

Análise das Deformações em Tubos de Aço Reparados com Compósitos Tipo Carbono/Epóxi

Cinthia Thaís de Carvalho Luz Thomazi e Flaminio Levy Neto

Departamento de Engenharia Mecânica – UnB/FT/ENM

Asa Norte, Brasília, DF. CEP: 70910-900

e-mail: cthomazi@unb.br, flaminio@unb.br

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar os valores de deformações normais circunferenciais obtidos através de simulações numéricas de tubos metálicos (Aço AISI 1020, comprimento $L = 400$ mm, diâmetro externo $D = 100$ mm e espessura $t = 2$ mm) nas três condições a seguir: (i) inicialmente íntegros; (ii) desbastados em 50% na espessura, ao longo de 25% de sua região central, para simular um defeito; e (iii) reparados com o compósito Carbono / Epóxi (tecido balanceado de fibras, AS4 – Hexcel), submetidos a diferentes pressões internas, na faixa de 2 a 10 MPa, utilizando para isso o software não linear de elementos finitos COMPSHELL. E, adicionalmente, verificar se os reparos compósitos aplicados restauram a rigidez original do tubo, anterior ao desbaste. Observou-se que existe uma espessura mínima necessária para que o reparo de Carbono/Epóxi recupere totalmente a rigidez local perdida com o desbaste, sendo utilizadas como referências para avaliar a eficácia do reparo o deslocamento radial e a deformação circunferencial do tubo. A espessura mínima do reparo depende, diretamente, da relação entre os módulos de elasticidade do reparo e do material original do tubo. No caso específico deste trabalho com tubos de aço, a espessura requerida do reparo é de 3,05 mm.

Palavras chaves: reparos compósitos, dutos metálicos.

Analysis of the Deformations in Steel Pipes Repaired with Carbon/epoxy composites

ABSTRACT

The main objective of this work is to present the values of the circumferential normal deformations obtained from numerical simulations of metallic pipes (AISI Steel 1020, length $L = 400$ mm, external diameter $D = 100$ mm and thickness $t = 2$ mm) in the following conditions: (i) perfect; (ii) machined in thickness (reduction of 50%), along 25% of its central region, in order to simulate a defect; and (iii) repaired with a carbon/epoxy composite (balanced woven fabrics of fibers, AS4 – Hexcel), subjected to different internal pressures, from 2 to 10 MPa, using the non linear finite element program COMPSHELL. And, in addition, verify if the applied composite repairs are able to restore the original stiffness of the pipes, previous to the machine operation. It was observed that there is a minimum thickness, which is required for the carbon/epoxy repair to restore the local stiffness lost during the machine operation. The radial displacement and the circumferential strain were used as references to evaluate how effective is the repair. The minimum thickness of the repair depends on the ratio of the elasticity moduli of the repair and the original material of the tube. As far as this work is concerned, the required repair thickness is 3.05 mm.

Keywords: composite repairs, metallic pipes.

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, utilizados no reparo de dutos metálicos, vem crescendo em função das vantagens que oferecem [1]. A resina epóxi, que é um excelente adesivo, é empregada como matriz e tecidos balanceados de fibra de carbono são responsáveis pela resistência mecânica e a rigidez do compósito. Neste sentido, trabalhos experimentais e teóricos vem sendo executados neste assunto. Entretanto, a realização de testes tem custo elevado. Mas, utilizando-se programas de elementos finitos, é possível simular com precisão aceitável o comportamento mecânico de tubulações

submetidas a pressões hidrostáticas internas [2]. Neste trabalho, o objetivo principal foi realizar simulações através de um modelo não linear de elementos finitos, utilizando o programa COMPSHELL [3, 4], para tubos de Aço AISI 1020, íntegros, desbastados e reparados com Carbono/epóxi, segundo as configurações apresentadas na Tabela 1. Os compósitos de Carbono/epóxi combinam baixa densidade (inferior à do aço 1020 por um fator maior que 4 vezes) com elevados valores de rigidez e resistência mecânica e tem grande potencial para uso em de reparos estruturais [5, 6, 7].

As simulações visam avaliar a quantidade de reparo necessária a ser empregada na região desbastada, que permita a restauração do comportamento elástico do tubo, comparado ao tubo íntegro, quando submetido a diferentes pressões internas, tendo como referência as deformações circunferenciais. Para uma tubulação sob pressão interna, se um trecho é desbastado, o “estufamento” refere-se ao aumento localizado do raio, em relação ao restante da tubulação que apresenta parede íntegra. Sendo que, no caso de um trecho ter reparo com espessura excessiva, o “estrangulamento” refere-se a uma diminuição localizada do raio. Assim, se a espessura de um reparo for superior à ideal, pode haver um “estrangulamento” do tubo na região reparada. Mas, se a espessura for insuficiente o trecho reparado pode “estufar”. Neste trabalho, é proposta uma metodologia que permite, dadas as características mecânicas e geométricas do tubo desbastado e do reparo, obter a espessura ideal do reparo que restaura a rigidez original do tubo íntegro. Desta forma, o tubo passa a apresentar um aumento de raio praticamente uniforme ao ser pressurizado internamente.

2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA - COMPSHELL

2.1 Metodologia

Para a simulação numérica, foram considerados: (i) um tubo de Aço AISI 1020, íntegro, de espessura nominal $t = 2$ mm e diâmetro externo $d_{ext} = 100$ mm; (ii) um tubo de Aço AISI 1020, desbastado em 50% de sua espessura ao longo de 25% do comprimento na região central, representado pela Figura 1(a); e (iii) um tubo desbastado que foi restaurado, tendo como reparo um compósito de Carbono / Epóxi, com tecido de fibras AG370-8H (8 Harness Satin) de filamentos AS4, representado pela Figura 1(b).

Conforme observado através de uma análise de convergência, conduzida no início deste trabalho, o número de elementos axissimétricos (anéis com um nó em cada extremidade) utilizados interfere diretamente nos resultados obtidos. Nesta análise, foram utilizadas malhas uniformes de elementos finitos nas quais o número de elementos variou de 10 a 120, em incrementos de 10 elementos. Obteve-se convergência a partir de 100 elementos, ou seja, uma estabilização nos resultados das análises numéricas. Sendo assim, estabeleceu-se o número de 120 elementos como padrão para representação dos tubos em todas as simulações numéricas. Cada elemento da malha é um anel de espessura (t) constante, o qual pode ser discretizado em camadas com propriedades mecânicas ortotrópicas distintas [3]. Cada nó da malha tem 04 graus de liberdade, sendo estes os deslocamentos: axiais (u); circunferenciais (v) e radiais (w) e a rotação meridional.

Tabela 1: Configuração geométrica os tubos simulados.

Situação do Tubo	Comprimento L (mm)	Diâmetro Externo d_{ext} (mm)	Espessura t (mm)	Espessura de Desbaste (mm)
Íntegro	400,00	100,00	2,00	0,00
Desbastado	400,00	100,00	2,00	1,00

O reparo compósito de Carbono / Epóxi apresenta as seguintes frações volumétricas de fibra e matriz (resina), respectivamente: $v_f = 50\%$ e $v_m = 50\%$ [2]. O reparo envolve totalmente a superfície do trecho desbastado, ou seja, é aplicado ao longo da circunferência completa do tubo (360°).

Em todas as simulações os tubos foram modelados como cilindros bi-engastados nas extremidades (vide Figura 1) e submetidos a pressões de 2, 4, 6, 8 e 10 MPa, com geometria e propriedades mecânicas listadas na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

2.2 Espessura do Reparo

Como o objetivo da utilização do reparo é restabelecer o comportamento mecânico do tubo desbastado, principalmente no que diz respeito às deformações circunferenciais, de forma que o tubo reparado nem seja estrangulado nem apresente estufamento, é importante determinar a espessura de reparo ideal necessária. Inicialmente pelo tubo íntegro. Devido à pressão interna (P), o raio inicial (R) dos tubos aumenta e esse acréscimo de raio (ΔR) é definido como sendo o deslocamento radial ($w = \Delta R$). O aumento na

circunferência dos tubos ($2.\pi.\Delta R$) em relação à circunferência inicial ($2.\pi.R$) é a deformação circunferencial ($\Delta R/R$).

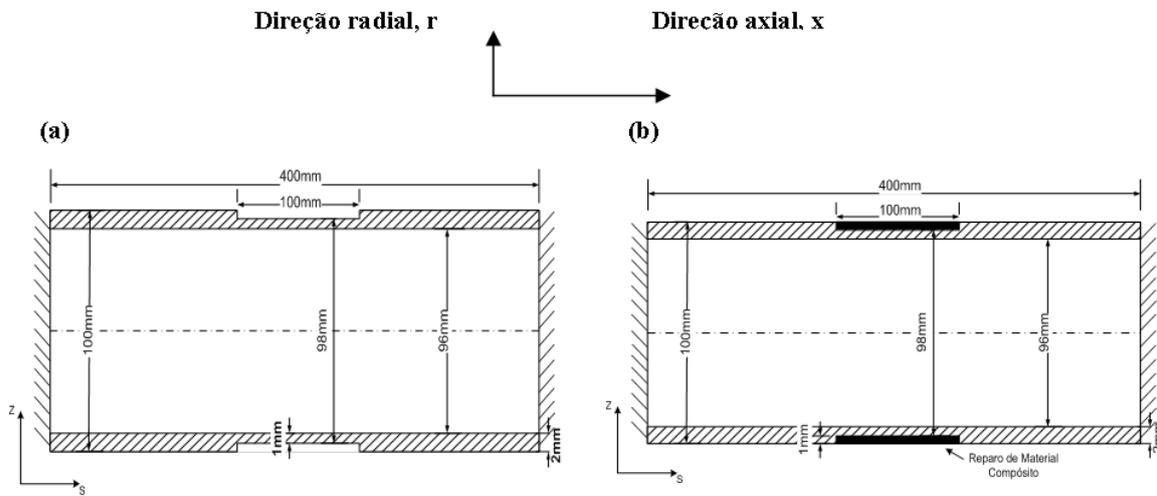


Figura 1: Representação dos tubos (a) íntegro e (b) reparado.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos materiais [3, 5, 6].

Propriedade	Aço AISI 1020	Carbono / Epóxi $v_f = v_m = 50\%$
$E_1 = E_2$ (MPa)	200.000	65.518
$\nu_{12} = \nu_{21}$	0,29	0,05
G_{12} (MPa)	80.000	4.663
X_{1T} (MPa)	440	617,60
X_{1C} (MPa)	440	465,40
X_{2T} (MPa)	440	617,60
X_{2C} (MPa)	440	465,40
S_{12} (MPa)	200	78,20
ρ (g/mm ³)	0,00787	0,0016

Para quantificar o efeito das pressões internas na parede dos tubos, é fundamental a comparação do aumento da deformação circunferencial do tubo desbastado em relação ao tubo íntegro nas diversas pressões internas, apresentadas na Tabela 3. Estas deformações foram obtidas utilizando-se o programa de elementos finitos COMPSHELL [3]. Admitindo que a variação na deformação circunferencial ($\Delta R/R$) seja resultado da diminuição da rigidez na região desbastada, é correto afirmar-se que, garantindo a mesma deformação ao tubo desbastado que ao tubo íntegro, através da aplicação do reparo, estar-se-á garantindo a recuperação de sua rigidez. A aplicação do reparo contribuirá na recuperação, variando sua espessura na região desbastada até que seja observada a completa restauração da propriedade, através da análise das deformações circunferenciais no trecho analisado. A espessura a se utilizar pode ser aproximada através das seguintes relações, detalhadas no conjunto de Equações 1 a 5 apresentado a seguir.

Como o estudo refere-se ao comportamento elástico do tubo, pode-se empregar a Lei de Hooke para o aço e para o reparo, ou seja:

$$\sigma_{aço} = E_{aço} * \varepsilon_{aço} \quad e \quad \sigma_{rep} = E_{rep} * \varepsilon_{rep} \tag{1}$$

Onde:

σ = tensão normal aplicada

ε = deformação circunferencial.

E = módulo de elasticidade

aço = referente ao tubo de aço íntegro

rep = referente ao tubo de aço com reparo

Tabela 3: Deformações Circunferenciais (ε_c) – Tubo íntegro e Tubo desbastado

Pressão (MPa)	ε_c Íntegro	ε_c Desbastado	Aumento % (relativo ao íntegro)
2,0	2,206 E-4	4,33 E-4	96
4,0	4,410 E-4	8,63 E-4	96
6,0	6,614 E-4	12,90 E-4	95
8,0	8,816 E-4	17,20 E-4	95
10,0	11,018 E-4	21,40 E-4	94

Isolando e igualando a deformação circunferencial (i.e. impondo-se que o tubo reparado apresente a mesma deformação que o íntegro), obtêm-se:

$$\frac{\sigma_{aço}}{E_{aço}} = \frac{\sigma_{rep}}{E_{rep}} \tag{2}$$

Sabe-se que a tensão circunferencial para tubos de parede fina ($D_i/t > 20$), submetidos a uma pressão interna (P) é dada por:

$$\sigma_1 = \frac{P * R}{t} \tag{3}$$

Onde:

σ = tensão circunferencial.

P = pressão interna.

R = raio interno.

t = espessura da parede.

Substituindo (3) em (2) tem-se:

$$\frac{P * R}{t_{aço} * E_{aço}} = \frac{P * R}{t_{rep} * E_{rep}} \tag{4}$$

Como a pressão interna (P) ao qual o tubo está submetido e o raio interno do tubo (R) são iguais para o íntegro e o reparado e a espessura retirada do tubo íntegro ($t_{aço} = 1\text{mm}$) é constante, a Equação 4 resume-se a:

$$t_{rep} * E_{rep} = 1 * E_{aço} \tag{5}$$

Aplicando os dados da Tabela 2 à Equação 5, tem-se o valor da espessura do reparo necessária:

$$t_{rep} = \frac{1 * E_{aço}}{E_{rep}} = \frac{1 * 200.000}{65.518} \Rightarrow t_{rep} = 3,05mm \quad (6)$$

3 RESULTADOS OBTIDOS

Os tubos íntegros, desbastados e reparados, nas simulações numéricas, foram submetidos a vários valores de pressão hidrostática interna, desde 2 MPa (cada MPa equivale a aproximadamente 10 atmosferas ou 10 Kgf/cm²) até 10 MPa, em incrementos de 2 MPa, apresentando assim diferentes deslocamentos radiais máximos (w , na região central dos mesmos) e conseqüentemente, diferentes deformações circunferenciais adimensionais ($\Delta R/R$). Os valores positivos de deslocamento radial, w , indicam que o tubo estufou, ou seja, apresentou um aumento de diâmetro. Para todas as pressões, de acordo com cálculos baseados na Equação 5 fora utilizada a espessura do reparo de carbono/epóxi (t_{rep}) de 3,05mm. Esses valores estão listados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Com os valores de pressão (P) de 2 até 10 MPa e utilizando-se o programa COMPSHELL com número de elementos na malha $N = 120$, usando-se os dados das Tabela 1 e da Tabela 2, geraram-se os gráficos de deslocamentos radiais e deformações circunferenciais que se seguem, apresentados nas Figuras 2 a 5. O número total de elementos, $N = 120$, foi adotado após a realização de uma análise de convergência dos resultados numéricos [8].

Tabela 4: Deslocamento máximo w – valores em mm.

Pressão (MPa)	Íntegro W (mm)	Desbastado W (mm)	Reparado W (mm)	Reparado / Íntegro (%)
2,0	1,103 E-2	2,12 E-2	1,090 E-2	98,82
4,0	2,205 E-2	4,23 E-2	2,180 E-2	98,86
6,0	3,307 E-2	6,34 E-2	3,270 E-2	98,88
8,0	4,408 E-2	8,45 E-2	4,358 E-2	98,86
10,0	5,509 E-2	1,05 E-1	5,447 E-2	98,87

Tabela 5: Deformações circunferenciais (ϵ_c), em valores absolutos.

Pressão (MPa)	Íntegro ϵ_c	Desbastado ϵ_c	Reparado ϵ_c	Reparado / Íntegro %
2,0	2,206 E-4	4,33 E-4	2,18 E-4	98,82
4,0	4,410 E-4	8,63 E-4	4,36 E-4	98,86
6,0	6,614 E-4	1,29 E-3	6,54 E-4	98,88
8,0	8,816 E-4	1,72 E-3	8,716 E-4	98,86
10,0	11,018 E-4	2,14 E-3	10,894 E-4	98,87

Nota-se, examinando-se as Tabelas 4 e 5, que as diferenças entre os deslocamentos radiais (w) e as deformações circunferenciais (ϵ_c) dos tubos íntegro e reparados, na região central dos mesmos, são sempre inferiores a 1,2%, sugerindo que o reparo efetivamente restitui a rigidez original do tubo íntegro. Percebe-se também que os tubos desbastados, especificamente, apresentam deslocamentos radiais e deformações circunferenciais, na região central, aproximadamente duas vezes maiores em relação às dos tubos íntegros. Como estes valores são positivos, isto indicam que os trechos desbastados estufam, em relação ao restante do tubo. Adicionalmente, uma análise das Figuras 2 a 5, mostra que a tendência dos tubos reparados, em particular, de sofrer estrangulamento ou estufamento, na região restaurada com laminado de carbono/epóxi de espessura ideal prevista pela Equação 5, é praticamente inexistente. Se a Equação 5 não for respeitada, o trecho reparado estufa, se a espessura do reparo for menor que a ideal; e é estrangulado de o reparo possuir espessura maior. Isto indica que a metodologia adotada permite compensar a perda de espessura sofrida na região desbastada, quando o reparo é dimensionado de acordo com a Equação 5. Estas mesmas figuras mostram que os tubos desbastados sofrem estufamento localizado nos trechos nos quais a espessura original é diminuída.

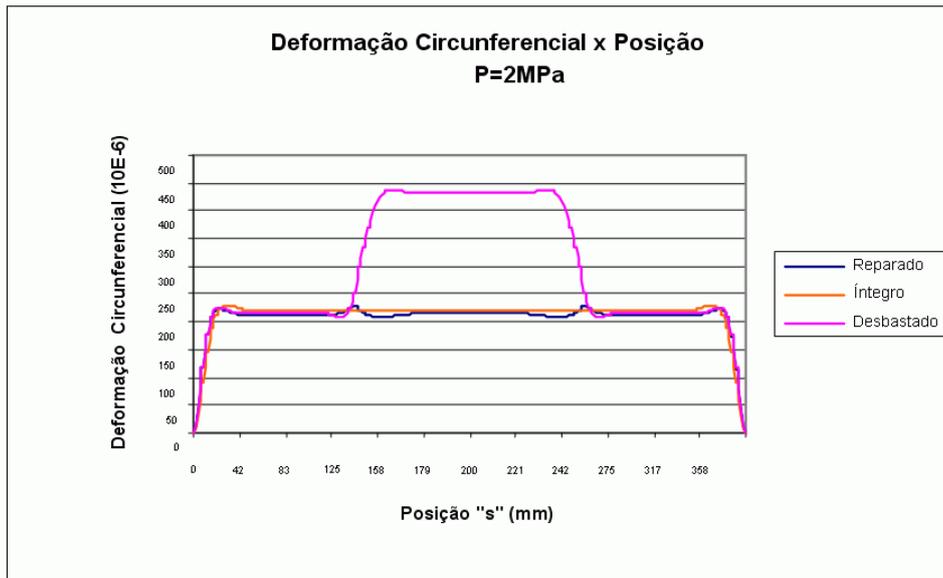


Figura 2: Deformações circunferenciais ($\Delta R/R$) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de 2 MPa.

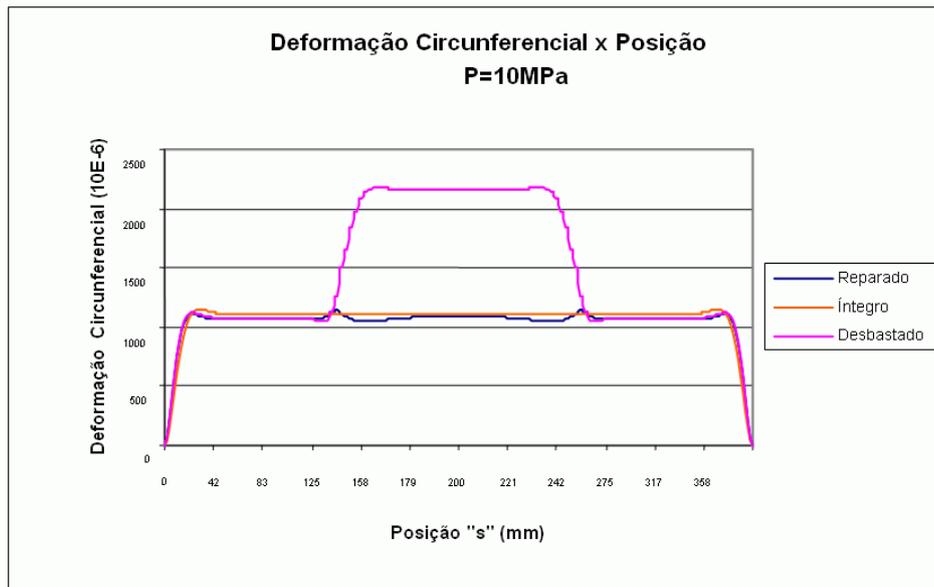


Figura 3: Deformações circunferenciais ($\Delta R/R$) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de 10 MPa.

Nota-se que há proporcionalidade entre os valores das ordenadas ($\Delta R/R$) nos gráficos apresentados nas Figuras 2 e 3, correspondentes às pressões de 2 e 10 MPa, respectivamente. Nesta faixa de pressões, foi verificada uma relação linear entre os aumentos de diâmetro e os incrementos de pressão. Assim, para os valores de pressão intermediários de 4, 6 e 8 MPa, os valores de deformações circunferenciais ($\Delta R/R$) correspondentes foram proporcionais às pressões. Tal fato também pode ser confirmado observando-se os valores apresentados na Tabela 5.

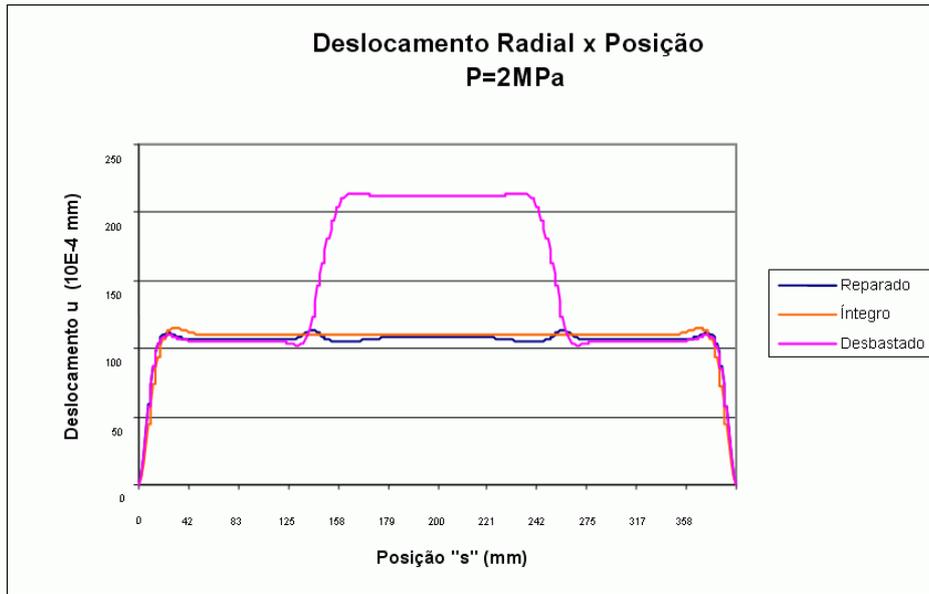


Figura 4: Deslocamentos radiais (w) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **2 MPa**.

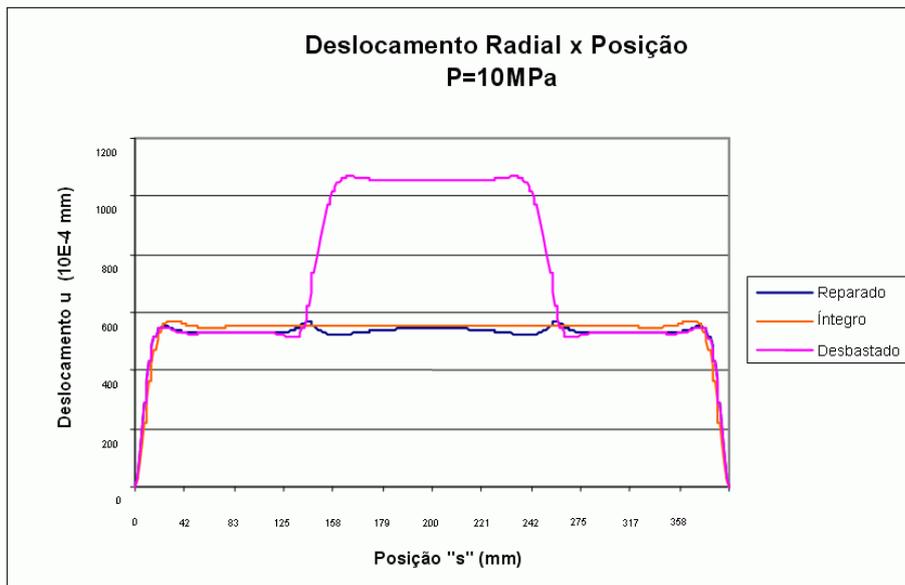


Figura 5: Deslocamentos radiais (w) ao longo do comprimento dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **10 MPa**.

Nota-se que há proporcionalidade entre os valores das ordenadas ($\Delta R = w$) nos gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5, correspondentes às pressões de 2 e 10 MPa, respectivamente. Sendo que, para os valores de pressão intermediários de 4, 6 e 8 MPa, os valores de deslocamentos radiais (w) correspondentes foram proporcionais às respectivas pressões. Tal fato também pode ser confirmado observando-se os valores apresentados na Tabela 4. Isto indica que o comportamento dos tubos, nas simulações de pressurização, é do tipo linear e elástico

O tubo de Aço AISI 1020 íntegro apresentava uma massa de 1,98 Kg e uma espessura constante inicial de 2 mm. No trecho desbastado, de 100 mm de extensão, esta espessura foi reduzida para 1 mm (diminuição de 50% na parede do cilindro) e, como consequência, sua massa baixou para 1,73 Kg. Sendo que, após o reparo com Carbono/Epóxi com espessura (t_{rep}) de 3,05mm, conforme ilustrado na Figura 6, e

massa de 0,15 Kg, o tubo reparado passou a apresentar uma massa final de 1,88 Kg. Houve então uma **redução** em relação à massa inicial do tubo íntegro, ou seja, o tubo reparado é ligeiramente mais leve que o tubo íntegro. Esta redução de massa deve-se, em parte, ao fato de a densidade do aço ser de $7,8 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a do carbono/epóxi ser de apenas $1,6 \text{ g/cm}^3$. Entretanto, uma análise mais aprofundada dos dados da Tabela 2, revela que o carbono/epóxi apresenta um quociente mais elevado da relação (E/ρ) entre o módulo de elasticidade (E) e a densidade (ρ). Trata-se então de um material estrutural mais eficiente, no que concerne à rigidez específica. Neste caso, ao se desbastar o tubo, retira-se o aço que tem uma relação (E/ρ) de 25,6 e o substitui pelo carbono/epóxi cuja relação (E/ρ) é de 40,9. Sendo que, como a rigidez do tubo na região desbastada é restaurada de forma ideal (i.e. na medida exata, sem tornar a região restaurada excessivamente rígida), de acordo com a Equação (5), o peso total do tubo reparado fica menor que o do tubo íntegro.

Também é importante destacar-se que, para realizar um reparo compósito, ao contrário de um reparo convencional metálico (p.ex. luva ou trecho adicional soldado), não é necessário interromper-se o fluxo de fluido no interior da tubulação [1]. Isto se deve ao fato de que, na operação de reparo, a resina epóxi do laminado ainda é moldável (encontra-se em estado de “gel”, no qual as ligações covalentes estão no início do processo de formação) e ao aderir-se ao trecho defeituoso adapta-se perfeitamente à superfície do tubo. Neste caso, não é necessário cortar e retirar o trecho defeituoso e substituí-lo por um novo.

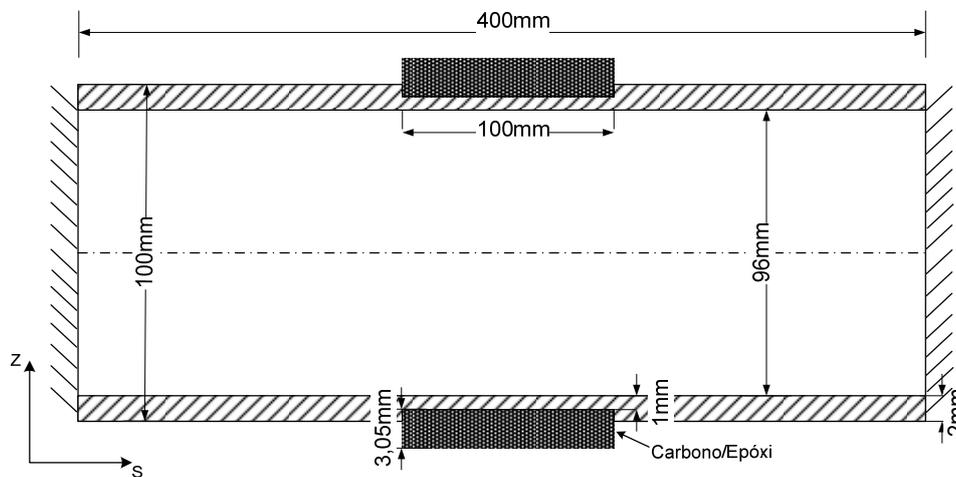


Figura 6: Representação do tubo reparado – Carbono/Epóxi.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando as Tabelas 4 e 5 observa-se que, para o tubo **reparado** com tecido de fibra de carbono e resina epóxi, o deslocamento radial máximo (w) e a deformação circunferencial máxima aproximam-se em mais de **98%** dos resultados apresentados pelo tubo **íntegro**. Isto é uma indicação de que a rigidez estrutural do tubo de aço, no trecho desbastado, foi praticamente restituída ao valor inicial dos tubos íntegros.

Os gráficos apresentados nas Figuras 2 a 5 demonstram que a recuperação do comportamento do tubo reparado, em relação ao desbastado, é plenamente satisfatória. Os deslocamentos radiais do tubo reparado se aproximam muito do comportamento desejado do tubo íntegro, em resposta às pressões internas ao qual está submetido. Em particular, enquanto que para o tubo desbastado há um claro “estufamento” do tubo na região desbastada (no trecho de 150 a 250 mm a partir das extremidades), para o tubo reparado com carbono/epóxi este “estufamento” praticamente desaparece. No trecho desbastado, em todas as pressões, o deslocamento radial máximo é cerca de duas vezes maior em relação ao apresentado pelo tubo íntegro. Porém, ao se aplicar o reparo, o “estufamento” (aumento localizado de raio) praticamente desaparece. Adicionalmente, o reparo também não provoca o estrangulamento do tubo, sugerindo que a espessura do laminado de carbono/epóxi, de 3,05 mm, é praticamente a ideal. Estudos anteriores indicam que se a espessura do reparo for excessiva o tubo sofre estrangulamento na região restaurada.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos das simulações numéricas do tubo de aço, desbastado de 1 mm (50% de sua espessura original) e reparado, em relação às do íntegro, são promissoras. Estas indicam que, com camadas

circunferenciais de material compósito carbono/epóxi, totalizando 3,05mm, é possível restabelecer-se a rigidez perdida quando do desbaste. Adicionalmente, o tubo reparado fica ligeiramente mais leve que o íntegro.

Percebe-se que a aproximação feita através das equações (1) a (5) são condizentes com o objetivo inicial de restaurar a rigidez, uma vez que a rigidez do tubo reparado, de acordo com as simulações numéricas, apresentou uma recuperação média, em termos de deformação circunferencial, de 98% em relação ao tubo íntegro. Pode-se chegar a essa conclusão, pois o comportamento do tubo em relação ao deslocamento radial e à conseqüente deformação circunferencial, está diretamente ligado à sua rigidez.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Eletronorte, pelo investimento realizado na execução deste estudo.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] TOUTANJI, H., DEMPSEY, S., “Stress Modeling of Pipelines Strengthened with Advanced Composite Materials”, *Thin Walled Structures*, v. 39, n. 2, pp. 153–165, 2001.
- [2] MAIA, G.C., *Comportamento Elástico de Cilindros Metálicos com e sem Reparo Circunferencial de Carbono/epóxi*, Dissertação de M.Sc. em Engenharia Mecânica, UnB, ENM, Brasília, Brasil, 2003.
- [3] LEVY NETO, F., *The Behaviour of Externally Pressurised Composite Domes*, Ph.D. Dissertation Thesis, University of Liverpool, Liverpool, UK, 1991.
- [4] LEVY NETO, F., FERREIRA, J.L., DE ALMEIDA E MAIA, G.C., “Stress Analysis of Internally Pressurized Aluminum Cylinders Repaired with Carbon/epoxy Hoop Stripes”, In: *Anais do VII COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, Florianópolis, 09-12, Setembro, 2003.
- [5] GIBSON, R.F., *Principles of Composite Material Mechanics*, New York, Mc-Graw Hill, 1994.
- [6] SILVA TELLES, P.C., *Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem*, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2003.
- [7] MACHADO, A. de P., *Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono*, São Paulo, Editora Pini, 2002.
- [8] THOMAZI, C.T.C.L., *Comportamento Mecânico de Dutos Metálicos Reparados com Materiais Compósitos*, Dissertação de M.Sc. em Engenharia Mecânica, UnB, ENM, Brasília, Brasil, 2006.