

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO USO DE ARAMES PRÉ-TENSIONADOS PARA
REPARO DE DUTOS**

por

Daniela Ramminger Pissanti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2011

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO USO DE ARAMES PRÉ-TENSIONADOS PARA
REPARO DE DUTOS**

por

Daniela Ramminger Pissanti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, 27 de junho de 2011.

Dedico este trabalho aos meus pais que me apoiaram durante todo o caminho, à minha irmã que sempre esteve presente e à Débora que com sua amizade me deu forças em todos os momentos.

RAMMINGER PISSANTI, D. **ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO USO DE ARAMES PRÉ-TENSIONADOS PARA REPARO DE DUTOS**. 2011. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo criar um modelo em elementos finitos que simulasse o comportamento de um duto quando submetido a um reparo com arame pré-tensionado e, com o modelo, analisar diferentes variáveis. O trabalho utilizou um método analítico encontrado na norma *ASME Divisão 3 Seção VIII artigo KD-9*. Foram analisados dois modelos em elementos finitos, que se diferem pela aplicação da pré-tensão no arame, um utiliza variação de temperatura no arame, e o outro utiliza deslocamento prescrito no arame. Para a realização do modelo com variação de temperatura no arame, utilizou-se o trabalho de Alegre et al., (2008). Verificou-se que o modelo numérico que apresentou maior precisão comparado com o modelo analítico, foi o de variação de temperatura. Com a validação do modelo numérico, é possível explorar diversas situações de reparos. Na segunda etapa do trabalho realizou-se uma análise mais completa do comportamento do tubo quando aplicado o reparo, observando o efeito de borda presente no sistema. Verificado o prejuízo desse efeito no tubo, foram procuradas alternativas de reparo para minimizá-lo. Algumas configurações foram estudadas e constatou-se que é possível minimizar a concentração de tensão provocada pelo reparo. A principal sugestão é aplicar mais camadas de arame, tendo a camada superior um menor comprimento que a camada inferior. Dessa forma aumenta-se o intervalo do gradiente de tensão que ocorre no reparo, diminuindo os danos de flexão e concentração de tensão.

PALAVRAS-CHAVE: *Reparo de dutos, FEM, Efeito de borda, Wire-winding.*

RAMMINGER PISSANTI, D. **FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE USE OF PRESTRESSED WIRES FOR REPAIR OF PIPELINES.** 2011. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The present study has the objective of creating a model in finite elements method that simulates the behavior of a pipeline when submitted to a repair with a prestressed wire and with this model analyze different variables. The study utilized an analytical method found in the ASME standard, division 3 section VIII article KD-9. There were analyzed two model in finite element analysis that differ by the type of prestressed applied to the wire, one is based on the change of temperature in the wire and the other in prescribed displacement. For the temperature change model the work of Alegre et al., (2008), was used. It was verified that the temperature change numeric model was the one to show the greater precision when compared with the analytical model. With this numeric model validated it is possible to explore several repair situations. On the second stage of the study, a more complete analysis was made of the pipe when the repair is applied, observing the border effect present in the system. Verified the harm of this effect in the pipe, repair alternatives were search to minimize this effect. Some configurations were studied and it has been found that it is possible to minimize the stress accumulation caused by the repair. The main suggestion is to apply more layer of wire, with the upper layer with a smaller length than the lower layer. This way, the stress gradient distance in the repair is increased, reducing the damages caused by flexure and stress accumulation.

KEYWORDS: *Pipeline repair, FEM, Border effect, Wire-winding*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO	2
2.1. MODELO ANALÍTICO	3
2.2. MODELO NUMÉRICO	4
2.3. PRÉ-TENSÃO SIMULADA ATRAVÉS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	4
2.4. PRÉ-TENSÃO SIMULADA ATRAVÉS DE UM DESLOCAMENTO PRESCRITO	6
3. ANÁLISE DO EFEITO DE BORDA.....	8
3.1. ALTERNATIVAS DE REPARO	10
3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	12
4. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico nacional está ligado diretamente com a disponibilidade de energia do país, e uma das novas fontes de energia com potencial para expansão é o Gás Natural. Atualmente, o transporte de gás em território nacional acontece em sua maior parte por tubulações subterrâneas, os gasodutos. Essas linhas de transporte realizam o transporte do gás de forma intermitente, o que garante o suprimento direto e eficaz da refinaria até o consumidor. Um dos recentes investimentos nacionais se dirige à implantação de gasodutos para viabilizar novas energias tanto para a indústria quanto para o consumidor. Com a implementação do Gasbol (gasoduto Brasil-Bolívia), o Brasil entra em um grande mercado de introdução e manutenção de gasodutos, existindo, hoje, mais de 2.500km no trecho brasileiro e planos para expansões [TBG, 2011]. A manutenção dessas linhas é rigorosa e inspeções periódicas são realizadas de forma a evitar que aquelas que possuem algum dano operem em limites fora da norma. Nesse contexto, quando ocorre algum dano à tubulação, é feita uma análise da gravidade do defeito e verificada a melhor forma para realizar seu reparo. Para tanto, ao longo do tempo, foram desenvolvidos diversos tipos de reparo de dutos, cada um com uma característica que garante seu espaço no mercado. Os dois tipos principais de reparo de dutos são classificados em reparo a frio e reparo a quente. O primeiro utiliza materiais compósitos como fibra de vidro e resina que, aplicados na parte danificada do duto, absorvem suas tensões excessivas. O segundo reparo utiliza o mesmo material do duto, mas em forma de calhas, as quais se posicionam de maneira a envolver a região danificada. Para a fixação dessas calhas, aplica-se solda entre elas e o duto. Como tais reparos são utilizados em escala comercial, a maioria das informações é encontrada em patentes que são elencadas a seguir:

- a) a patente nacional sob o processo número PI 0204010-7 contempla o método de reparo através de várias camadas intercaladas de manta e tecido de fibra de vidro que são aderidas através de impregnação de resina epóxi;
- b) a patente norte-americana de inscrição US 5487411 utiliza um sistema de duas luvas, uma de material polimérico termofixo e outra de material polimérico termoplástico;
- c) outras duas patentes norte-americanas, de números US 7066210 e US 5950683, descrevem métodos que utilizam um par de luvas metálicas que são aplicadas sobre o tubo com um aperto determinado e, após, são unidas entre si por processo de solda. Esse método prevê a aplicação de luvas metálicas comprimidas contra o tubo através de cintas ou correntes, fazendo com que sejam geradas tensões circunferenciais opostas às do tubo pressurizado. O efeito, entretanto, não é efetivo pelo fato de que cada cinta ou corrente tem uma área bastante restrita de atuação.

Recentemente, surgiu uma tecnologia nacional para o reparo de dutos que inova ao aplicar um reparo a frio (geralmente com polímeros) com características de reparo a quente (aqueles que utilizam solda). Como base neste trabalho, portanto, será utilizada a patente nacional com número de inscrição PI 0706196-0, denominada Método de reparo de tubulações através de reforço produzido por enrolamento de fios ou cabos monofilamento ou multifilamento em torno do tubo na região do defeito. O procedimento do invento é enrolar um fio ou um cabo pré-tensionado no tubo, de modo a obter a forma de uma bobina com uma ou mais camadas, produzindo-se assim, um esforço que irá evitar o colapso do duto [Frainer, 2009].

Essa nova tecnologia que está sendo explorada por uma empresa gaúcha, utiliza arame aço mola de alta resistência mecânica, resina de alta dureza e uma máquina para realizar o processo. O procedimento se baseia em aplicar a resina na superfície do duto que tenha algum desnível devido ao dano, pré-tensionar o arame e, por fim, enrolar o arame pré-tensionado ao redor do duto. O comprimento do reparo depende muito de quanto o duto está danificado.

Contudo, para uma nova tecnologia se inserir no mercado de reparo de dutos, são exigidos diversos cálculos, testes, análises e, obviamente, garantia na qualidade do reparo. Em pesquisa realizada sobre o tema do trabalho, foi localizado um artigo que demonstra o procedimento de simulação de vasos de pressão quando utilizada uma técnica de enrolamento de arame. O artigo de Alegre et al., 2008, calibra seu modelo de elementos finitos com o cálculo analítico disponível na norma *ASME Código 3 Seção VIII, artigo KD-9* (doravante denominada norma *Wire-Wound*). O método utilizado no artigo aplica uma variação de temperatura na camada do arame, que corresponde à deformação que o arame sofre pela pré-tensão aplicada nele. O cálculo analítico, disponível na norma, fornece as tensões tangencial e radial sofridas pelo tubo e pelo arame durante o processo. Essas tensões são comparadas com o modelo que utiliza a variação de temperatura.

Dessa forma, o intuito desse trabalho é iniciar uma análise numérica do comportamento estático do duto quando aplicado o reparo. Para isso procura-se validar o modelo de elementos finitos com cálculo analítico disponível e, uma vez obtido um modelo numérico válido, é possível fazer diversas análises com diferentes condições que não possuem solução analítica. Neste trabalho fez-se a análise do efeito de borda que ocorre quando aplicado o reparo. O último estágio do trabalho comenta opções de configurações do reparo como, por exemplo, o número de camadas de arame a serem utilizadas e a necessidade da presença de uma distância de borda entre elas.

2. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

Para realizar este trabalho, fez-se um modelo em elementos finitos com condições iguais ao modelo calculado analiticamente pela norma *Wire-Wound*, porém, com duas possibilidades de aplicação de pré-tensão: a primeira é utilizar a variação de temperatura no arame e, a segunda, é utilizar um deslocamento prescrito no arame.

As condições para a aplicação do cálculo analítico neste problema, segundo a norma *Wire-Wound*, são as seguintes:

- as equações são válidas para arames lisos de seção retangular dispostas lado a lado. Outras formas de arame são válidas, mas correções deverão ser feitas;
- o ângulo da hélice do enrolamento deve ser inferior a 1,0 grau;
- a diferença máxima entre os arames no sentido longitudinal do tubo deve ser inferior a 5% da largura dos fios;
- nem o arame, nem o tubo, podem ceder.

O problema real e o modelo analítico, para um melhor entendimento do problema, estão representados na Figura 2.1, com suas respectivas diferenças e adaptações.

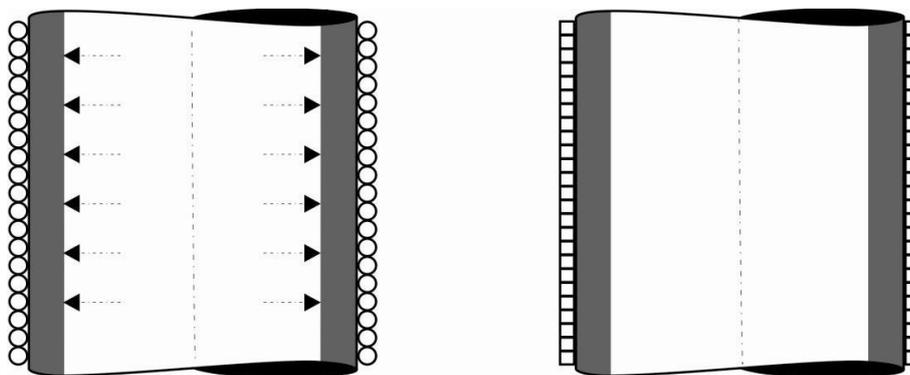


Figura 2.1 - Ilustração da situação real (à esquerda) e o do modelo analítico (à direita).

A principal diferença entre os modelos é o fato de que o arame, em situação real, é de seção circular e, no modelo analítico, será considerado quadrado de área equivalente à seção circular, sendo esta a única correção que será considerada.

2.1. MODELO ANALÍTICO

A norma *Wire-Wound* calcula a diminuição do diâmetro interno do cilindro e as tensões residuais em todos os pontos da parede do duto induzida pela operação de enrolamento do arame. Também são calculadas pela norma as tensões residuais no arame em qualquer camada do enrolamento. Nela, é assumido que a pré-tensão imposta ao arame para o enrolamento, é $S_w(x)$, a qual é função do diâmetro de coordenada x , como visto na Figura 2.2. Ainda na Figura 2.2, tem-se a configuração do processo de enrolamento, bem como suas dimensões.

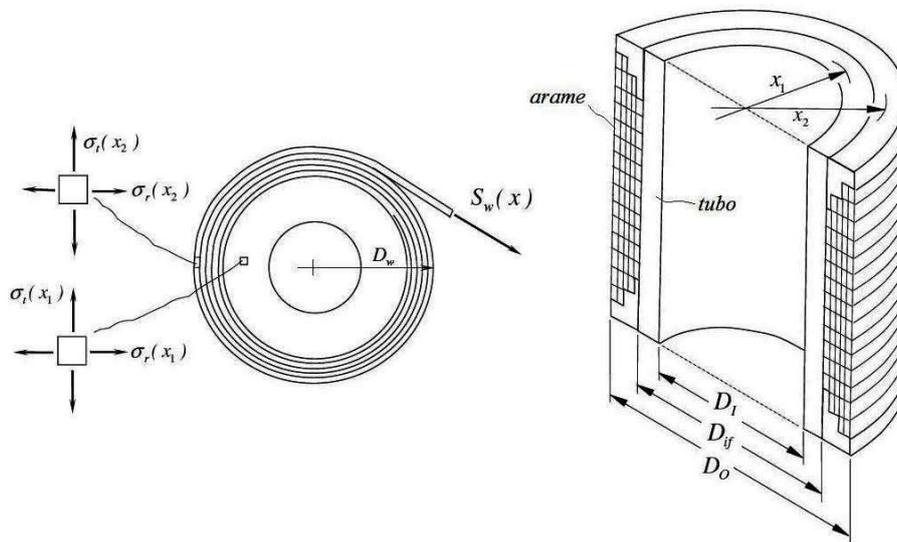


Figura 2.2 - Configuração do processo de enrolamento e suas dimensões (Alegre et al., 2008)

Quando as camadas de arame são aplicadas entre $x = D_{if}$ e $x = D_w$, são introduzidas no diâmetro x_1 do tubo as tensões tangencial $\sigma_t(x_1)$ e radial $\sigma_r(x_1)$. O deslocamento δ inserido no diâmetro do duto também é função de x_1 , conforme demonstrado nas equações (2.1) – (2.3).

$$\sigma_t(x_1) = - \left[1 + \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{if}}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_I^2} S_w(x) \right) dx \quad (2.1)$$

$$\sigma_r(x_1) = - \left[1 - \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{if}}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_I^2} S_w(x) \right) dx \quad (2.2)$$

$$\delta = - \frac{2D_I}{E} \int_{D_{if}}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_I^2} S_w(x) \right) dx \quad (2.3)$$

onde D_I é o diâmetro interno do tubo, D_{if} é o diâmetro na interface do tubo-aramé, D_O é o diâmetro externo após o processo de enrolamento do arame, D_w é o diâmetro externo instantâneo durante a aplicação do arame, E é o módulo de elasticidade, x_1 é o diâmetro de análise no tubo e x_2 é o diâmetro de análise no arame.

Neste trabalho, padronizou-se uma situação na qual será utilizado um tubo de 8 polegadas (203,2mm) de diâmetro externo, com espessura de $\frac{1}{4}$ de polegada (6,35mm). O arame utilizado nesta nova técnica tem seção circular de 2mm de diâmetro, porém, visto que essa modelagem exige que a seção seja retangular, trabalha-se com uma seção quadrada de lado 1,77mm que mantém a mesma área da seção circular. Para efeitos de validação do modelo, é definido o diâmetro interno do tubo (D_I) como o ponto para comparar os modelos analíticos e numéricos.

Para obter uma pré-tensão no arame, foi aplicada sobre ele uma carga estabelecida pelos próprios criadores do novo reparo, que, inicialmente, é de 800N. Com essa carga, tem-se que a pré-tensão aplicada no reparo é $S_w(x) = 250 MPa$. Tal pré-tensão é constante, não variando com x . Os cálculos foram realizados utilizando um *software* de matemática simbólica [Wolfram Mathematica, 2008], obtendo-se os resultados a seguir:

$\sigma_t(D_I) = -71 MPa$ – tensão tangencial no tubo em seu diâmetro interno;

$\sigma_r(D_I) = 0 MPa$ – tensão radial no tubo em seu diâmetro interno;

$\delta = -0,066 mm$ – deslocamento no diâmetro sofrido pelo tubo;

2.2. MODELO NUMÉRICO

Neste trabalho, foi utilizado um *software* de elementos finitos [Abaqus, 2009] e o elemento *default* para modelos axissimétricos CAX4R. Esse é um elemento axissimétrico quadrilátero bilinear, de quatro nós, para análise de tensão e deformação de sólidos, com integração reduzida e controle *hourglass*. Sua utilização é recomendada para uma análise linear e não linear que envolva estudos complexos compreendendo contato, plasticidade e grandes deformações. O controle *hourglass*, por sua vez, procura evitar que os elementos (os quais possuem apenas um ponto de integração) distorçam de tal forma que as deformações calculadas no ponto de integração sejam todas zero, o que conduziria a uma distorção descontrolada na malha. O CAX4R contém esse controle, porém é recomendado o uso de uma malha bem refinada [Belytschko e Bachrach, 1985].

A integração reduzida pode ser utilizada para elementos quadriláteros e hexaédricos, e consiste em utilizar um ponto de integração a menos em cada direção que o processo de integração completa. Nesse sentido, foi realizada uma análise utilizando o elemento CAX4 (igual ao mencionado acima, mas com integração completa), não se verificando diferença no resultado. Em razão disso, manteve-se o elemento CAX4R por ter um tempo computacional 15% menor.

2.3. PRÉ-TENSÃO SIMULADA ATRAVÉS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Para aplicação do modelo de elementos finitos com variação de temperatura, é necessário estimar qual temperatura equivale à deformação que o reparo causa no tubo. Essa estimativa foi obtida com o cálculo proposto por Alegre et al.,2008, em seu artigo, tendo o seguinte desenvolvimento:

$$\Delta D_w = \varepsilon_t \cdot D_w \approx \left(\frac{x \cdot D_w}{2tE} + \alpha \Delta T \right) \cdot D_w \quad (2.4)$$

onde ΔD_w é a variação do diâmetro externo do arame, t é a espessura do arame, $\alpha\Delta T$ é a deformação térmica sofrida pelo arame e X é a pressão de contato na interface tubo-aramé.

$$X = \frac{S_w \cdot 2t}{D_w} \quad (2.5)$$

O deslocamento diametral na parte interna da camada de arame pode ser obtido pelas equações de distribuição de tensão de um cilindro de paredes finas, sujeito a uma pressão externa X . Para um diâmetro externo específico, as tensões tangencial e radial são:

$$\sigma_t = -\frac{D_f^2 \cdot X}{D_w^2 - D_f^2} \left(1 + \frac{D_f^2}{D_w^2}\right) \quad (2.6)$$

$$\sigma_r = -X \quad (2.7)$$

Aplica-se a lei de *Hooke* para determinar ε_t e, portanto, a variação do diâmetro externo da parte interna da camada de arame pode ser expressa como:

$$\Delta D_w = \varepsilon_t \cdot D_w = \left(-\frac{X}{E} \cdot \frac{D_w^2 + D_f^2}{D_w^2 - D_f^2} + \frac{\nu}{E} X\right) \cdot D_w \approx \left(-\frac{X}{E} \cdot \frac{D_w^2 + D_f^2}{D_w^2 - D_f^2}\right) \cdot D_w \quad (2.8)$$

onde ν é o coeficiente de *Poisson* do material.

Igualando-se as equações (2.4) e (2.8), obtém-se a seguinte expressão:

$$\left(\frac{X \cdot D_w}{2tE} + \alpha\Delta T\right) = \left(-\frac{X}{E} \cdot \frac{D_w^2 + D_f^2}{D_w^2 - D_f^2}\right) \quad (2.9)$$

Isolando-se a deformação térmica e substituindo-se a equação (2.5) na expressão (2.9), é obtida a equação abaixo:

$$\alpha\Delta T_w(S_w) = -\frac{S_w}{E} \left[1 + \frac{2t}{D_w} \cdot \frac{D_w^2 + D_f^2}{D_w^2 - D_f^2}\right] \quad (2.10)$$

Essa equação indica a variação de temperatura que, quando aplicada no arame, equivale à pré-tensão S_w imposta durante o enrolamento.

A variação de temperatura no problema atual, considerando que $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \text{°C}^{-1}$, é:

$$\Delta T_w(S_w) = -147 \text{°C}$$

Com essa informação disponível, é aplicada a variação de temperatura no modelo de elementos finitos. Na Figura 2.3, verifica-se a configuração utilizada no modelo numérico. O modelo criado é axissimétrico com simetria no tubo e no arame na direção do comprimento do tubo. Existe o contato entre a superfície externa do tubo e a superfície interna do arame, e por fim, aplica-se a variação de temperatura no arame. Outra modificação em

relação ao modelo analítico apresentado anteriormente foi aplicada: os arames foram considerados um corpo retangular único com altura igual à espessura anteriormente citada e comprimento igual ao do tubo.

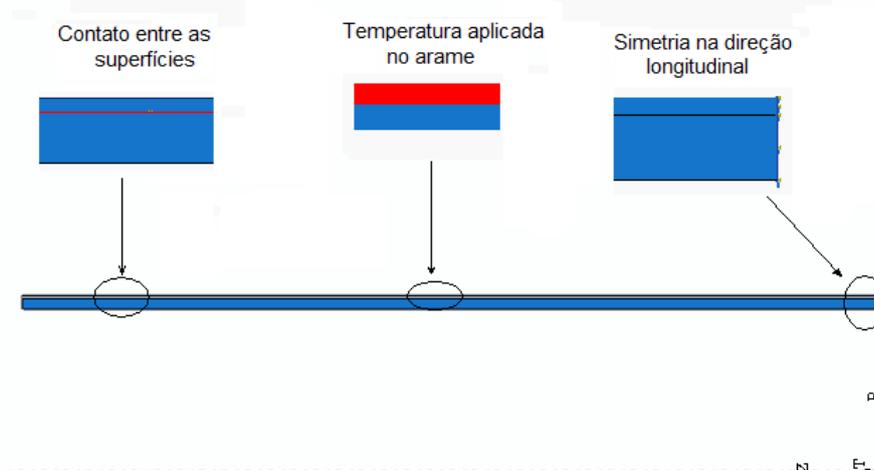


Figura 2.3 – Condições de contorno aplicadas ao modelo de elementos finitos de temperatura.

Nesse primeiro modelo comparando-se com o cálculo analítico, foi obtida uma diferença média de 5% na tensão tangencial do tubo. O resultado é apresentado na Figura 2.4.

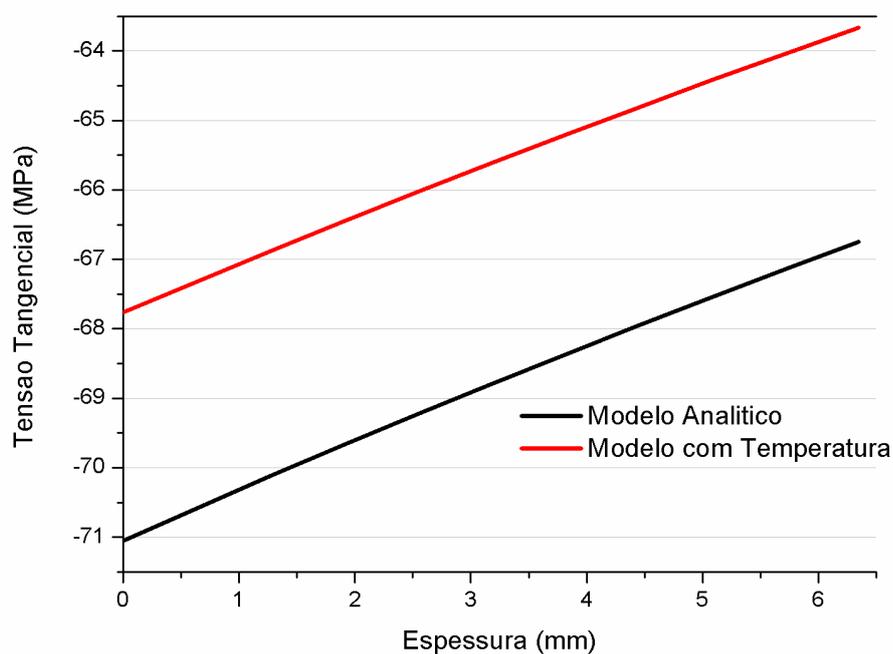


Figura 2.4 – Comparação entre o modelo analítico e modelo numérico usando temperatura.

2.4. PRÉ-TENSÃO SIMULADA ATRAVÉS DE UM DESLOCAMENTO PRESCRITO

Esse modelo propõe a aplicação de um deslocamento no arame que seja equivalente ao sofrido pelo tubo quando submetido ao reparo. A diferença quanto ao modelo anterior é que ao invés de aplicar uma variação de temperatura no arame, o arame será forçado a se deslocar em direção ao tubo. A norma *Wire-Wound* fornece o deslocamento

inserido no diâmetro do tubo, δ , pela aplicação do reparo com pré-tensão S_w , demonstrada na equação (2.3). Para aplicar um deslocamento prescrito em um modelo axissimétrico, é necessária a deformação radial, a qual é obtida dividindo-se a deformação diametral por 2:

$$\delta_r = -0,033 \text{ mm}$$

onde δ_r é o deslocamento da direção radial aplicado no arame. As outras condições de contorno são iguais ao do modelo anterior. Todas seguem representadas na figura 2.5.

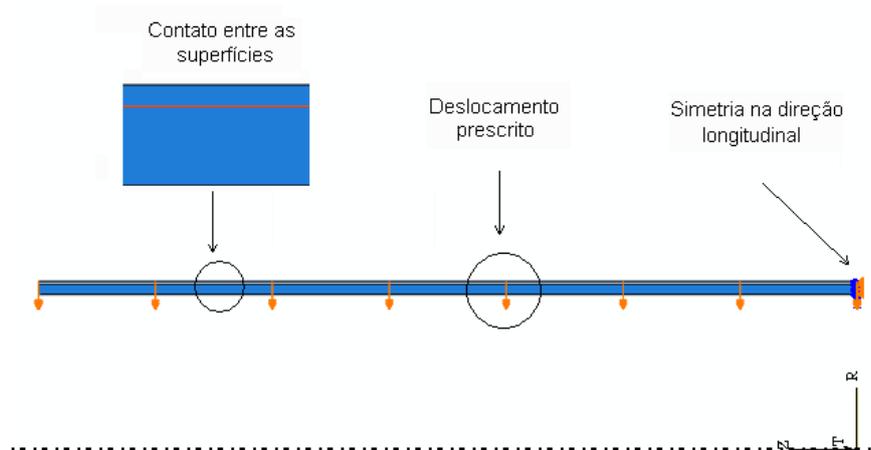


Figura 2.5 – Condições de contorno aplicadas ao modelo de elementos finitos de deslocamento prescrito.

Nesse segundo modelo de elementos finitos, o resultado da tensão tangencial obteve uma diferença média de 13% comparado com o resultado analítico. A comparação dos resultados é observada na Figura 2.6.

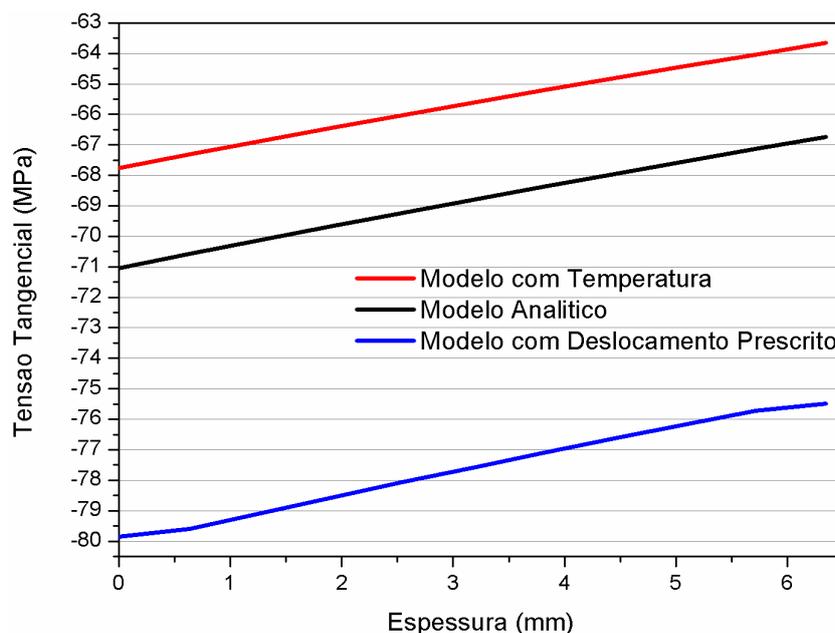


Figura 2.6 – Comparação entre o modelo analítico, modelo com temperatura e modelo numérico usando deslocamento prescrito.

3. ANÁLISE DO EFEITO DE BORDA

Comparados os modelos propostos com o modelo analítico, foi observado que o modelo de elementos finitos com uso de variação de temperatura obteve o menor erro, além de ter o comportamento de distribuição de tensões mais similar com o do analítico. É sabido também que, ao se utilizar de um deslocamento prescrito, é imposta uma situação mais severa, pois se impõe a situação final, não existe uma situação intermediária tal como acontece aplicando-se a variação de temperatura.

Diante desses resultados, é escolhido o modelo numérico com variação de temperatura para realizar a análise do reparo de forma mais completa. É importante salientar que, neste trabalho, foi escolhido apenas uma situação para análise, porém, de posse deste modelo numérico validado, é possível explorar diversas situações de campo, assim como diferentes técnicas de reparo.

Para realizar a análise do efeito de borda, deve-se, primeiramente, saber qual o comportamento do tubo sem aplicação de reparo, ou seja, quais as tensões nele aplicadas caso se encontre apenas com a pressão interna. A pressão interna de operação depende muito da transportadora e do tamanho da rede. No *site* da transportadora de gás [TRANSPETRO, 2011], encontra-se um documento denominado “*Características físicas e capacidade máxima das instalações de transporte, nas melhores condições operacionais*” que contém as informações de pressão de operação do duto, juntamente com o diâmetro utilizado em cada linha. Para este trabalho, que utiliza uma tubulação de 8 polegadas de diâmetro, a transportadora trabalha com uma pressão de operação de $6,86\text{ MPa}$ no gasoduto Lagoa Parda – Vitória. Dessa forma, tais condições de operação serão utilizadas para aplicação no modelo de análise por elementos finitos. Na figura 3.1, é possível observar as tensões tangenciais atuantes no duto em função de sua espessura.

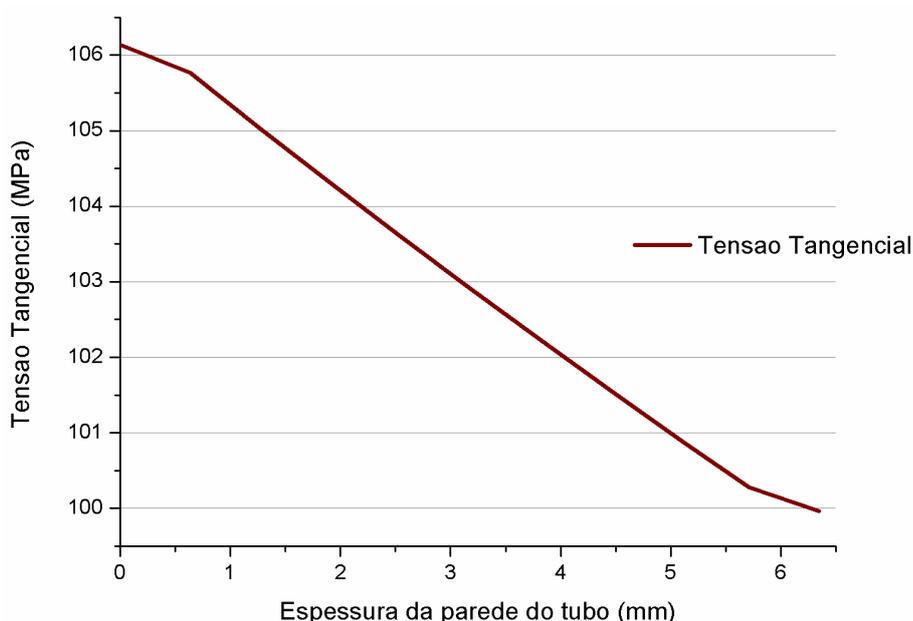


Figura 3.1 – Tensão tangencial atuante na parede do tubo quando aplicado apenas pressão interna, sem reparo.

Conhecendo-se o comportamento do duto em operação normal, aplica-se o reparo variando-se a temperatura no arame. Para esse modelo, o tubo deverá ter um comprimento de 1000 mm e o arame de 500 mm . Essa diferença é necessária para captar a

dimensão do efeito de borda no tubo quando aplicado o reparo. A pré-carga aplicada no arame é de $800N$, ou seja, uma pré-tensão de $250MPa$ e uma variação de temperatura equivalente de $-147^{\circ}C$. O tubo e o arame têm simetria na sua direção longitudinal. A interação entre o tubo e arame é feito através de contato. As demais dimensões são as mesmas dos modelos anteriores. A figura 3.2 demonstra a configuração do modelo.

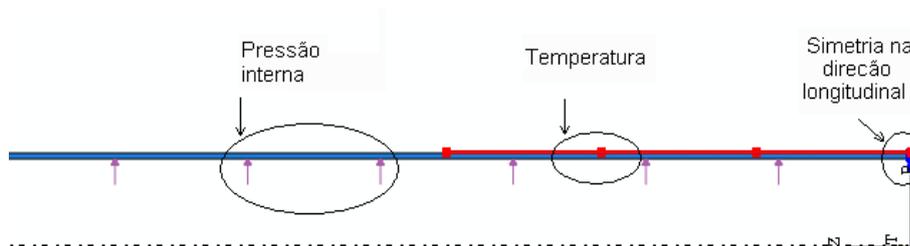


Figura 3.2 – Condições de contorno aplicadas no modelo.

Realizou-se a análise descrita acima e, como previsto, houve uma variação de tensão na borda do reparo. Esses resultados podem ser vistos na Figura 3.3, que demonstra a variação de tensão tangencial no tubo pelo seu comprimento em três regiões de análise (a parte interna do tubo, o meio do tubo e a parte externa do tubo). A Figura 3.4 demonstra a variação de tensão longitudinal pelo comprimento do tubo.

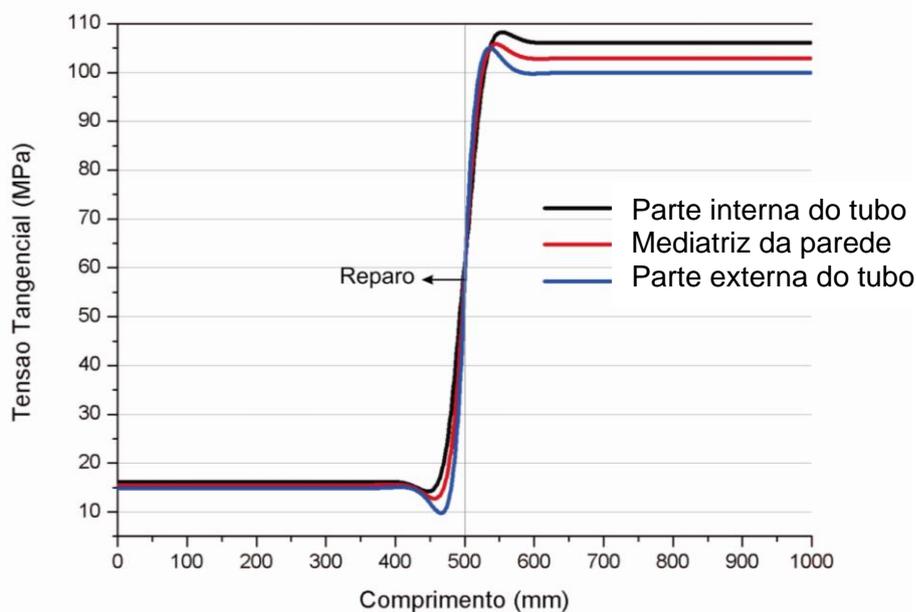


Figura 3.3 – Efeito de borda presente no tubo quando aplicado o reparo.

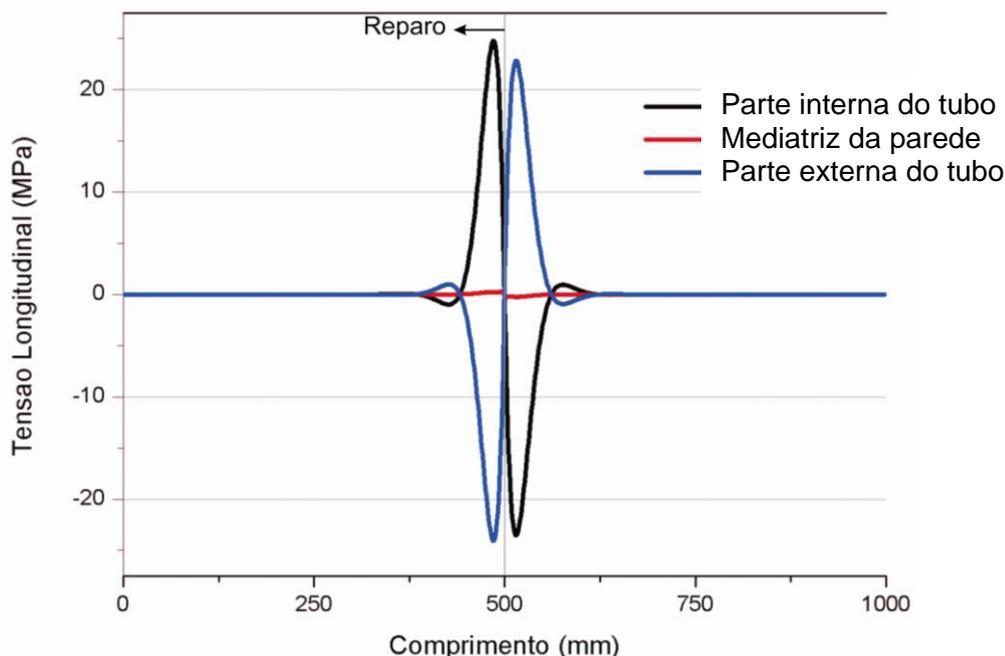


Figura 3.4 – Efeito de borda longitudinal presente no tubo quando aplicado o reparo.

Como mostra o resultado, ocorre uma grande elevação da tensão tangencial no tubo, elevada, em média, 665% após a aplicação do reparo em um espaço aproximado de 200mm. Além disso, existem picos inferiores e superiores, que aumentam ainda mais essa porcentagem, alcançando 890% em um espaço médio de 90mm. Uma pior situação é demonstrada na Figura 3.4 que indica uma elevação de tensão longitudinal de mais de 1300 vezes. Esta tensão longitudinal, mesmo sendo de ordem de grandeza menor que a tangencial, é mais perigosa por provocar um esforço de flexão no tubo.

3.1. ALTERNATIVAS DE REPARO

A partir desse modelo de elementos finitos válido, é possível utilizar esta ferramenta para avaliar algumas alternativas diferentes de reparo. O objetivo dessas análises é minimizar o efeito de borda demonstrado nas Figuras 3.3 e 3.4. As alternativas estão apresentadas na sequência.

3.1.1. REDUÇÃO DA PRÉ-TENSÃO E APLICAÇÃO DE DUAS CAMADAS IGUAIS DE ARAME

Essa abordagem reduz a carga de pré-tensão aplicada no arame, porém adiciona uma camada extra para compensar a tensão perdida. As duas camadas têm as mesmas dimensões, espessura e comprimento. A nova pré-carga aplicada é de 460N, o que equivale a uma pré-tensão de 144MPa e uma variação de temperatura de -85°C . O resultado do novo modelo de aplicação está demonstrado na Figura 3.5. O efeito de borda, com a nova configuração proposta mostrada nesse gráfico, não melhorou e a tensão longitudinal teve sua amplitude aumentada.

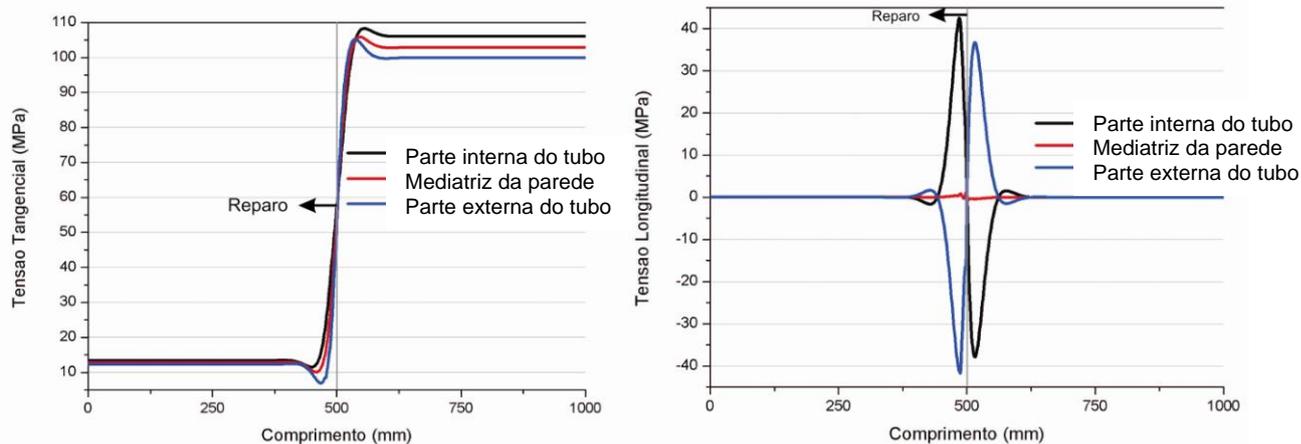


Figura 3.5 – Efeito de borda com duas camadas iguais de aplicação do reparo.

3.1.2. REDUÇÃO DA PRÉ-TENSÃO, APLICAÇÃO DE DUAS CAMADAS DE ARAME COM COMPRIMENTOS DIFERENTES

Essa abordagem é semelhante à primeira, porém é reduzida a dimensão da segunda camada de arame. A variação de temperatura também é de $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ por camada, o comprimento da primeira camada de arame é de 500 mm e, o da segunda, é de 475 mm . Para essa nova configuração, obtiveram-se os resultados conforme mostra a Figura 3.6. Nessa figura observa-se uma redução na amplitude da tensão longitudinal e um aumento no intervalo em que ocorre a variação de tensão tangencial.

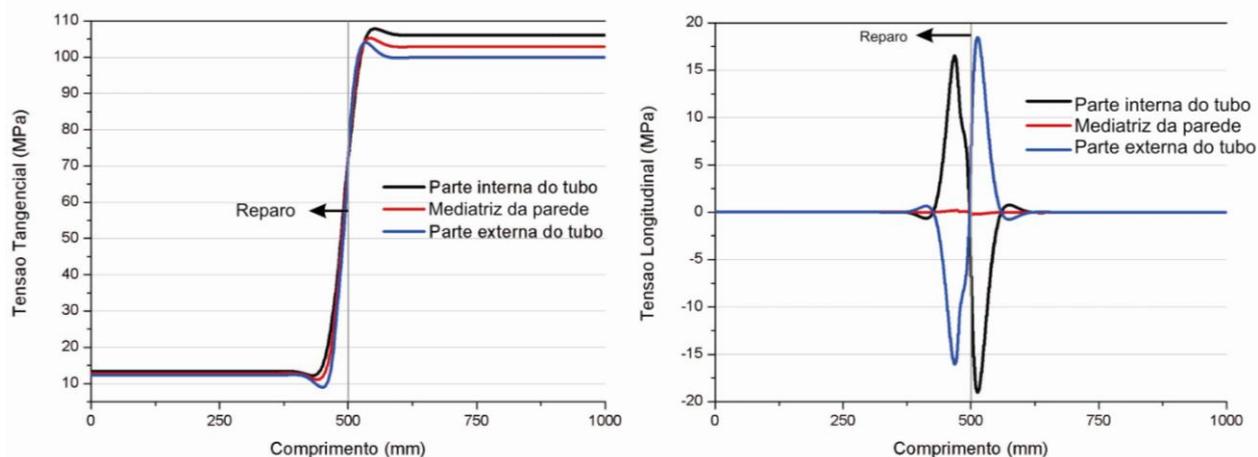


Figura 3.6 – Efeito de borda com duas camadas de diferentes comprimentos de aplicação do reparo (500 mm e 475 mm).

Buscando-se uma abordagem mais ampla do problema, realizaram-se outras duas análises com comprimentos diferentes das camadas de arame. A figura 3.7 mostra o resultado do efeito de borda para uma segunda camada de 450 mm e, a figura 3.8, para uma de 400 mm . Para essas duas novas variações, o aumento no intervalo em que ocorre a variação da tensão tangencial é bem significativo e benéfico, pois foi reduzida a concentração de tensão no final do reparo. A tensão longitudinal estabiliza em torno de 15 MPa e também ocorre o aumento no intervalo de picos das tensões longitudinais.

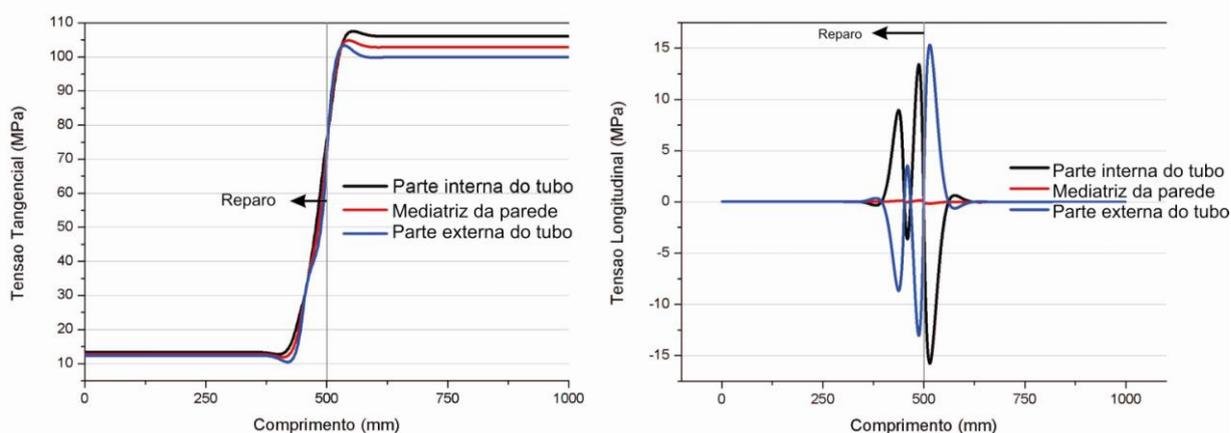


Figura 3.7 – Efeito de borda com duas camadas de diferentes comprimentos de aplicação do reparo (500mm e 450mm).

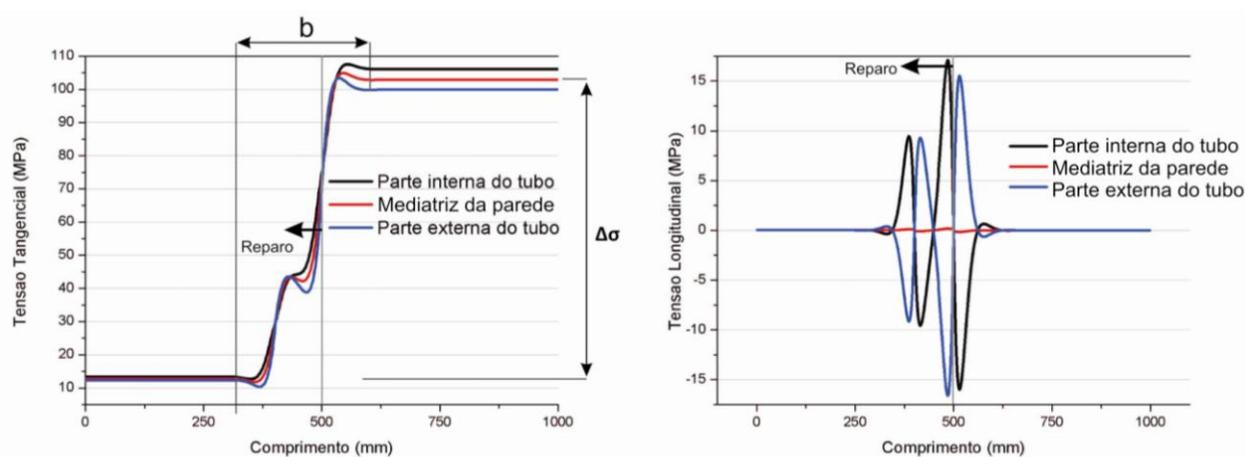


Figura 3.8 – Efeito de borda com duas camadas de diferentes comprimentos de aplicação do reparo (500mm e 400mm).

3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos dados de tensão tangencial, foi elaborada a Tabela 3.1, que demonstra os principais resultados obtidos pelas diferentes alternativas de reparo. Seu intuito é mostrar a variação média de tensão tangencial no tubo antes e após o reparo ($\Delta\sigma$), o intervalo aproximado em que ocorre tal variação (b), a variação de tensão entre os picos inferiores e superiores e, ainda, o intervalo médio existente entre os picos.

Esses resultados mostram que os modelos propostos não reduzem os picos de tensão, mas conseguem aumentar o intervalo em que acontecem as variações. No entanto, ocorre também a criação de um pico secundário quando a segunda camada de arame possui um comprimento muito menor que o da primeira.

Tabela 3.1 – resultados obtidos nos diferentes modelos.

Modelo	Varição média da tensão tangencial no tubo (%) - $\Delta\sigma$	Intervalo aproximado em que ocorre a variação (mm) – b	Varição média da tensão tangencial entre os picos (%)	Intervalo médio entre os picos (mm)
Uma camada de arame	665	200	890	90
Duas camadas iguais de arame	804	210	1171	88
Segunda camada de arame com 475mm	804	210	998	103
Segunda camada de arame com 450mm	804	225	904	136
Segunda camada de arame com 400mm	804	275	910	187

O aumento observado no intervalo b , quando se diminui o comprimento da segunda camada de arame, é benéfico para o problema, uma vez que a elevação da tensão em um pequeno local pode prejudicar o tubo, mesmo essa sendo abaixo do limite de escoamento do material.

Outro componente a ser avaliado, é a tensão longitudinal que, mesmo tendo uma amplitude pequena, pode provocar danos ao tubo. O fato de que existe uma grande oscilação nessa tensão provoca o efeito de flexão, que é prejudicial, principalmente, se existir variação de pressão interna no tubo, pois ocorre assim, a fadiga do material. Quando aplicada uma segunda camada de arame, observa-se a diminuição da amplitude da curva de tensão longitudinal e também ocorre um aumento no intervalo em que acontece a oscilação.

Dessa forma, é recomendável a aplicação do reparo com uma maior quantidade de camadas, sempre a camada superior sendo menor que a camada inferior. O intuito com esta recomendação é diminuir o efeito de concentração de tensão com o aumento do intervalo de picos e oscilação de tensão.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo validar um modelo numérico para análise de um novo conceito de reparo de dutos e, na sequência, utilizá-lo para o estudo do efeito de borda decorrente da aplicação do reparo.

Para a realização da primeira etapa, foram utilizadas as equações aplicadas na norma *Wire-Wound*. Com essa norma, fez-se uma análise analítica do problema e foram elaborados dois modelos de elementos finitos para comparação com o analítico. O primeiro utilizando variação de temperatura e o segundo aplicando deslocamento prescrito. Nesse contexto, constatou-se que o modelo de variação de temperatura se mostrou mais preciso, apresentando uma menor diferença quando comparado com o analítico (5%).

Na segunda parte do trabalho, com o modelo numérico validado, realizou-se uma análise mais completa, foram adicionadas as condições de pressão interna de operação no tubo e aumentou-se o tamanho do tubo em relação ao arame para observar os efeitos de borda existentes no reparo. Na primeira análise de efeito de borda, constatou-se um gradiente de tensão muito alto em um intervalo pequeno, o que acarreta numa concentração de tensão prejudicial.

Em seguida, diferentes alternativas de reparo foram estudadas a fim de diminuir esta concentração de tensão. Apresentou-se como alternativa, aplicar uma segunda camada de arame com uma pré-tensão igual à da primeira camada, sendo ambas menores que a aplicada no primeiro modelo. Nessa primeira alternativa, a segunda camada de arame era de tamanho igual à primeira. Em outras alternativas foi reduzido o comprimento da segunda camada de arame, analisando-se 3 possibilidades, 400mm, 450mm e 475mm.

A partir dessas diferentes análises, foi verificado que é possível aumentar o intervalo em que ocorrem os gradientes de tensão ao adicionar-se uma segunda camada de arame com comprimento menor que a primeira, o que, segundo os resultados apresentados neste trabalho, é uma consequência benéfica ao problema, pois se diminui o efeito de concentrador de tensão. Outro benefício da adição de uma segunda camada é a diminuição da amplitude de oscilação da tensão longitudinal, minimizando-se os efeitos de flexão no tubo.

Apesar de todas as alternativas testadas, o gradiente de tensões na entrada e saída é muito alto, e uma forma de tentar reduzir isto seria a redução na pré-tensão aplicada. Caso não seja possível, devido às condições do reparo, propõe-se a aplicação de um reparo com maior quantidade de camadas de arame possíveis, ou a redução da pré-tensão do arame no início e no final do reparo, a fim de aumentar ao máximo o intervalo do gradiente de tensão tangencial e diminuir a amplitude da oscilação da tensão longitudinal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alegre, J.M., Bravo, P., Preciado, M., Solaguren-Beascoa, M. **“Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique.”** Engineering Failure Analysis, 06 de Dezembro de 2008: 61-69.

Abaqus 6.9, **“Analysis User's Manual.”** Em: ABAQUS DOCUMENTATION 6.9. Dassault Systèmes, 2009.

Abaqus 6.9, **“Getting Started with Abaqus: Interactive Edition.”** Em: ABAQUS DOCUMENTATION 6.9. Dassault Systèmes, 2009.

ASME - Divisão 3 - Seção VIII - Artigo KD-9. **“Special design requirements for wire-wound vessels and wire-wound frames.”** 2001.

Belytschko, T., Bachrach, W.E. **“Simple Quadrilaterals with high coarse-mesh accuracy.”** Em: Spilker, R.L. e Reed, K.W.(eds) **“Hybrid & Mixed Finite Element Methods”** AMD vol. 75 - ASME, 1985.

Correa, F.G., Jacobucci, A.J., Leite, N.A., Bayer, R.F. **“Método de realizar reparo em material compósito para dutos metálicos”.** Patente PI0204010-7, 2003.

Frainer, V. J. "**Método de reparo de tubulações através de reforço produzido por enrolamento de fios ou cabos monofilamento ou multifilamento em torno do tubo na região do defeito.**" Patente PI0706196-0, 2009.

Gonçalves, J.E.F. "**Liner pipe for repair of a host pipe**". Patente US 5487411, 1994.

Henderson, G., Fontaine, J. "**Pipe repair assembly**". Patente US 5950683, 1997.

Kakoschke, D., Pavon, R., Urednicek, M. "**Compression pipe repairing and reinforcing methods**". Patente US 7066210, 2003.

TBG, "**Gasoduto Bolívia-Brasil - Informações técnicas do lado brasileiro.**" www.tbg.com.br. Acessado em 14 de abril de 2011.

TRANSPETRO, "**Características físicas e capacidade máxima das instalações de transporte, nas melhores condições operacionais.**" 22 de Julho de 2007. www.trasnpetro.com.br. Acessado em 14 de Abril de 2011.

Wolfram Mathematica 7, *DOCUMENTATION CENTER*. Wolfram Research, 2008.