defecto fluye a 20.7MPa de presión. Esto quiere decir que la presión de fluencia de la región del defecto reparado es 40% de la presión de fluencia de un ducto nuevo. - Analíticamente la región del defecto sin reparo fluye a 6.79MPa. Esto quiere decir que el reparo retarda a presión de fluencia del defecto en 21.9%. - La MAOP, según ASME B31.4 /4/ es de 14.06MPa, a esta presión la deformación en la región del defecto es igual a 2.26% (22598 $\mu\epsilon$).	La región del defecto reparado fluye a 13.4MPa de presión interna (0.5% de deformación total), de esta forma: - La región sin reparo y sin defecto fluye a 20.30MPa de presión. Esto quiere decir que la presión de fluencia de la región del defecto reparado es 66% de la presión de fluencia de un ducto nuevo. - Analíticamente la región del defecto sin reparo fluye a 9.09MPa. Esto quiere decir que el reparo retarda la presión para la fluencia del defecto en 47.4%. - La MAOP, según ASME B31.4 /4/ es de 14.06MPa, a esta presión la deformación en la región del defecto es igual a 0.56% (5640 $\mu\epsilon$).	La región del defecto reparado fluye a 12.3MPa de presión interna (0.5% de deformación total), de esta forma: - A región sin reparo y sin defecto fluye a 16.00MPa de presión. Esto quiere decir que la presión de fluencia de la región del defecto reparado es 77% de la presión de fluencia de un ducto nuevo. - Analíticamente la región del defecto sin reparo fluye a 4.13MPa. Esto quiere decir que el reparo retarda la presión para la fluencia del defecto en 198.5%. - La MAOP, según ASME B31.4 /4/ es de 10.20MPa, a esta presión la deformación en la región del defecto es igual a 0.28% (2805 $\mu\epsilon$).

* MAOP = máxima presión de operación admisible

4 – Conclusión

Este artículo tuvo como objetivo comparar la eficacia de tres tipos diferentes de reparaciones comúnmente utilizados en ductos para transporte de hidrocarburos. Se presentó un estudio de las deformaciones actuantes en tres tubos reparados utilizando mangas de fibra de vidrio, fibra de carbono y camadas metálicas coladas.

Los resultados muestran que la reparación de chapas metálicas es el de mayor eficacia para el control de las deformaciones en la región del defecto desde el régimen elástico. Las reparaciones de fibra de vidrio y de fibra de carbono presentan eficacias similares entre sí, mas inferiores a la reparación metálica. Se debe resaltar que los resultados aquí expuestos dependen de los criterios utilizados para el dimensionamiento de las reparaciones, criterios *a* y *b* en la sección 2.4. Con la imposición del criterio *c*, sección 2.4, y utilizando el modelo analítico de la referencia /3/, los resultados para las reparaciones de material compuesto pueden verse algo afectados, todavía, la reparación de camadas metálicas presenta mayor eficacia para el control de las deformaciones actuando desde el régimen elástico del material del ducto.

Referencias Bibliográficas

- /1/ DUEL, J., WILSON, J., KESSLER, M. Analysis of a Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol. 85 pp. 782-788, November 2008.
- /2/ ISO/TS 24817 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries –Composite repair for pipework – Qualification and design, installation, testing and inspection. First edition, 2006.
- /3/ ROSAS, M. Avaliação de Modelos do Comportamento de Reparos do Tipo Luva em Dutos com Defectos de Perda de Espessura. Tese de doutorado, PUC-Rio, Setembro 2010
- /4/ ASME B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
- /5/ ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- /6/ ASTM D3039 Tensile Testing Composite

Autor: Marco Antonio Pérez Rosas
Doctor en Ingeniería Mecánica - PUC-Rio, Brasil
Empresa: DNV GL
Cargo: Ingeniero Senior



Autor: Marcos Rodrigues
Doctor en Ingeniería Civil – UFRJ, Brasil
Empresa: DNV GL
Cargo: Ingeniero Principal



Autor: Ronaldo Domingues Vieira
Master en Ingeniería Mecánica - PUC-Rio, Brasil
Empresa: Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro PUC-Rio
Cargo: Profesor Adjunto



Autor: José Luiz de França Freire
Doctor en Ingeniería Mecánica - Iowa State University, USA
Empresa: Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro PUC-Rio
Cargo: Profesor Adjunto

