

ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES EM TUBOS DE AÇO REPARADOS COM COMPÓSITOS TIPO CARBONO/EPÓXI¹

Simulação Numérica de Cilindros com Reparos Compósitos Circunferenciais

Cinthia Thais de Carvalho Luz Thomazi²
Flaminio Levy Neto³

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar os valores de deformações circunferenciais obtidos através de simulações numéricas de tubos metálicos (Aço AISI 1020) desbastados em 50% na espessura, ao longo de 25% de sua região central, e reparados com o compósito Carbono / Epóxi (tecido de fibras, AS4 – Hexcel), submetidos a diferentes pressões internas, utilizando para isso o software de elementos finitos COMPSHELL. E, adicionalmente, verificar se os reparos 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 a rigidez perdida com o desbaste, sendo utilizadas como referências o deslocamento radial e a deformação circunferencial do tubo.

Palavras-chave: 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 deformations obtained from numerical simulations of metallic pipes (AISI Steel 1020, length $L = 400$ mm, external diameter $D = 400$ mm and thickness $t = 2$ mm), machined in thickness (reduction of 50%), along 25% of its central region, in order to simulate a defect, and repaired with a carbon/epoxy composite (balanced woven fabrics of fibers, AS4 – Hexcel), subjected to different internal pressures, using the finite element program COMPSHELL. And, in addition, verify if the applied 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. As far as this work is concerned, the required repair thickness is 3.05 mm.

Key words: Composite repairs; Metallic pipes.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

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

³ Professor, Ph.D., UnB / FT / ENM – 70.910-900 – Brasília - DF

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 oferece.⁽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 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.⁽⁵⁻⁷⁾

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. Se a espessura de um reparo é excessiva, 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.

2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA - COMPSHELL

2.1 Metodologia

Para a simulação numérica, foram considerados: (i) um tubo de Aço AISI 1020, íntegro, de espessura $t = 2$ 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 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⁾

Tabela 1. Configuração dos tubos simulados.

	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 de Carbono / Epóxi apresenta as seguintes frações volumétricas de fibra e matriz (resina), respectivamente (2): $v_f = 50\%$ e $v_m = 50\%$.

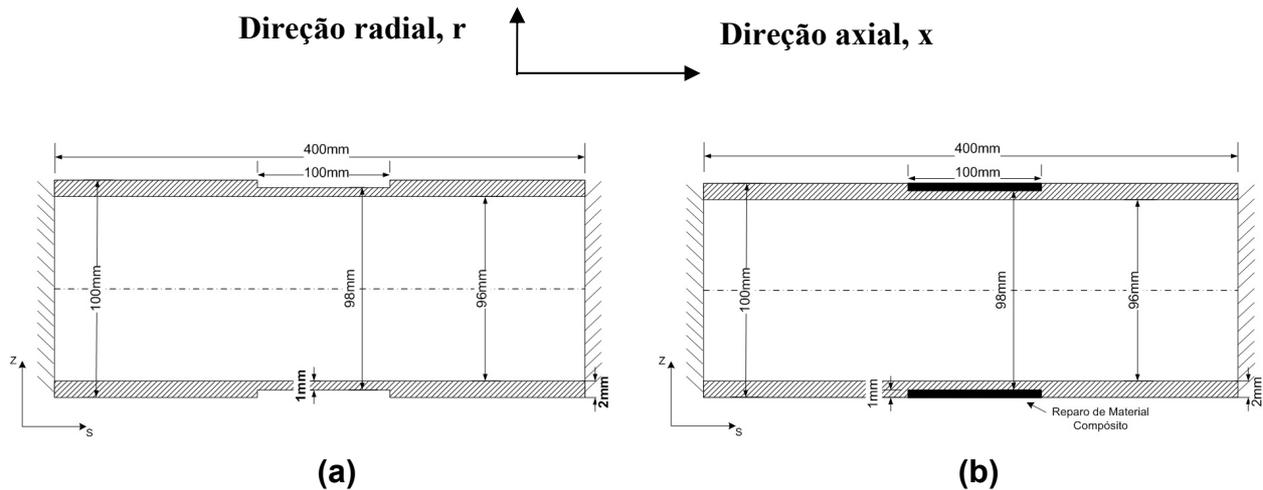


Figura 1. Representação dos tubos (a) íntegro e (b) reparado.

Esses tubos foram modelados como cilindros bi-engastados nas extremidades (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.

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

2.2 Espessura do Reparo

Como o objetivo da utilização do reparo é restabelecer o comportamento mecânico do tubo desbastado no que diz respeito às deformações circunferenciais, é importante determinar a espessura de reparo ideal necessária. Devido à pressão interna, o raio inicial (R) dos tubos aumenta esse acréscimo de raio (ΔR) é definido como sendo o deslocamento radial ($w = \Delta R$). O aumento na circunferência dos tubos ($2 \cdot \pi \cdot \Delta R$) em relação à circunferência inicial ($2 \cdot \pi \cdot R$) é a deformação circunferencial ($\Delta R/R$).

Para se 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 COMPSHELL.⁽³⁾

Tabela 3. Deformações Circunferenciais – Tubo íntegro e Tubo desbastado

Pressão (MPa)	ϵ_c Íntegro	ϵ_c Desbastado	Aumento %
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

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 se observe 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 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:

$$\sigma_{aço} = E_{aço} * \epsilon_{aço} \quad e \quad \sigma_{rep} = E_{rep} * \epsilon_{rep} \quad (1)$$

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

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

$$\frac{\sigma_{aço}}{E_{aço}} = \frac{\sigma_{rep}}{E_{rep}} \quad (2)$$

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

$$\sigma_1 = \frac{P * R}{t} \quad (3)$$

Onde:

σ = tensão circunferencial.

P = pressão interna.

R = raio interno.

t = espessura da parede.

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

$$\frac{P * R}{t_{aço} * E_{aço}} = \frac{P * R}{t_{rep} * E_{rep}} \quad (4)$$

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:

$$t_{rep} * E_{rep} = 1 * E_{aço} \quad (5)$$

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

$$t_{rep} = \frac{1 * E_{aço}}{E_{rep}} = \frac{1 * 200.000}{65.518} \Rightarrow t_{rep} = 3,05\text{mm}$$

3 RESULTADOS OBTIDOS

Os tubos foram submetidos a vários valores de pressão, desde 2 MPa 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 ($\Delta R/R$). Para todas as pressões fora utilizada a espessura do reparo de carbono/epóxi (t_{rep}) de 3,05mm. Esses valores estão listados na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente.

Com os valores de pressão (P) 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.

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.

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

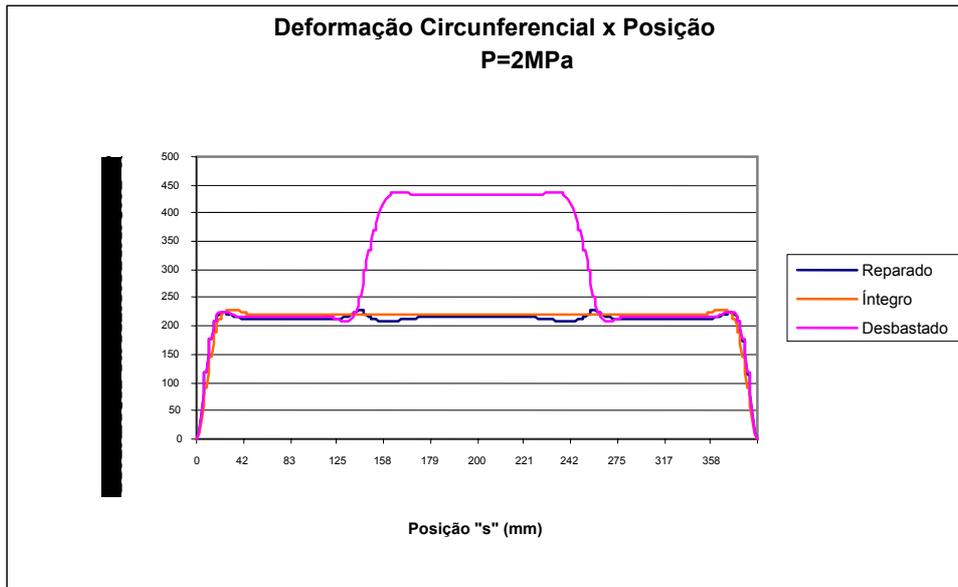


Figura 2. Deformações circunferenciais ($\Delta R/R$) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **2 MPa**.

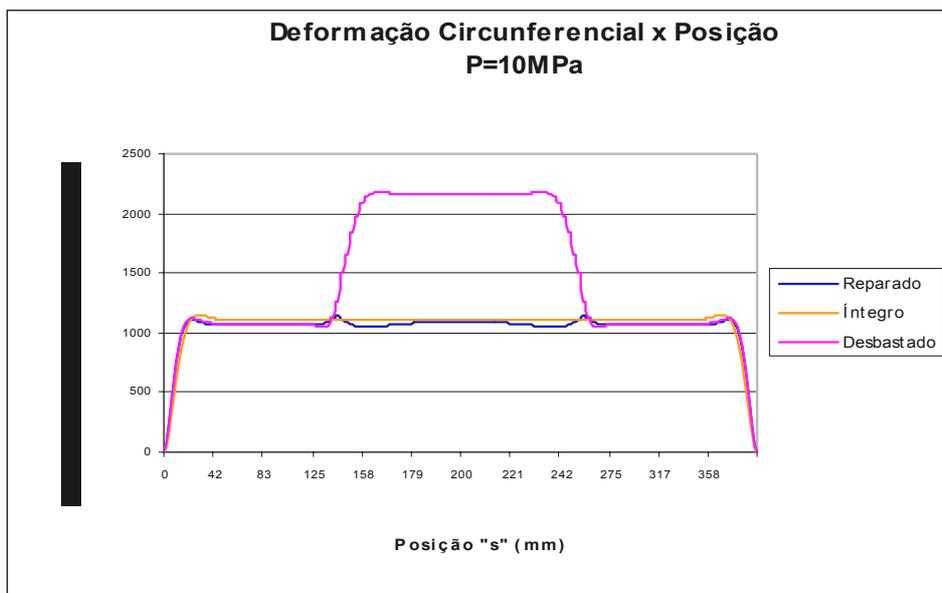


Figura 3. Deformações circunferenciais ($\Delta R/R$) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **10 MPa**.

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. E, 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.

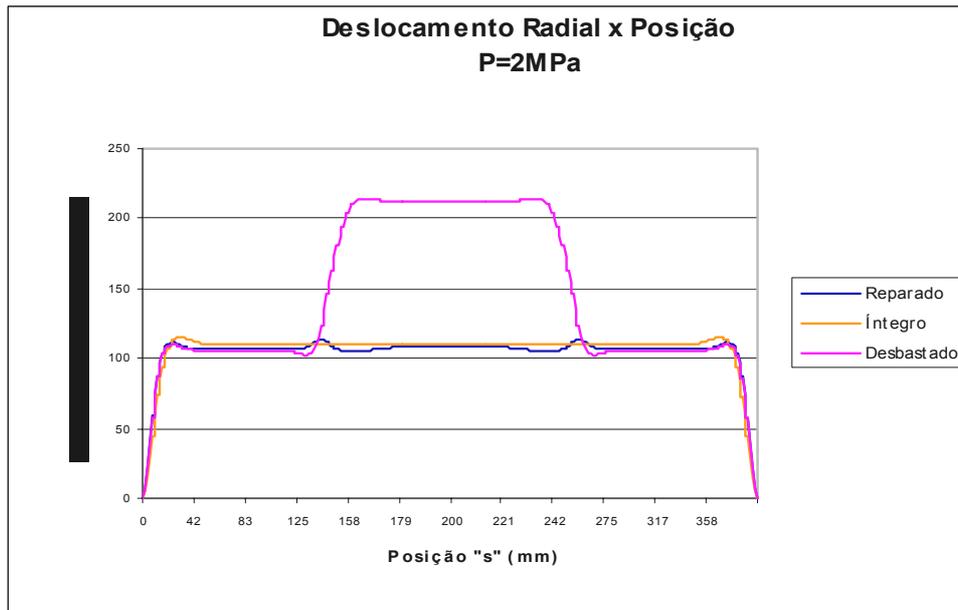


Figura 4. Deslocamentos radiais (w) ao longo dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **2 MPa**.

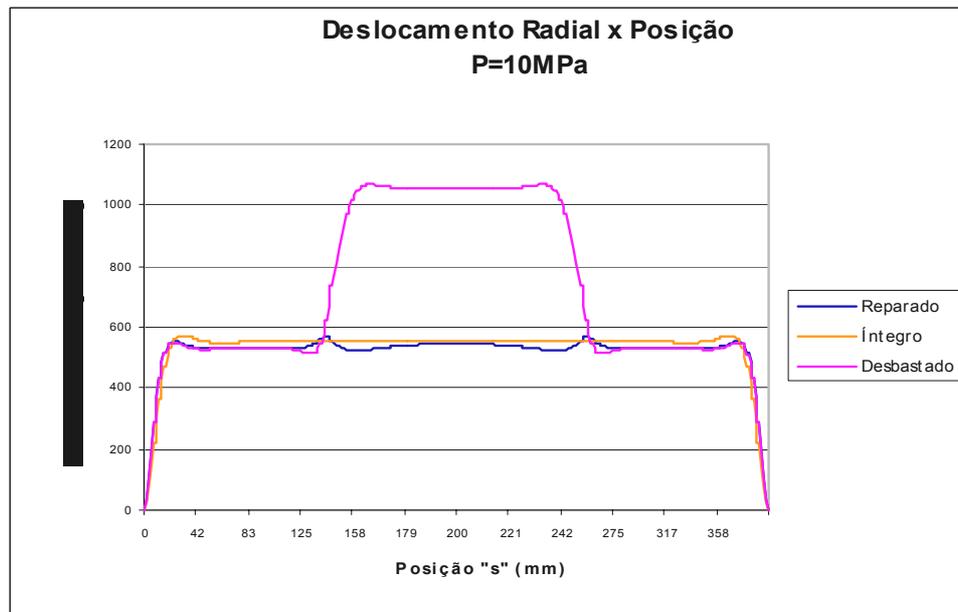


Figura 5. Deslocamentos radiais (w) ao longo do comprimento dos tubos reparado, íntegro e desbastado para pressão interna de **10 MPa**.

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. E, para os valores de pressão intermediários de 4, 6 e 8 MPa, os valores de deslocamentos radiais (w) correspondentes foram proporcionais às pressões. Tal fato também pode ser confirmado observando-se os valores apresentados na Tabela 4.

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 e, como conseqüência, sua massa baixou para 1,73 Kg. E, 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 g/cm³**, enquanto que a do carbono/epóxi ser de apenas **1,6 g/cm³**. 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). 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. E, como a rigidez do tubo na região desbastada é restaurada, de acordo com a equação (5), o peso total do tubo reparado fica menor que o do tubo íntegro.

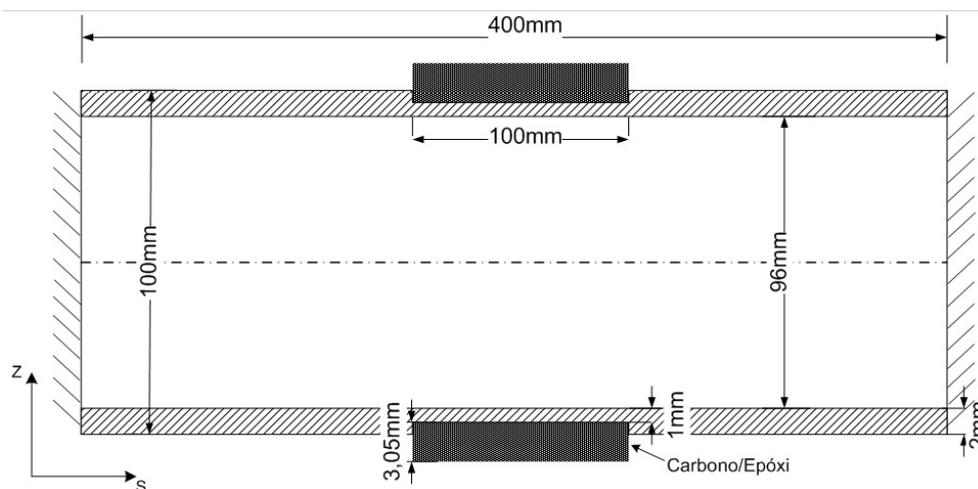


Figura 6. Representação do tubo reparado – Carbono/Epóxi.

3 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.

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. E, ao se aplicar o reparo, o “estufamento” praticamente desaparece.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos das simulações numéricas do tubo de aço 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 de 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.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 TOUTANJI, H. and DEMPSEY, S., Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composite materials, **Thin Walled Structures**, Vol. 39, Issue 2, Feb. 2001, pp. 153 – 165, feb. 2001.
- 2 MAIA, G.C., Comportamento Elástico de Cilindros Metálicos com e sem Reparo Circunferencial de Carbono/epóxi, **Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**, UnB, ENM, 2003.
- 3 LEVY NETO, F., The behaviour of externally pressurised composite domes “, **Ph.D. Dissertation Thesis**, University of Liverpool, 1991.
- 4 LEVY NETO, F., FERREIRA, J.L. DE ALMEIDA E MAIA, G.C., 2003, “Stress Analysis of Internally Pressurized Aluminum Cylinders Repaired with Carbon/epoxy Hoop Stripes”, **Anais do VII COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**, Florianópolis, 09-12, setembro de 2003.
- 5 GIBSON, R. F., **Principles of Composite Material Mechanics**, MC Graww Hill, New York, 1994.
- 6 SILVA TELLES, P. C., **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem**, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2003.
- 7 MACHADO, A. DE P., **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**, Editora Pini, São Paulo, 2002.