

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIOGRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE REPARO DE DUTOS POR
ARAMES PRÉ-TENSIONADOS

por

Luciano Amaral Patella

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, novembro de 2011

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE REPARO DE DUTOS POR
ARAMES PRÉ-TENSIONADOS**

por

Luciano Amaral Patella

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 Gonzales
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 16 de novembro de 2011

PATELLA, L.P. **Simulação Numérica e Análise Experimental de Reparo de Dutos por Arames Pré-tensionados**. 2011. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

As redes de dutos rígidos de transporte de petróleo e gás são de grande periculosidade, sendo necessário constante monitoramento e manutenção. Os métodos de reparos desses dutos devem ser eficientes e seguros, além de qualificados para o tipo de aplicação. Este trabalho teve por objetivo realizar uma análise numérica, via método de elementos finitos, de um reparo de duto com arames pré-tensionados, a fim de validá-lo e possibilitar a avaliação do método e propor melhorias. A validação do modelo numérico foi feita através de uma análise experimental, na qual se utilizou os dados obtidos em um reparo, aplicado em laboratório, para teste hidrostático, e de modelagem analítica, encontrada na norma ASME Divisão 3 Seção VIII artigo KD-9. O modelo numérico apresentou uma diferença de aproximadamente 6% em relação à medição experimental da tensão circunferencial no duto e aproximadamente 8% na tensão circunferencial no arame durante a aplicação do reparo comparado com o método analítico. Com o modelo validado, foram realizadas simulações para a verificação das tensões circunferenciais no duto e nos arames durante a aplicação do reparo e na aplicação de pressão interna. Verificou-se que não há um relaxamento dos arames à medida que o reparo vai sendo aplicado, o que poderia ocorrer pela ação do arame que está sendo aplicado nos antecedentes. Foi constatado que a influência da pré-tensão do arame no duto estende-se por aproximadamente 220 milímetros antes do início e após o final deste, além de ser verificado o efeito de borda.

PALAVRAS-CHAVE: reparo de dutos, arames pré-tensionados, elementos finitos

PATELLA, L.A. **Numerical Simulation and Experimental Analysis of Pipeline Repair by pre-tensioned wires.** 2011. 13^o folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

For networks of rigid pipelines carrying oil and gas are of great danger, you need constant monitoring and maintenance. The methods of repair of these products must be safe and efficient, and qualified for the type of application. This study aimed to perform a numerical analysis by finite element method of repairing a pipeline with pre-tensioned wires in order to validate it and enable the evaluation of the method and propose improvements. The validation of the numerical model was performed using an experimental analysis, in which we used the data obtained in a repair, applied in the laboratory for hydrostatic testing, and analytical modeling, found in ASME Section VIII Division 3 Article KD-9. The numerical model showed an error of about 6% in the measurement of circumferential strain in the pipeline and approximately 8% in the calculation of circumferential wire tension during application of the repair. With the validated model, simulations were performed for the verification of the duct and circumferential tension on the wires. It wasn't found that there is a relaxation of the wires as the repair is being implemented, which could occur by the action of the wire being applied in the background. It is found that the influence of repair on the pipeline extends for approximately 220 mm before and after the end of this, besides being checked the border effect.

KEYWORDS: Repair of pipelines, pre-tensioned wires, finite element.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. PROCEDIMENTO	2
2.1 Geometria e materiais	2
2.2 Análise experimental	3
2.3 Modelo Analítico	6
2.4 Modelo de Elementos Finitos	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera brasileira é uma das áreas em maior desenvolvimento no país, sendo impulsionada atualmente pelo desenvolvimento da tecnologia para a extração do petróleo da camada do pré-sal. As redes de distribuição de óleo e gás dependem essencialmente da operação eficiente e segura de seus dispositivos, componentes e estruturas. As tubulações rígidas representam um dos equipamentos mais importantes para as redes de distribuição e transporte de óleo e gás. Devido ao produto circulante ser potencialmente perigoso, essas tubulações estão constantemente submetidas a monitoramentos rigorosos, conforme legislação própria, para evitar interrupções na distribuição, danos materiais e impacto ambiental. Quando ocorre algum dano à tubulação, há diferentes opções de reparo, podendo ser reparos temporários, permanentes ou até mesmo a substituição da tubulação. Segundo o Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural (RTDT), da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível, reparo permanente é um reparo estrutural definitivo para recompor a resistência mecânica e a integridade estrutural do duto e reparo temporário é um reparo estrutural para reforçar a região danificada, garantindo a segurança e a continuidade operacional do duto, quando temporariamente não for possível a execução do reparo permanente.

O presente estudo mostra resultados de aplicação de uma nova técnica de reparo de dutos. Esta nova técnica tem como vantagem principal aplicar de forma efetiva tensões compressivas no duto para contrapor as tensões de trabalho induzidas pela pressão interna. As vantagens adicionais contemplam a aplicação do reparo sem utilização de solda, a utilização de um processo totalmente automatizado e com preparação mínima da superfície.

Atualmente no mercado não existem procedimentos de aplicação de reparo sem aporte de calor que garantam a aplicação efetiva de tensões residuais compressivas uniformes ao longo do trecho com defeito. Esta técnica consegue aproximar os benefícios das técnicas mais eficientes do mercado, como são os reparos com luvas metálicas bi-partidas e os reparos de material compósito por enrolamento de mantas, juntado o benefício das tensões compressivas da luva bi-partida com a facilidade de aplicação dos reparos de material compósito.

Utilizando-se de métodos de reparos por enrolamento de arames, foi encontrado o trabalho de Alegre et al, 2008, que demonstra um procedimento de simulação de vasos de pressão. Neste trabalho, a validação do modelo, feito em elementos finitos, é realizada através de cálculos analíticos propostos na norma ASME Código 3 Seção VIII, artigo KD-9. No método proposto, a pré-tensão nos arames é aplicada através de uma variação de temperatura que corresponde à deformação sofrida pelo arame devido a esta pré-tensão.

Além desse artigo, no trabalho exposto por Pissanti, 2011, consta uma análise por elementos finitos do método de reparo realizado pela nova técnica. No modelo proposto, foi aplicada a pré-tensão nos arames utilizando-se a mesma metodologia de variação de temperatura proposta pelo trabalho de Alegre et al, 2008, e aplicando-se deslocamento prescrito no arame, sendo que o de variação de temperatura esse apresentou melhor resultado. Foram analisados os efeitos e propostas soluções para isso. Neste trabalho, não foram simulados os arames em si, mas uma camada do mesmo material e espessura dos arames do comprimento do reparo.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um modelo em elementos finitos que simule a aplicação de reparos com arame pré-tensionado. Procurou-se, para isso, validar

este modelo comparando-o com os valores de tensões experimentais obtidos a partir de deformações em um duto reparado com arames pré-tensionados, e comparando os valores obtidos na simulação numérica com resultados analíticos. O modelo simula os arames individualmente, de forma que, validando o modelo, foi possível verificar a influência que cada arame acarreta nos outros arames e analisar a eficiência da pré-tensão do arame ao longo da aplicação do reparo

2. PROCEDIMENTO

Utilizando resultados experimentais, foram aplicadas duas técnicas de estudo do comportamento do duto e do arame.

A primeira técnica consistiu na aplicação de equações analíticas utilizadas na norma ASME Código 3 Seção VIII artigo KD-9 e citadas no trabalho do Alegre et al (2008).

A segunda técnica empregada consistiu numa análise numérica, via modelo de elementos finitos axissimétrico, a qual foi validada comparando-se com os resultados experimentais e analítico. Tendo-se este modelo calibrado, é possível analisar e modificar parâmetros a fim de propor melhorias no método de reparo.

2.1 GEOMETRIA E MATERIAIS

A fim de padronizar as análises, foi utilizado como referência a geometria e material do duto e arame utilizado na análise experimental. O corpo-de-prova utilizado foi um duto de aço API 5L X65 com 18 polegadas de diâmetro, cujas principais propriedades, utilizadas na simulação, são apresentadas na Tabela 2.1. O arame é de aço carbono, apresentando as mesmas propriedades do aço do duto apresentadas na tabela. A geometria do duto com a aplicação do reparo é apresentada na Figura 2.1, estando as unidades em milímetros.

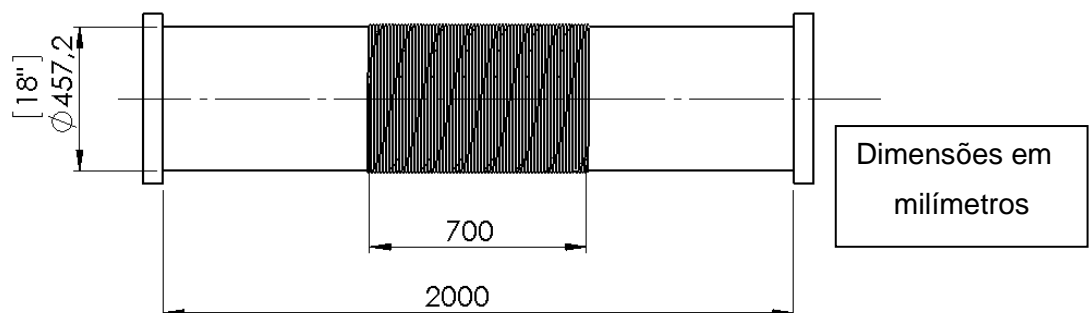


Figura 2.1 - Geometria do duto analisado.

Foi considerado o comprimento de reparo aplicado no ensaio, de aproximadamente 700 mm, o que equivale a 350 voltas de arame em torno do duto. A Tabela 2.2 resume os parâmetros principais utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 2.1 - Propriedades do material utilizado.

Módulo de elasticidade (GPa)	205
Coefficiente de Poisson	0,3
Coefficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,08E-5

Tabela 2.2 – Parâmetros principais de cálculo.

Diâmetro externo do duto	18 pol (457,2 mm)
Espessura nominal da parede	9,525 mm
Diâmetro do arame	2 mm
Comprimento do reparo	700 mm
Número de voltas	350

2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O ensaio experimental foi realizado sob responsabilidade da empresa ARBRA – Engenharia Industrial nas dependências do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A empresa é detentora da tecnologia de aplicação do reparo estudado neste trabalho, tendo projetado e desenvolvida a máquina para aplicação do mesmo. O arame foi aplicado ao redor do duto por esta máquina, chamada Máquina de Reparos de Dutos (MRD), a qual é fixada no lado externo do duto conforme ilustrado na Figura 2.2. O processo de enrolamento do arame ao redor do duto é realizado de forma automática, sendo que a máquina foi montada ao redor do duto por apenas duas pessoas.

Para a realização do ensaio experimental foi aplicado um reparo em um duto de 18 polegadas de diâmetro externo. O reparo consistiu no enrolamento de forma controlada do arame ao redor do duto, formando helicóides de passo equivalente ao diâmetro do arame. O reparo aplicado estendeu-se por 700 milímetros, estando centrado na metade do comprimento do duto no qual o reparo foi aplicado. Para obtenção dos dados de deformações, longitudinais e circunferenciais, foi utilizado um extensômetro bi-axial conectado a um equipamento Lynx de 32 canais para aquisição de dados. A calibração foi realizada segundo proposto pelos manuais do próprio equipamento.

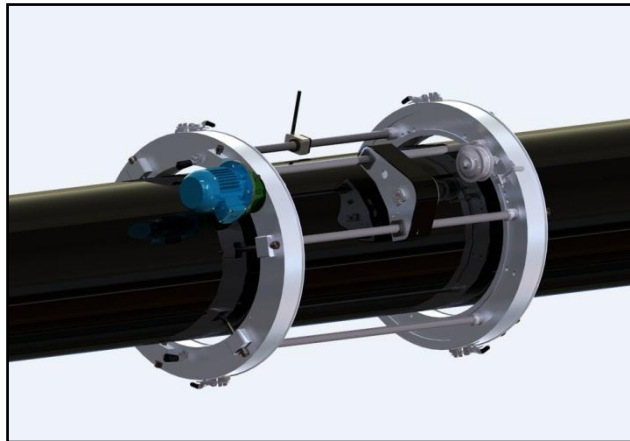


Figura 2.2 – Máquina de Reparos de Dutos (MRD) fixada no lado externo do duto.

O extensômetro é colocado no duto na região central, conforme ilustrado na Figura 2.3. O mesmo é colado no próprio duto, sendo que o reparo é aplicado sobre ele e, assim, foi possível obter os dados de deformação do duto durante a aplicação de reparo.

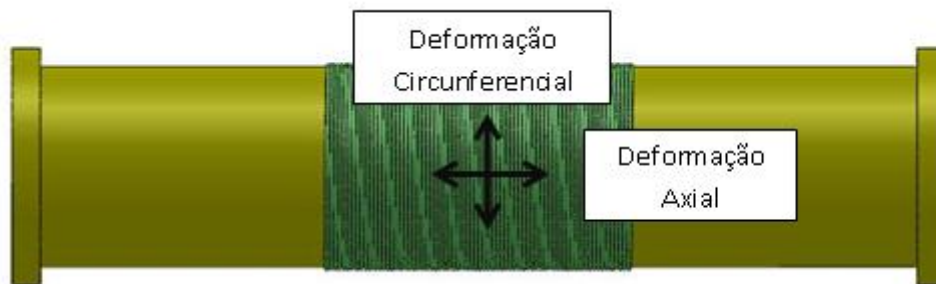


Figura 2.3 – Figura do tubo com a aplicação do reparo. As setas indicam a posição extensômetro e as direções de medição axial e circunferencial.

Na Figura 2.4 se observa o extensômetro colocado na região média do duto, para medição das deformações na direção axial e circunferencial.

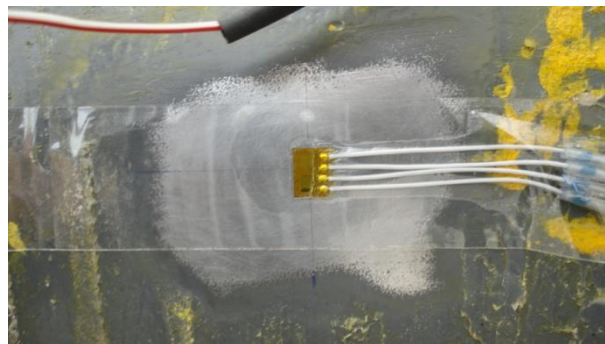


Figura 2.4 – Extensômetro bi-axial colocado na região central do duto, para medição da deformação circunferencial e longitudinal.

A Figura 2.5 mostra o aspecto externo do arame enrolado em volta do duto.

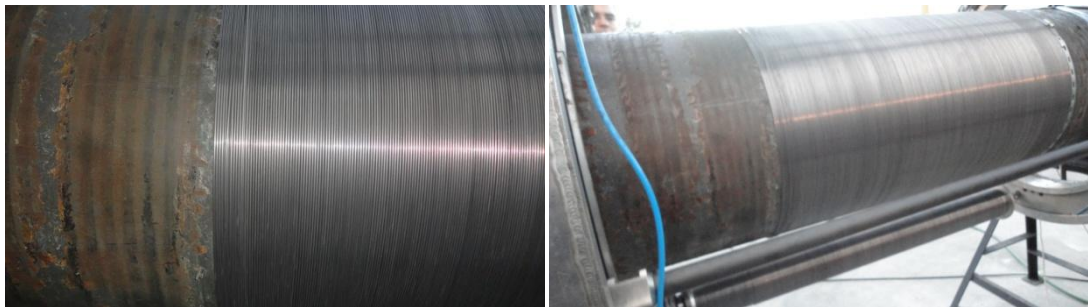


Figura 2.5 – Aspecto superficial do arame enrolado no duto

Durante a aplicação do reparo foi medida a deformação axial e circunferencial no duto durante a aplicação de três camadas consecutivas de arame. No presente trabalho será avaliado o comportamento do arame e do duto na aplicação da primeira camada de arame apenas, pois não teve, por objetivo, avaliar a influência do número de camadas.

A Figura 2.6 mostra o registro das deformações longitudinais e circunferenciais. Está indicada nesta figura a deformação que corresponde à aplicação da primeira camada de arame, que é o motivo de estudo do presente trabalho.

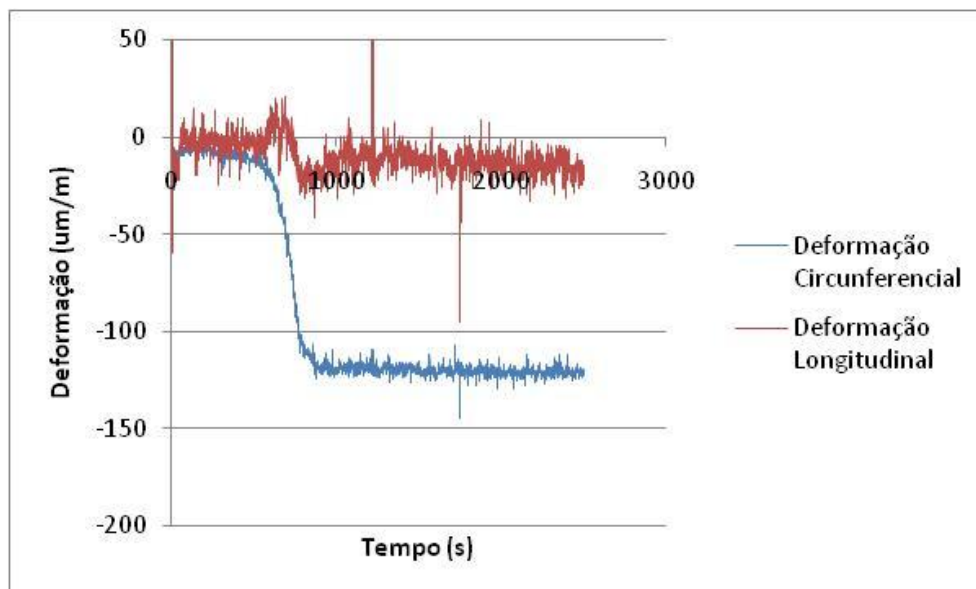


Figura 2.6– Deformações experimentais no duto durante aplicação do reparo.

Através dos dados obtidos pelos extensômetros foram calculadas as tensões circunferenciais e longitudinais correspondentes à aplicação da primeira camada. Para o cálculo das tensões foram utilizadas as equações de Hooke para o caso biaxial, citada por Grante (2004):

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \quad (2.1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1) \quad (2.2)$$

onde σ_1 é a tensão circunferencial (MPa), σ_2 é a tensão longitudinal (MPa), ϵ_1 é a deformação circunferencial (mm/mm), ϵ_2 é a deformação longitudinal. E e ν são, respectivamente, módulo de elasticidade (MPa) e o coeficiente de Poisson.

A Tabela 2.3 mostra os resultados das tensões calculadas a partir das deformações medidas durante a aplicação do reparo. As tensões são compressivas, sendo que para a tensão longitudinal apresenta o valor de -11,2 MPa, e as tensões circunferenciais na ordem de -29 MPa.

Tabela 2.3 – Tensão longitudinal e circunferencial calculadas a partir das deformações.

Orientação	Deformação (m/m)	Tensão (MPa)
Longitudinal	-1.20E-05	-11.2
Circunferencial	-1.25E-04	-29.0

2.3 MODELO ANALÍTICO

Com a formulação proposta na norma ASME Código 3 Seção VIII artigo KD-9, citada no trabalho de Alegre et al (2008), é possível calcular as tensões em qualquer região da parede do duto. Nesta norma, considera-se a pré-tensão no arame, $S_w(x)$, como uma função do diâmetro de coordenada x . A tensão radial $\sigma_r(x_1)$ e a tensão tangencial $\sigma_t(x_1)$ são dadas pelas Equações 2.3 e 2.4:

$$\sigma_r(x_1) = - \left[1 - \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{if}}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_I^2} \right) S_w(x) dx \quad (2.3)$$

$$\sigma_t(x_1) = - \left[1 + \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_{if}}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_I^2} \right) S_w(x) dx \quad (2.4)$$

onde D_I é o diâmetro interno do tubo, D_{if} é o diâmetro na interface entre o duto e o arame, D_w é o externo instantâneo durante a aplicação do reparo e x_1 é o diâmetro em análise no duto. As Figuras 2.7e 2.8 ilustram a nomenclatura usada nestas equações, onde D_o indica o diâmetro externo ao final do reparo.

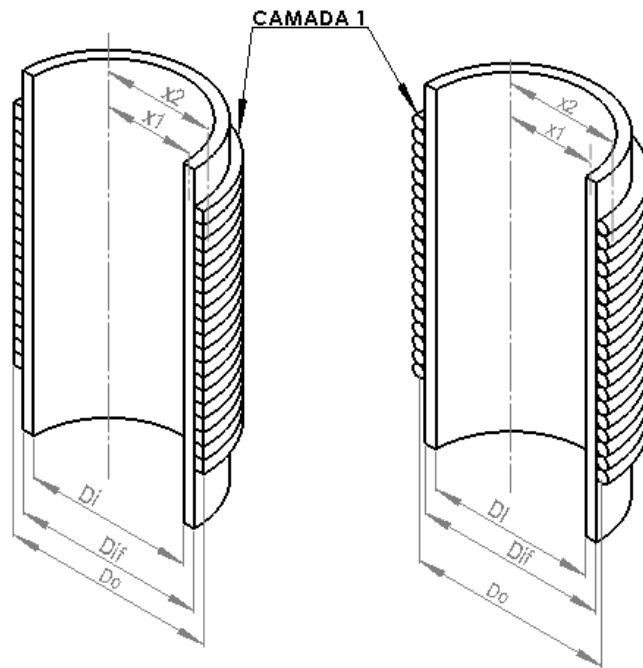


Figura 2.7 – À esquerda, abordagem teórica da norma ASME VIII Div 3. À direita, figura indicando as considerações realizadas na análise deste trabalho.

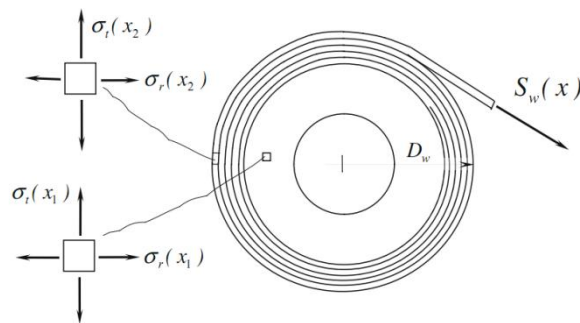


Figura 2.8 – Nomenclatura das tensões.

Utilizam-se as geometrias do corpo de prova e pré-tensões utilizadas no ensaio experimental. Sendo assim, o duto calculado possui diâmetro externo de 18 polegadas (457.2 mm), espessura de 0,375 polegadas (9.525 mm) sendo o diâmetro interno (D_i), portanto, 17.25 polegadas (438.15 mm). O arame utilizado no ensaio possui 2 mm de diâmetro. No entanto, como a norma considera o arame com formato retangular, foi considerado um arame com área equivalente e mesma largura, o que acarreta numa altura de 1.57mm. Para fim de comparar com o modelo numérico e experimental, é definido o diâmetro interno do duto (D_i) como o ponto de referência. A Tabela 2.4 resume os parâmetros utilizados.

Para o cálculo da tensão circunferencial, usa-se a forma integrada da Eq. 2.4, a qual é dada por:

$$\sigma_r(x_1) = - \left[1 - \left(\frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right] \cdot S_w(x) \cdot \left\{ \left[\frac{1}{2} \ln(|D_w + D_I|) + \frac{1}{2} \ln(|D_w - D_I|) \right] - \left[\frac{1}{2} \ln(|D_{if} + D_I|) + \frac{1}{2} \ln(|D_{if} - D_I|) \right] \right\} \quad (2.5)$$

A partir dessa equação, é então obtida a tensão no arame que coloca uma tensão de $\sigma_r = -29$ Mpa, correspondente a tensão calculada a partir dos dados experimentais. O valor encontrado é de 186 MPa no arame, como indicado na Tabela

Tabela 2.4 – Parâmetros utilizados nas Equações 2.3 e 2.4, e resultado da tensão no arame e tensão circunferencial no tubo.

Parâmetro	Descrição	Valor
D_I	Diâmetro Interno do Duto	438,15 mm
D_{if}	Diâmetro na Interface entre Duto e Arame	457,20 mm
D_w	Diâmetro Externo Instantâneo Durante Aplicação do Reparo	460,34 mm
X_1	Diâmetro em Análise	438,15 mm
σ_r	Tensão Circunferencial	-29 MPa
Sw	Tensão no Arame	186 MPa

2.4 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Na modelagem do método numérico, algumas simplificações foram feitas em relação ao modelo experimental, tanto para calibrar esse modelo quanto para facilitar a análise. Para aplicação da compressão provocada pelo arame no duto, foi utilizado um modelo numérico acoplado tensão-temperatura. A compressão no duto é provocada por uma contração térmica determinada pela seguinte equação, retirada do Budynas e Nisbett (2011):

$$\sigma = -\alpha (\Delta T)E \quad (2.6)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), ΔT é a variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e E é o módulo de elasticidade, que para o aço do duto vale 205 GPa.

Dessa forma, pode ser escolhida uma combinação de valores dos parâmetros de expansão térmica e variação de temperatura que provoquem uma tensão equivalente à tração aplicada no arame no momento da aplicação do reparo. Conforme a Tabela 2.4 a tensão no arame deve ser de 186 MPa para conseguir uma tensão equivalente à encontrada no momento da aplicação do reparo, indicado na Tabela 2.3.

No modelo numérico, realizado no software de elementos finitos comercial Abaqus, tanto o duto quanto os arames são simulados como elementos axissimétricos, por possuírem simetria no eixo longitudinal, a fim de reduzir o tempo computacional.

Foram considerados os 350 arames que formam a aplicação do reparo num comprimento de 700 mm, colocando a condição de contato entre o duto e os arames. A análise

foi conduzida com 350 etapas de carregamento, sendo que em cada uma delas foi aplicada a condição de contração do arame e o contato correspondente, para simular a pré-carga. Isso significa que a contração de cada arame foi aplicada individualmente, cada uma em uma etapa, de forma que a contração causada por determinado arame pôde influenciar os arames anteriormente aplicados. Desta forma foi representado o avanço das deformações impostas ao duto (Figura 2.9) ao longo da aplicação do reparo. Na etapa 351 foi aplicada uma pressão interna arbitrária de 100 bar, a fim de estudar a distribuição de tensões no duto com a presença do reparo.

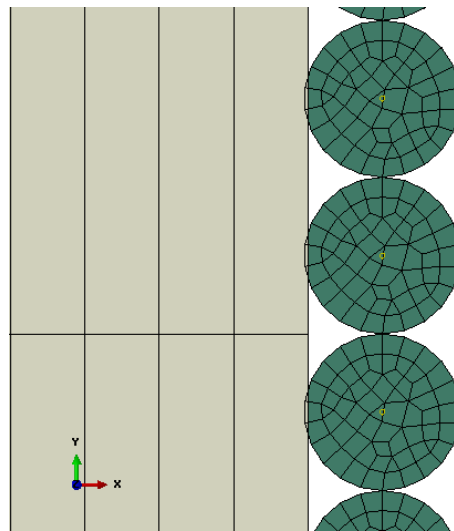


Figura 2.9 – Modelo de elementos finitos. O detalhe ilustra o juste da posição no contato duto-arame.

O elemento utilizado foi o CAX4RT, quadrilátero bilinear, de quatro nós, indicado para análise de tensão e deformação de sólidos, com integração reduzida. É recomendado ainda seu uso para uma análise linear e não linear que envolva estudos complexos compreendendo contato, plasticidade e grandes deformações. Para reduzir o esforço computacional e ser possível editar partes da análise sem a necessidade de realizá-la por completo, esta foi subdividida em sub-análises menores, de modo que cada análise, a partir da primeira, utiliza a anterior como condição inicial. A modelo teve um total de 25700 elementos e 29261 nós. Como condição de contorno, foi impedido o deslocamento de uma das extremidades (inferior) e dos arames no eixo longitudinal (Y) .

Na interface duto-arame, foi determinado um contato com coeficiente de atrito de 0,15, conforme proposto em Abaqus (2006). Para garantir o contato entre o arame e o duto no momento da aplicação da tensão de compressão, foi programado um ajuste da posição dos nós do arame para colocar os mesmo exatamente na interface entre as partes. Este ajuste é ilustrado na Figura . A Figura 2. ilustra o modelo de simetria axial e uma vista 3D. A pressão interna e a condições de contorno aplicadas no duto estão ilustrados na Figura 2.10.

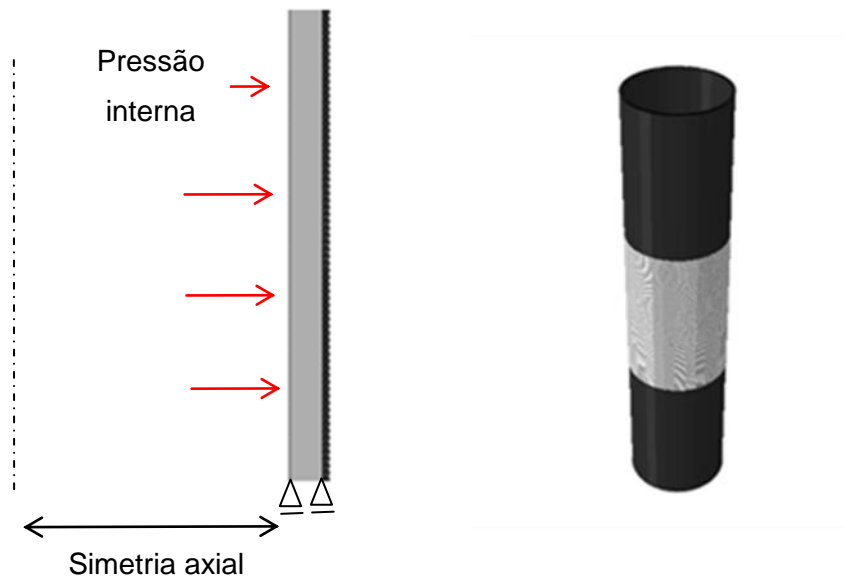


Figura 2.10 – À esquerda, modelo de simetria axial. À direita, vista 3D do modelo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seqüência são apresentados os resultados de tensões circunferenciais nos arames e no duto durante a aplicação do reparo e a tensão circunferencial no duto com a pressão interna de 100 bar. A Figura 3.1 mostra a distribuição de tensões.

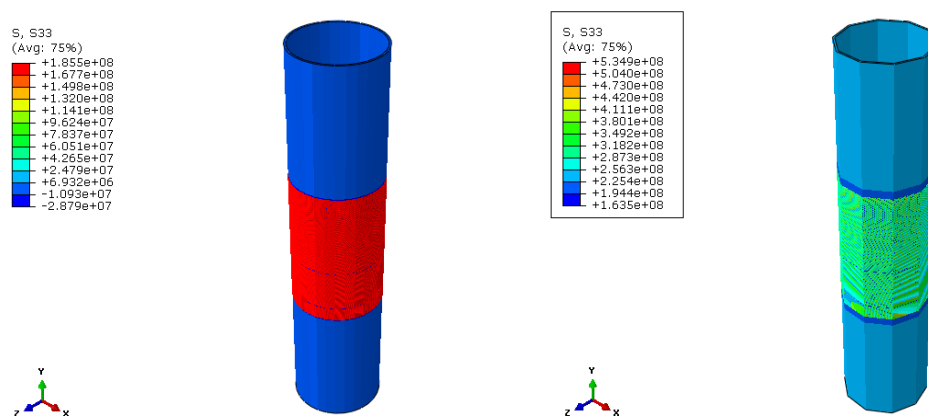


Figura 3.1 – À esquerda, distribuição das tensões circunferenciais após a aplicação do reparo. À direita, tensões circunferenciais após a aplicação da pressão interna de 100 bar.

A Figura 3.2 ilustra a tensão no arame ao longo do comprimento de reparo. Observa-se que a partir de aproximadamente 50 mm desde a borda do reparo em direção à região interna existe uma região de transição, após a qual a tensão no arame atinge um patamar constante. Na região de início a tensão no arame é de 186 MPa, coincidindo com o valor analítico calculado na Tabela 2.4, sendo que na região interna do reparo a tensão no arame é de 172 MPa. Como se pode observar, não há uma variação significativa do arame na região média do reparo, conforme ilustrado na figura.

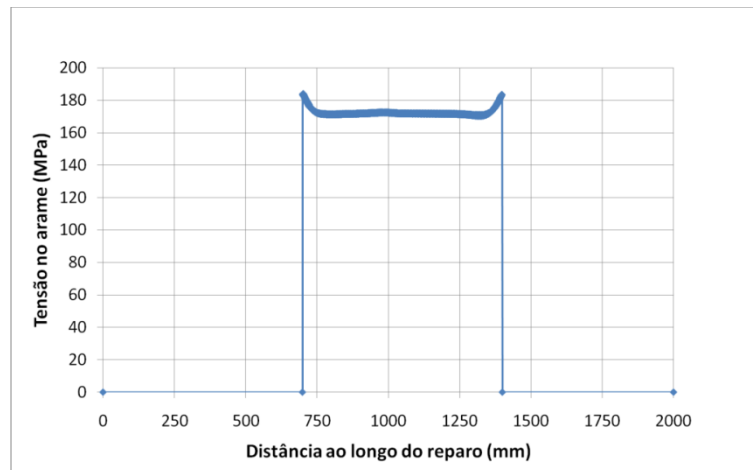


Figura 3.1 – Tensão no arame ao longo do comprimento de reparo.

A Figura 3.3 ilustra a variação da tensão circunferencial ao longo do duto, observando-se que a região de influência é de aproximadamente 220 mm antes e após o reparo, um comprimento equivalente a aproximadamente a 31% do comprimento total do reparo. Além disso, é possível no gráfico verificar o efeito de borda. Na região média, a tensão circunferencial no duto apresentou valores similares aos cálculos teóricos e analíticos.

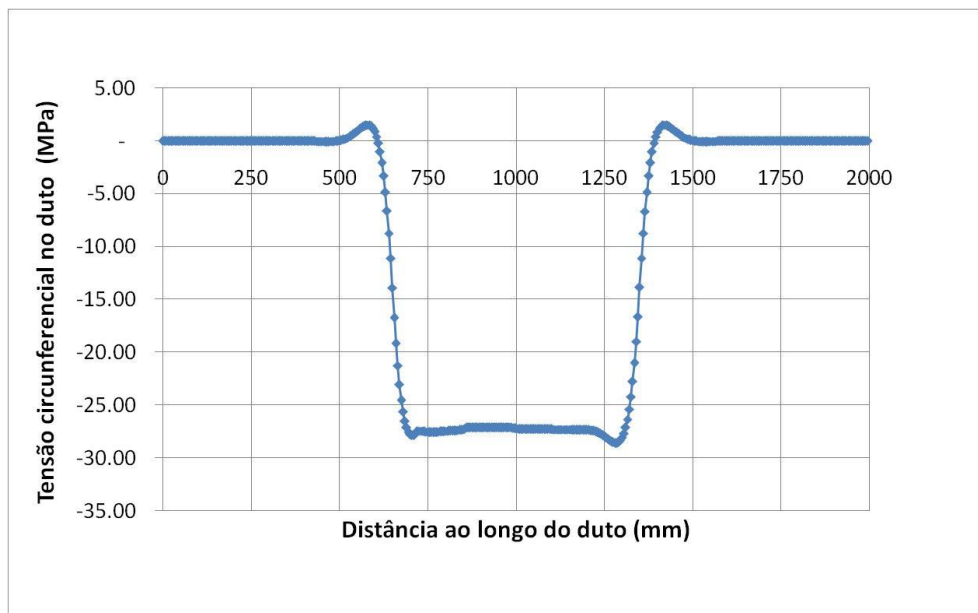


Figura 3.2 – Variação da tensão circunferencial ao longo do duto. Observa-se a região de influência do reparo e o efeito de borda do mesmo.

A terceira análise realizada foi para verificar a eficiência do reparo. Para isso, foi realizada uma simulação incluindo-se uma pressão interna no duto de 100 bar. A Figura 3.4 ilustra a tensão circunferencial no duto após a aplicação dessa pressão. A tensão circunferencial fora do reparo apresentou valores de 226,4 MPa, sendo que na região de aplicação do reparo estas tensões são da ordem de 167 MPa, representando uma redução de 26 %.

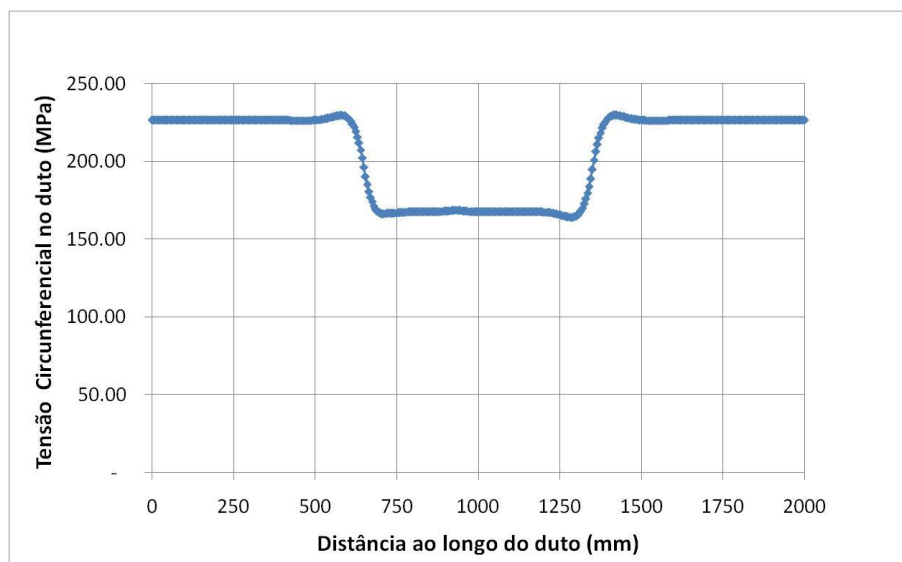


Figura 3.4 – Tensão circunferencial no duto após a aplicação de uma pressão interna de 100 bar.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar um modelo numérico, via elementos finitos, da distribuição de tensões na parede de um duto reparado com arame enrolado de forma helicoidal e com uma pré-carga determinada. O modelo numérico foi validado com análises experimentais e analíticas.

A análise das tensões determinou que o modelo criado apresentou uma boa correlação entre os cálculos analíticos e medições experimentais, mostrando uma tensão circunferencial no duto durante a aplicação do reparo de 27 MPa, contra 29 MPa dos modelos experimentais e analíticos, determinando uma diferença de aproximadamente 7%. Além disso, a tensão apresentada no arame foi de 172 MPa, contra 186 MPa do modelo analítico, o que representa uma diferença de aproximadamente 8%. Estas diferenças ocorreram principalmente devido ao modelo analítico apresentar simplificações principalmente na geometria do arame, que foi considerada com seção retangular no modelo analítico e como seção circular no modelo numérico, além de considerar no modelo numérico a contribuição individual de cada arame no comportamento global do reparo, utilizando condições de contato em várias etapas de análise.

Foi verificado, ainda, que não há mudança significativa da eficiência da pré-tensão dos arames. O potencial relaxamento dos arames antecedentes à medida que mais arame fosse adicionado ao reparo, não foi verificado, não havendo variação significativa da pré-tensão no arame.

Quanto à eficiência do arame, pode-se verificar que o reparo teve uma eficiência de aproximadamente 26% na redução nas tensões circunferenciais na região reparada quando o duto submetido à pressão interna. Dessa forma, comprova-se a eficiência do reparo, sendo uma alternativa para rivalizar com os métodos de reparos utilizados atualmente, reduzindo de forma significativa as tensões nas regiões danificadas.

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer um estudo aprofundado dos efeitos de borda. Para isso, pode-se estudar a influência das demais camadas no efeito, já que foi simulada apenas a primeira camada. Outra sugestão é verificar, experimentalmente, se realmente não há relaxamento das pré-tensões dos arames. Para isso, é possível utilizar mais extensômetro no ensaio, colados em diferentes regiões do reparo.

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. 61-69 p

ANP, **“Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural (RDT)**, <http://www.anp.gov.br/?dw=42266>. Acessado em 09/11/2011

Budynas, R.G., Nisbett, J.N.; **“Elementos de Máquinas de Shigley – Projeto de engenharia Mecânica”**, Bookman e Mc Graw Hill, 8ª edição, 2011.

Grante, **Apostila de Extensiometria**, <http://www.grante.ufsc.br/download/SG-Apostila.pdf>. Acessado em 10/11/2011

Pissantti, D.R., **“Análise por Elementos Finitos do Uso de Arames Pré-Tensionados para Reparo de Dutos”**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Abaqus Inc., **“Pipe Reeling.”** In: ABAQUS for Offshore Analysys. Abaqus Inc., 2006.