

ANÁLISE DE CUSTO PARA IMPLEMENTAR REPAROS COMPÓSITOS EM TUBULAÇÕES¹

Roberson Fernando Silva²
Edson Paulo da Silva³
Flamínio Levy Neto³

Resumo

Este trabalho abordará o dimensionamento da espessura necessária em reparos compósitos, utilizando-se diferentes laminados, com o propósito de restaurar a rigidez original de tubos de aço que sofreram desbaste nas regiões centrais, devido à corrosão ou impactos mecânicos. A análise do custo deste reparo compósito - devido à sua espessura - será feita. Para a determinação da espessura do reparo, o módulo de elasticidade do material compósito deve ser considerado, bem como o módulo do aço, da tubulação a ser reparada. Assim, devem-se determinar as propriedades dos materiais compósitos para frações volumétricas de fibras entre 30 e 50% e com isso a espessura do reparo para estes diferentes compósitos. Análises numéricas foram realizadas, no software COMPSHELL, para combinações de fibras de vidro-E, carbono de alta resistência e Kevlar-49, com as resinas epóxi e poliéster. Com a espessura do reparo sobre a região desbastada determinada, o custo final da operação deve ser obtido em tubulações de aço reparadas com fibras de vidro-E, carbono e Kevlar-49 e resina epóxi, sendo as espessuras e custos dos reparos, para 30% de fração volumétrica de fibra, iguais a 8,32mm, 2,92mm e 4,83mm e R\$ 4,60, R\$ 9,85 e R\$ 6,54, respectivamente. Para 50% estas espessuras reduziram-se para 5,30mm, 1,79mm e 3,00mm e os custos para R\$ 2,82, R\$ 14,69 e R\$ 8,07, respectivamente.

Palavras-chave: Reparos compósitos; Tubulações industriais; Análise de custo de reparos compósitos.

ANÁLISE DE CUSTO PARA IMPLEMENTAR REPAROS COMPÓSITOS EM TUBULAÇÕES

Abstract

This work will consider the determination of the necessary thickness of composite repairs, using different laminates, in order to restore the original stiffness of steel pipes that had lost material in the central region, caused by corrosion or mechanical impact. A cost analysis of the repair, based on its thickness – will be carried out. For the determination of required thickness, the elasticity modulus of the composite repair and the steel wall need to be known. So, the properties of the composite material, with volume fractions varying from 30 to 50% and as a consequence the thickness of the repair need to be known. Numerical analyzes were carried out using the COMPSHELL finite element program, for different combinations of fiber glass, high modulus carbon and Kevlar-49 with polyester and epoxy resin. After the determination of the repair thicknesses, on the machined region of the steel pipes repaired with fiber glass, carbon and Kevlar-49 impregnated with epoxy resin, the final material cost involved in such operation can be found. For volume fractions of fibers equal to 30%, the thickness are, 8,32mm, 2,92mm and 4,83mm and the costs R\$ 4,60, R\$ 9,85 and R\$ 6,54, respectively. For 50% of volume fractions, these thickness decrease to 5,30mm, 1,79mm and 3,00mm and the costs will be R\$ 2,82, R\$ 14,69 and R\$ 8,07, respectively.

Key words: Composite repair; Industrial pipes; Repair's cost analyzes.

¹ Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduando, UnB/FT/ENM – 70.910-900 – Brasília-DF

³ Professor, PhD, UnB/FT/ENM – 70.910-900 – Brasília-DF

1 INTRODUÇÃO

A utilização de dutos para o escoamento de gases e líquidos tem se mostrado uma opção barata e rápida em relação a outros tipos de transportes, como o rodoviário e o ferroviário, porém sabe-se que estes estão submetidos ao processo de corrosão, tanto interna como externa. Para que o transporte não seja interrompido diferentes metodologias de reparo vêm sendo desenvolvidas, uma delas é a utilização de luvas metálicas. Como alternativa, surgiram os materiais compósitos, que podem se moldar em diferentes diâmetros de tubulações e a combinação destes pode suportar elevadas pressões, mantendo o transporte no interior da tubulação constante ao longo deste reparo.

Como entre todos os materiais industriais existentes, o aço-carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar e de conformar, só se deixa de empregar o aço quando há alguma circunstância especial que o proíba. Desta forma todos os outros materiais são utilizados apenas em alguns casos especiais de exceção como é dito por Telles (1).

Devido a esta grande importância das tubulações de aço, no presente trabalho, serão estudados tubos de aço 1020 com reparo externo de material compósito, fibras e resina, pois as resinas são bons adesivos e as fibras determinam a maior rigidez para o material. Com a utilização de compósitos nestas tubulações, não é necessário parar totalmente o fluxo (2). Com isso, apesar de os materiais compósitos terem um custo maior que as luvas de metal, o custo final do reparo pela resistência obtida é menor com a utilização de materiais compósitos.

Em 1987 o Instituto de Pesquisa Gas Research Institute (GRI) montou uma equipe para avaliarem uma técnica alternativa no reparo de dutos. Tal alternativa deveria incluir compósitos no reparo. O resultado do trabalho de Porter (3) concluiu que a técnica desenvolvida pela Clock Spring Corporation constituía um sistema de reparo permanente altamente eficiente. No presente trabalho serão feitas simulações sobre o comportamento mecânico de dutos com reparos compósitos.

As simulações serão realizadas por meio do programa de elementos finitos COMPSHELL desenvolvido por Mistry e Levy (4), e do software Matlab em tubos de aço-carbono 1020 com diferentes reparos de material composto de resinas epóxi ou poliéster e fibras de carbono, de vidro-E ou kevlar-49, representando a perda parcial da parede da tubulação pela introdução de um desbaste na região central dos tubos e posterior aplicação de reforço.

Os materiais compósitos apresentam maior rigidez específica, relação entre o módulo de elasticidade e a densidade, que aços, desta forma é de fundamental importância que o módulo de elasticidade do material compósito que será utilizado no reparo seja determinado para diferentes frações volumétricas de fibras. Por meio das propriedades do compósito a espessura do reparo pode ser determinada. Devido a esta relação este trabalho vem determinar qual a espessura mínima que o reparo deve ter de modo a otimizar a relação entre o custo e a rigidez específica obtida após o reparo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As análises numéricas foram feitas utilizando-se o software COMPSHELL (4) que é um programa que utiliza o método de elementos finitos em superfícies axissimétricas. Em projetos envolvendo materiais compósitos o modo como as fibras estão aderidas à resina, o direcionamento das fibras e qual o volume de fibra utilizado no reparo são de fundamental importância. Desta forma as características que devem ser determinadas tanto para materiais compósitos como para materiais

isotrópicos são: (i) os Módulos de Young Longitudinal (E_{11}) e Transversal (E_{22}); (ii) o Módulo ao cisalhamento (G_{12}); (iii) o Coeficiente de Poisson (ν_{12}); (iv) as Tensões de Ruptura à Tração (X_{1T}) e à Compressão Longitudinal (X_{1C}), longitudinais; (v) as Tensões de Ruptura à Tração (X_{2T}) e à Compressão (X_{2C}), transversais; (vi) a Resistência ao Cisalhamento (S_{12}); e (vii) a Densidade do material (ρ).

Os módulos de Young longitudinais dos materiais compósitos são determinados por meio da regra das misturas como pode ser vista na equação 1, que depende da rigidez e da fração volumétrica dos materiais utilizados, a determinação das demais propriedades no material compósito é feita utilizando as propriedades da resina e da fibra.

$$E_c = E_f \cdot \nu_f + E_m \cdot \nu_m \quad (\text{eq. 1})$$

Tabela 1. Propriedades das Fibras e das Resinas. Hull (5), Levy Neto (6).

Propriedade	Vidro	Carbono Alta Resistência.	Kevlar	Resina Epóxi (Hull)	Resina Poliéster (Hull)
E_{11} (MPa)	72400	228000	112000	3500	2000
E_{12} (MPa)	72400	228000	112000	3500	2000
G_{12} (MPa)	30000 (Calculado)	95000 (Calculado)	41000 (Calculado)	1280	844
ν_{12}	0,20	0,20	0,36	0,35	0,37
X_{1T} (MPa)	3448	3800	3000	35	40
X_{1C} (MPa)	965	1308	248	100	90
X_{2T} (MPa)	3448	3800	3000	35	40
X_{2C} (MPa)	965	1308	248	100	90
S_{12} (MPa)	63	65	56	50	45
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	2,60	1,81	1,44	1,30	1,40

Tabela 2. Propriedades dos Compósitos de comparação. ($V_f = 50\%$). Levy (6)

Propriedade	Vidro-E/Epóxi	Carbono/Epóxi de alta Resistência	Kevlar 49/Epóxi
E_{11} (MPa)	25000	70000	30000
E_{12} (MPa)	25000	70000	30000
G_{12} (MPa)	4000	5000	5000
ν_{12}	0,20	0,10	0,20
X_{1T} (MPa)	440	600	480
X_{1C} (MPa)	425	570	190
X_{2T} (MPa)	440	600	480
X_{2C} (MPa)	425	570	190
S_{12} (MPa)	40	90	50
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	1,90	1,60	1,40

Um material compósito de referência também deve ser utilizado para que o completo equacionamento seja feito (6). A Tabela 1 mostra as propriedades das fibras e das resinas, enquanto a Tabela 2 mostra as propriedades do material utilizado como referência.

Utilizando as equações de 8 a 18 as propriedades do material compósito podem ser determinadas. Estas propriedades são utilizadas no programa COMPSHELL Levy Neto (4), com a finalidade de se determinar o deslocamento radial e o momento fletor máximo da tubulação, após a utilização do reparo e compará-lo com o do tubo íntegro.

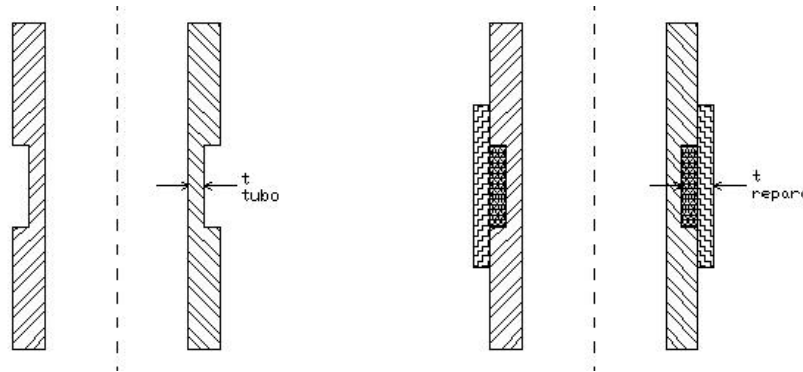


Figura 1. Representação da espessura de desbaste e espessura do reparo em uma tubulação de aço.

Deve-se observar que a espessura do reparo, conforme ilustrado na Figura 1, consiste no somatório das espessuras da primeira e segunda camada de material compósito. A rigidez do reparo será obtida por meio da regra das misturas. Partindo do princípio que o material compósito está perfeitamente aderido ao material da tubulação pode-se dizer que a deformação causada devido a uma pressão interna no tubo será a mesma verificada no compósito, eq. 2.

$$\varepsilon_{reparo} = \varepsilon_{tubo} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{eq. 3})$$

Utilizando-se tanto a tensão axial quanto a circunferencial têm-se as seguintes equações:

$$\varepsilon_{reparo} = \frac{P.R}{t_{reparo} \cdot E_{reparo}} \quad (\text{eq. 4})$$

$$\varepsilon_{tubo} = \frac{P.R}{t_{tubo} \cdot E_{tubo}} \quad (\text{eq. 5})$$

Combinando-se as equações 4 e 5 tem-se:

$$E_{reparo} \times t_{reparo} \approx E_{tubo} \times t_{tubo} \quad (\text{eq. 6})$$

Desta forma chega-se à relação procurada, entre o módulo de elasticidade e a espessura do reparo a ser realizado.

$$t_{reparo} \approx \frac{E_{tubo} \times t_{tubo}}{E_{reparo}} \quad (\text{eq. 7})$$

Na equação 7, percebe-se a presença do termo $\frac{E_{tubo}}{E_{reparo}}$ que é a relação entre os módulos de elasticidade do material compósito do reparo pelo módulo do material do tubo. Assim à medida que se aumenta a rigidez do material compósito, mais carga na parede do tubo é transferida para o reparo fazendo com que a espessura do reparo seja reduzida. Para as tubulações de aço estudadas numericamente, o módulo de elasticidade é de 200 GPa e sua espessura de 1mm. Estes dados devem ser conhecidos para quaisquer tubulações a serem reparadas.

As equações de 8 a 18 serão necessárias para a obtenção das propriedades dos materiais compósitos. O índice C no final de cada termo, das equações de 8 a 18 se refere às propriedades da estrutura compósita utilizada como comparação, Tabela 2, pois as propriedades mecânicas do reparo são determinadas a partir da interpolação entre os pontos da curva do módulo de elasticidade versus fração volumétrica entre o ponto inicial (0,0) e o ponto do material de comparação. Por isso a determinação das propriedades requeridas pelo usuário deverá ser realizada para frações volumétricas menores que a do material de comparação utilizado.

As equações de 8 a 18 serão utilizadas no “MatComp”, programação realizada por meio do software Matlab, para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais compósitos para diferentes frações volumétricas.

$$V_{fe} = \frac{V_f}{2} \quad \text{Fração de Volume Efetiva} \quad (\text{eq.8})$$

$$R = \frac{\left(1 + \frac{V_{mc}}{V_{fc}}\right)}{V_f} \quad \text{Constante Para Cálculo} \quad (\text{eq.9})$$

$$E_{11} = R \cdot E_{1c} + (1 - R) \cdot E_m \quad \text{Módulo de Elasticidade na direção 1} \quad (\text{eq.10})$$

$$E_{22} = \frac{(E_m \cdot E_{2c})}{(1 - R) \cdot E_{2c} + R \cdot E_m} \quad \text{Módulo de Elasticidade na direção 2} \quad (\text{eq.11})$$

$$\nu_{12} = (1 - R) \cdot \nu_m + R \cdot \nu_{12c} \quad \text{Coeficiente de Poisson} \quad (\text{eq.12})$$

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_{12c}}{(1 - R) \cdot G_{12c} + R \cdot G_m} \quad \text{Módulo de Cisalhamento} \quad (\text{eq.13})$$

$$X_{1T} = R \cdot X_{1Tc} + (1 - R) \cdot X_{Tm} \quad \text{Ruptura a Tração na Direção 1} \quad (\text{eq.14})$$

$$X_{1c} = R \cdot X_{1Cc} + (1 - R) \cdot X_{Cm} \quad \text{Máxima Tensão a Compressão Direção 1} \quad (\text{eq.15})$$

$$X_{2T} = \frac{X_{Tm} \cdot X_{2Tc}}{(1 - R) \cdot X_{2Tc} + R \cdot X_{Tm}} \quad \text{Tensão de Ruptura a Tração na Direção 2} \quad (\text{eq.16})$$

$$X_{2c} = \frac{X_{Cm} \cdot X_{2Cc}}{(1 - R) \cdot X_{2Cc} + R \cdot X_{Cm}} \quad \text{Máxima Tensão a Compressão Direção 1} \quad (\text{eq.17})$$

$$S_{12} = \frac{S_{12f} \cdot S_{12m}}{V_m \cdot S_{12f} + V_f \cdot S_{12m}} \quad \text{Tensão de Ruptura ao Cisalhamento} \quad (\text{eq.18})$$

3 RESULTADOS

Neste trabalho foi feito um programa capaz de fornecer as propriedades para os reparos compósitos que utilizem alternativamente fibras de vidro-E, Carbono ou Kevlar-49, em matrizes de resina epóxi ou poliéster. Para isso foi utilizada a ferramenta MatLab para a geração do programa “MatComp” o qual fornece os dados contidos nas Tabelas 3 e 4 a partir das propriedades levantadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 3. Propriedades dos Materiais Compósitos com 30% de fração volumétrica de fibra. (“MatComp”).

Propriedade	Vidro-E/Epóxi	Carbono/Epóxi de alta Resistência	Kevlar 49/Epóxi
E_{11} (MPa)	16400	43400	19400
E_{12} (MPa)	16400	43400	19400
G_{12} (MPa)	2162	2312	2312
ν_{12}	0,26	0,20	0,26
X_{1T} (MPa)	278	374	302
X_{1C} (MPa)	295	382	154
X_{2T} (MPa)	278	374	302
X_{2C} (MPa)	295	382	154
S_{12} (MPa)	53	58	52
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	0,00169	0,001453	0,001342

Tabela 4. Propriedades dos Materiais Compósitos com 50% de fração volumétrica de fibra. Cranfield (7).

Propriedade	Vidro-E/Epóxi	Carbono/Epóxi de alta Resistência	Kevlar 49/Epóxi
E_{11} (MPa)	25000	70000	30000
E_{12} (MPa)	25000	70000	30000
G_{12} (MPa)	4000	5000	5000
ν_{12}	0,20	0,10	0,20
X_{1T} (MPa)	440	600	480
X_{1C} (MPa)	425	570	190
X_{2T} (MPa)	440	600	480
X_{2C} (MPa)	425	570	190
S_{12} (MPa)	40	90	50
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	0,0019	0,0016	0,0014

As Tabelas 3 e 4 são importantes para a análise da espessura do reparo bem como para se determinar o custo do reparo a ser realizado em determinada tubulação. Reparos com frações volumétricas de fibras entre 30 e 50% podem ser obtidos em locais isolados, pois estes podem ser realizados por meio de cintas com diferentes apertos. Reparos com frações volumétricas iguais a 70% só podem ser obtidos em ambientes que possuam energia elétrica para a utilização de bombas de vácuo e autoclave.

Utilizando a regra das misturas o gráfico do módulo de elasticidade pela fração volumétrica de fibras pôde ser obtido. Verifica-se que este extrapola os limites de fração volumétrica alcançável. Na prática estes valores ficam entre 30 e 70%. Numericamente isto foi feito extrapolando as equações para V_f de 0 até 100%. A fração volumétrica de fibras chega ao máximo de 70% pois a partir deste limite a resina não consegue embeber todas as fibras pertencentes ao material compósito, que desfiam não representando reforço estrutural, no caso em estudo no reparo. Em situações de campo, reparos entre 30 e 50% podem ser obtidos.

Deste modo a Figura 2 mostra que a rigidez do material compósito aumenta linearmente com o aumento da fração volumétrica para os três tipos de fibras em estudo, vidro-E, carbono e kevlar-49, sendo que a maior rigidez é obtida com a fibra de carbono e resina epóxi.

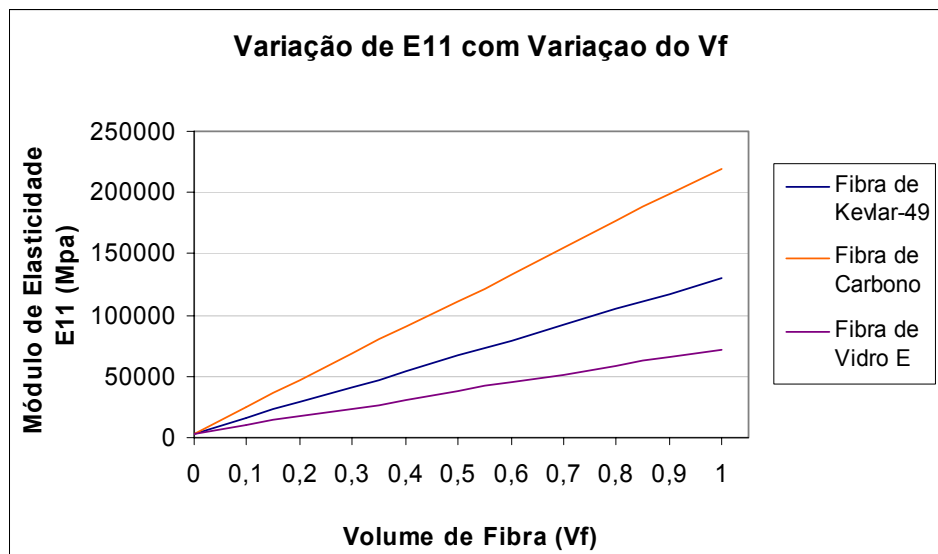


Figura 1. Volume de Fibra versus Módulo de Elasticidade para fibras de Kevlar-49, Carbono e Vidro-E.

De acordo com a Figura 2 a variação no tipo de fibra utilizada altera significativamente a rigidez do material compósito, porém alternando a resina utilizada entre a resina epóxi e a de poliéster o que se verifica é que o módulo de elasticidade pouco altera como pode ser visto na Figura 2. Teoricamente não se tem diferença entre empregar a resina epóxi e a resina poliéster no caráter estrutural, porém o modo em que cada uma atua como adesivo e problemas na utilização de cada uma, como absorção de água, deve ser analisado cautelosamente, bem como o custo de cada uma delas.

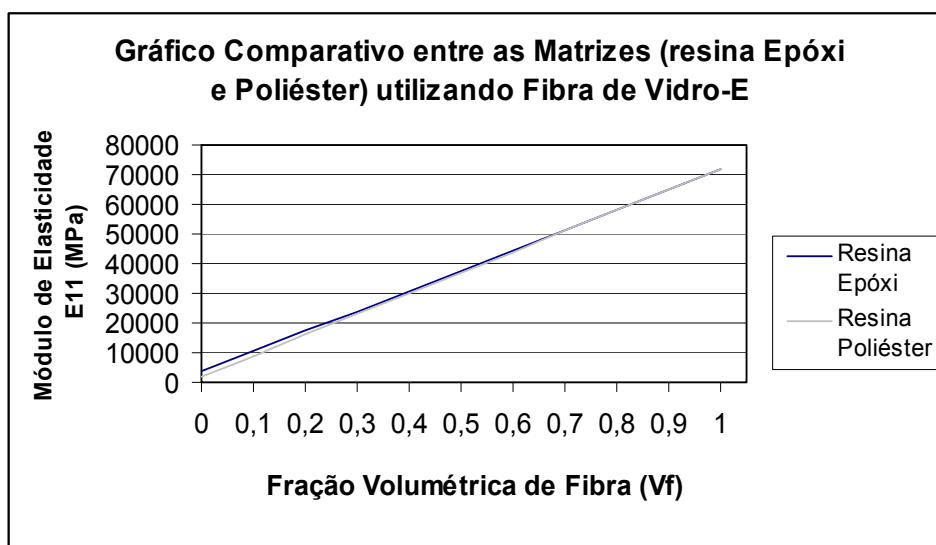


Figura 3. Comparativo entre a utilização de resina epóxi e resina poliéster.

O modo como o módulo de elasticidade variará com o tipo de reparo realizado é essencial para a determinação da espessura do reparo como foi visto na equação 7. Porém percebe-se que a variação do tipo de resina em nada influencia para reparos na região normal de aplicação dos compósitos, i.e., V_f entre 30 e 70%. Logo o objetivo é fixar um tipo de resina e estudá-la em todos os tipos de reparos.

A equação 7 é de fundamental importância para o projeto em questão pois esta fornece uma aproximação da espessura do reparo a ser realizado de modo a obter uma rigidez equivalente próxima à do material do tubo em estudo, desta forma o tubo reparado não deve apresentar estrangulamento nem abaulamento ao ser submetido à pressão interna. A Tabela 5 apresenta a espessura de reparo necessária para se reparar tubos de aço, sendo esta a espessura total do reparo, como a região desbastada possui 1mm de profundidade a espessura da segunda camada de laminado deverá possuir a espessura calculada menos 1mm.

Tabela 5. Cálculo da espessura do reparo em função do módulo de Elasticidade. Tubo de aço

Fração Volumétrica de Fibra	Vidro/Epóxi		Carbono/Epóxi		Kevlar/Epóxi	
	E11 (MPa)	treparo (mm)	E11 (MPa)	treparo (mm)	E11 (MPa)	treparo (mm)
0,0	3500	57,14	3500	57,14	3500	57,14
0,1	10350	19,33	25150	7,95	16150	12,38
0,2	17200	11,63	46800	4,28	28800	6,94
0,3	24050	8,32	68450	2,92	41450	4,83
0,4	30900	6,47	90100	2,22	54100	3,70
0,5	37750	5,30	111750	1,79	66750	3,00
0,6	44600	4,50	133400	1,50	79400	2,52
0,7	51450	3,88	155050	1,29	92050	2,20
0,8	58300	3,43	176700	1,13	104700	1,91
0,9	65150	3,07	198350	1,01	117350	1,70
1,0	72000	2,78	220000	0,91	130000	1,54

Como foi dito, é possível obter reparos com frações volumétricas entre 0,3 e 0,7 a Tabela 8 foi obtida de forma teórica a fim de se comparar qual a espessura do reparo caso este fosse realizado somente com resina, com material compósito ou com fibra simplesmente. Para tubos de aço se torna inviável realizar reparo apenas com resina, pois este deveria ter 57,14mm de espessura o que acaba por ser

inviável tanto no volume de resina como economicamente. Em tubos de P.V.C. o reparo utilizando as mesmas fibras dos tubos de aço, não se faz necessário utilizar a segunda camada de reparo para as situações reais, entre 0,3 e 0,7. Logo reparos com fibras naturais, de menor módulo de elasticidade, ou com resina epóxi pura seriam uma solução aceitável, além de econômica. Para estimar-se custos, serão utilizados os dados fornecidos pela empresa AbCol, vendedora de componentes para material compósito e a Tabela 6 será utilizada como base para o cálculo do custo do reparo.

Tabela 6. Custos dos produtos necessários para o reparo. (AbCol)

Produto		Custo
Fibras	1 m ² Tecido Vidro-E 145	R\$ 10,00
	1 m ² tecido Kevlar 49	R\$ 70,00
	1 m ² Tecido Carbono	R\$ 140,00
Resinas	1 kg Resina Epóxi Lr 100	R\$ 21,00
	1 kg Resina Poliéster	R\$ 15,00
Acessórios	0,1 gr Endurecedor Le 10	R\$ 4,00
	0,1 gr Catalisador	R\$ 8,00

Para a contabilização do reparo com material compósito em tubulações de aço, foi feita uma planilha no Microsoft Excel a qual gerou os dados contidos nas Tabelas 7 e 8, por meio dos dados contidos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 7. Custo do Reparo para Vf = 30% em tubos de aço

Propriedades Individuais		
Reparo Com:	Custo da Resina	
	Epóxi	Poliéster
Vidro	R\$ 4,00	R\$ 3,07
Carbono	R\$ 1,40	R\$ 1,08
Kevlar	R\$ 2,32	R\$ 1,78

Custo da Fibra	
Vidro	R\$ 0,60
Carbono	R\$ 8,44
Kevlar	R\$ 4,22

Custo Final dos Materiais Compósitos		
Material	Epóxi	Poliéster
Vidro	R\$ 4,60	R\$ 3,68
Carbono	R\$ 9,85	R\$ 9,52
Kevlar	R\$ 6,54	R\$ 6,01

Tabela 8. Custo do Reparo para Vf = 50% em tubos de aço.

Propriedades Individuais		
Reparo Com:	Custo da Resina	
	Epóxi	Poliéster
Vidro	R\$ 1,82	R\$ 1,40
Carbono	R\$ 0,61	R\$ 0,47
Kevlar	R\$ 1,03	R\$ 0,79

Custo da Fibra	
Vidro	R\$ 1,01
Carbono	R\$ 14,07
Kevlar	R\$ 7,04

Custo Final dos Materiais Compósitos		
Material	Epóxi	Poliéster
Vidro	R\$ 2,82	R\$ 2,40
Carbono	R\$ 14,69	R\$ 14,55
Kevlar	R\$ 8,07	R\$ 7,83

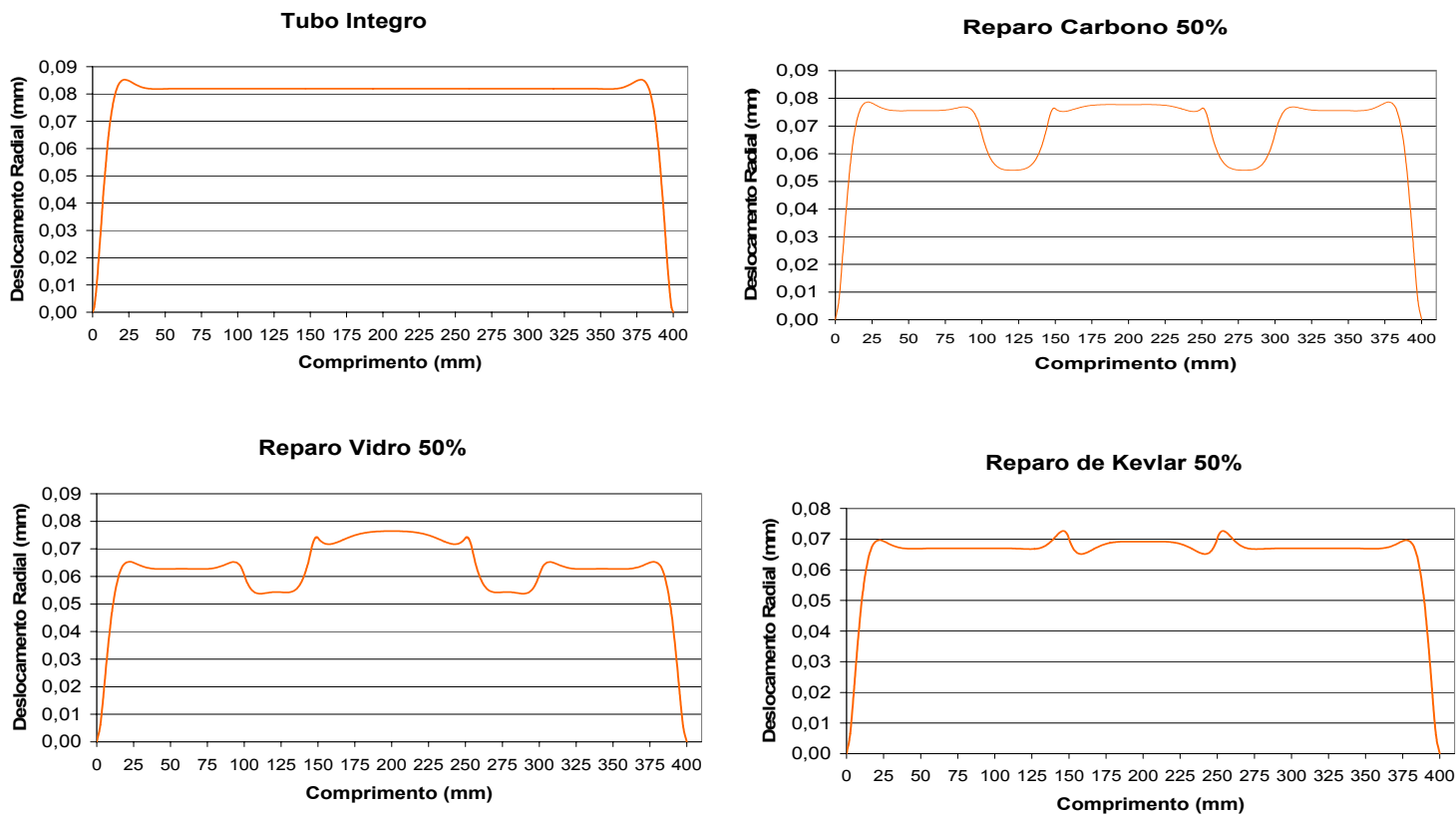


Figura 4. Deslocamento Radial em tubulações com reparo.

A Figura 4 evidencia como o deslocamento radial das tubulações com reparo externo de material compósito, se aproxima do deslocamento do tubo íntegro que é próximo de 0,08mm. Deve ser observado que o tubo íntegro suporta uma pressão de 22,5 MPa enquanto os tubos com reparo de vidro, carbono e kevlar suportam 17,59, 20,48 e 18,32 MPa respectivamente.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos apresentam uma boa correlação entre si, pois verifica-se que as propriedades do tecido balanceado com 30% de fração volumétrica de fibras (V_f) apresentam propriedades mecânicas menores que as de tecido com V_f igual a 50 e 70%, e verifica-se a relação linear do módulo de elasticidade com as respectivas frações volumétricas de fibra obtidas.

Observando a Figura 1, percebe-se que a variação da fração volumétrica de fibras (V_f) afeta diretamente o módulo de elasticidade do compósito a ser utilizado no reparo mostrando um comportamento linear. Porém analisando como os compositos de vidro-E/epóxi e vidro-E/poliéster se comportam na Figura 2, percebe-se que o módulo de elasticidade pouco varia ao alterar estes dois tipos de resina principalmente para frações volumétricas maiores que 30%.

As Tabelas 1 e 2 mostram como se comporta a espessura do reparo devido ao aumento da fração volumétrica de fibras no reparo. A espessura deve ser maior quanto menor for a V_f , conforme o esperado. Sendo as espessuras especificadas, as que apresentam deslocamentos radiais próximos ao da tubulação íntegra na tubulação como pode ser visto na Figura 2 possuindo um reduzido momento fletor na região reparada.

O custo do reparo está mostrado nas Tabelas 7 e 8 onde se verifica que o custo do reparo fica maior quando se aumenta a Vf, isso porque o custo das fibras é maior que o das resinas. Uma exceção é o reparo com fibra de vidro que reduz seu custo ao se aumentar a Vf, neste caso o custo das resinas é maior que o desta fibra. Apesar de aumentar o custo do reparo, o aumento da Vf reduz a espessura deste sendo este último um fator importante a se considerar em projetos, pois o aumento da espessura eleva também a massa do reparo.

5 CONCLUSÃO

Para a realização de reparos em tubulações posicionadas em locais ermos, a fração volumétrica de fibras habitualmente conseguida é entre 30% e 50%. Devido à dificuldade de se levar equipamento e energia elétrica para a utilização de bombas de vácuo e autoclaves. Nestas condições o reparo a ser realizado deve ser com Vf = 50%. A utilização de resina epóxi ou poliéster é uma decisão que influencia muito mais na saúde dos operadores, uma vez que a resina poliéster é mais tóxica, do que nas características do reparo. Por isso a utilização da resina epóxi é mais conveniente que a utilização da resina poliéster, pois esta última exalta gases tóxicos.

A decisão de qual o tipo de fibra utilizar para se restaurar a rigidez específica depende muito do local e se a massa do reparo influenciará na tubulação a ser reparada. O reparo então deve ter Vf igual a 50% utilizando resina epóxi, a utilização de fibra de vidro custará R\$ 2,82, fibra de carbono de alta resistência será R\$ 14,69 e por fim a utilização da fibra de Kevlar-49 terá um custo de R\$ 8,07. Apesar do maior custo do reparo com fibra de carbono, este é o processo que suportará a maior pressão de ruptura e seu deslocamento radial será muito próximo ao do tubo. A fibra de kevlar por apresentar um comportamento intermediário, com um custo baixo se comparada à fibra de carbono é a solução para tubos que devem suportar pressões abaixo de 18MPa.

REFERÊNCIAS

- 1 TELLES, P. C. da S., **“Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem”**, Editora LTC, 9ª Edição, 1996, p. 1-3.
- 2 MAIA, G.C. (2003) **“Comportamento elástico de cilindros com e sem reparo circunferencial de carbono/epóxi”**. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília.
- 3 PORTER, P.C., **“Composite Pipeline Repairs – Clock Spring is Different”**. In: FIFTH INTERNATIONAL PIPELINE EXPOSITION & CONFERENCE 2000, Morelia, México, 2000.
- 4 LEVY NETO, F., **“The Behavior of Externally Pressurized Composite Domes”**, Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Liverpool, 1991.
- 5 HULL; D; CLYNE, T.W., **“An Introduction to Composite Materials”**, Cambridge e University Press, Cambridge, 1985.
- 6 Levy Neto, Flaminio (1983), **“Estudo de Falha ao Impacto de uma Estrutura de Material Conjugado usada em Aeronaves”**. Dissertação (mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Departamento de Engenharia Mecânica, São José dos Campos.