



Marco Antonio Pérez Rosas

**Análise de Dutos com Perda de Espessura
Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire
Co-orientador: Prof. Ronaldo Domingues Vieira

Rio de Janeiro
Maio de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Marco Antonio Pérez Rosas

**Análise de Dutos com Perda de Espessura
Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Ronaldo Domingues Vieira

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Luis Meniconi

Cenpes - Petrobras

Arthur Martins Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Carlos Alberto de Almeida

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de maio de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Marco António Pérez Rosas

Graduou-se em Engenharia Mecânica Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - Perú em 2004.

Ficha Catalográfica

Rosas, Marco Antonio Pérez

Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas / Marco Antonio Pérez Rosas; orientador: José Luiz de França Freire; co-orientador: Ronaldo Domingues Vieira.- Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006

159 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Reparo. 3. Multicamadas. 4. coladas. 5. perda de espessura. 6. corrosão. 7. adesivo. 8. teste hidrostático. 9. extensimetria. 10. elementos finitos. I. Freire, José Luiz de França. II. Vieira, Ronaldo Domingues. III Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Al Señor Jesucristo, mi mamá Nancy, mi querida familia
y mis valiosos amigos

Agradecimientos

Ao professor José Luiz de França Freire e ao professor Ronaldo Domingues Vieira, pela paciência e orientação durante o desenvolvimento do curso de mestrado.

A meus amigos e colegas de laboratório, Garcia, Jesús, Leo e Maira que sem sua ajuda não teria concluído este trabalho.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino.

A todos os colegas da pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus funcionários, pela colaboração para comigo.

A todas aquelas pessoas que de alguma outra forma participaram no desenvolvimento da tese.

Resumo

Pérez Rosas, Marco Antonio; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. *Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas*. Rio de Janeiro, 2006. 159p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Devido à crescente necessidade de aumentar a disponibilidade de uso imediato de dutos que sofreram danos por perda de espessura ou impacto de objetos estranhos, o uso de reparos tem tido cada vez mais importância. Neste trabalho, um novo método para o reparo de dutos com perda de espessura externa foi analisado. O reparo consiste na utilização de camadas metálicas coladas ao duto com adesivo epóxi. Existem vários tipos de reparos, mas o proposto tem a vantagem de ser facilmente aplicável, prescinde de soldagem, e apresenta módulo de elasticidade alto, o que permite uma redução na deformação total presente na região do defeito. Este novo método de reparo tem como objetivo devolver a integridade estrutural do duto de uma forma simples e econômica. Para conhecer o comportamento e avaliar este tipo de reparo, utilizaram-se métodos analíticos, experimentais e numéricos. Fez-se uso da técnica de elementos finitos pela grande vantagem de poder considerar a não linearidade do material, já que foram levadas em consideração situações de estado limite para o cálculo das pressões que originam a plastificação e a ruptura do duto. Foi desenvolvido um modelo analítico para o dimensionamento do reparo, que permite analisar o comportamento das tensões na região do defeito para cada pressão aplicada, procedimento útil em uma seleção ótima do reparo. Na abordagem experimental foram testados oito espécimes tubulares: dois sem defeitos e seis com defeitos usinados para simular a perda de espessura, dos quais cinco foram reparados com diferentes números e tipos de camadas. Os espécimes foram devidamente instrumentados para a obtenção de dados de pressões, variações volumétricas e deformações ocorridas em pontos localizados nos espécimes tubulares. O duto reparado com quatro camadas de aço de baixo carbono e o duto reparado com duas camadas de aço inox 304 suportaram a pressão de ruptura de um duto sem defeito, ambos rompendo em seções afastadas daquelas reparadas. Os dutos

reparados com uma, duas e três camadas de aço de baixo carbono romperam na região do defeito. Os resultados experimentais obtidos comprovaram a eficiência da nova técnica de reparo proposta, e foram satisfatoriamente previstos pelos modelos numéricos e analíticos.

Palavras – chave

Reparo, duto, multicamadas, coladas, perda de espessura, corrosão, adesivo, teste hidrostático, extensimetria, elementos finitos.

Abstract

Pérez Rosas, Marco Antonio; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. Analysis of Pipeline with External Metal Loss Repaired with Steel-Adesive-Repair System. Rio De Janeiro, 2006. 159p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Catolica de Rio de Janeiro.

Due to increasing need to prolong the availability of immediate use of the pipeline that had suffered to damages of metal loss or strange object impact, the use of repairs has each time more importance. In this work, a new repair system to be utilized on pipeline with external metal loss, was analyzed. The repair system is composed of pre-curved thin layers of steel lamina, which are set in place on the external metal loss defect area of a pipe and cement in place with epoxy resin. There are many types of repair system, but the use of this type of system avoids the need for field welding, and presents high elasticity module, it allows a reduction in the present total deformation in the region of the defect. This new repair system has as objective to return the structural integrity of the pipeline of a simple and economic way. To know the behavior and to evaluate this type of repair, analytical, experimental and numerical methods were used. The use of the finite elements method has the great advantage of being able to consider non linearity of the material for the calculate of the rupture pressure. An analytical model to project the repair was developed, this can analyze the behavior of the stress in the region of the defect for each applied pressure, useful procedure in an excellent election of the repair. In the experimental boarding eight pipe specimens were tested: two without defects and six with defects to simulate the loss of thickness, of which five were repaired with different numbers and types of layers. The specimens were instrumented to obtain data of pressures, volumetric variations and deformations, occurred in the specimens. The pipe repaired with four steel layers of low carbon and the pipe repaired with two stainless steel layers 304 did supported the pressure of rupture of a pipe without defect, both did breach in sections distant those repaired. The pipeline repaired with one, two and three steel layers of low carbon had breached in the region of the defect. The experimental results did prove the efficiency of the new repair system, and satisfactorily had been foreseen by the numerical and analytical models.

Keywords

Repair, pipeline, pipe, multilayer, epoxy resin, loss of thickness, corrosion, adhesive, hydrostatic test, finite elements.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Objetivo	21
1.2. Considerações Iniciais	21
1.3. Métodos Convencionais de Reparo para Dutos com Defeitos	22
1.4. Alcance do Trabalho	23
1.5. Reparo Utilizando Multicamadas Metálicas Coladas	24
1.6. Roteiro da Dissertação	26
2. Fundamentos para a Avaliação de Integridade de Dutos	27
2.1. Integridade Estrutural em Dutos	28
2.1.1. Critérios de Resistência	28
2.1.2. Tensões em Dutos sem Defeito	30
2.1.3. Tensões em Dutos com Defeitos de Corrosão	31
2.1.4. Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando os Critérios de Aceitação	33
2.1.5. Noções Básicas da Plasticidade	35
2.1.6. Relações Tensão-Deformação	36
2.2. Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos	38
2.2.1. Materiais Adesivos	38
2.2.2. Seleção do Adesivo	38
2.3. Tensões nas Juntas Coladas	42
2.3.1. Distribuição de Tensões numa Junta Colada	44
2.3.2. Ruptura de uma Junta Colada	
3. Modelagem Numérica	47
3.1. Introdução	48
3.2. Especificações para a Análise Não Linear	49
3.2.1. Análise Incremental não Linear	49
3.2.2. Não Linearidades nos Dutos	52
3.3. Descrição da Modelagem Numérica	54
3.4. Análise dos Resultados Numéricos	63

3.4.1. Distribuição das Tensões em um Duto com Reparo	63
3.4.2. Estudo da Tensão Circunferencial	64
3.4.3. Comportamento das Tensões com a Variação de Parâmetros nos Modelos Numéricos	67
3.4.3.1. Diferentes Profundidades de Defeito	68
3.4.3.2. Diferentes Materiais de Reparo	69
3.4.3.3. Diferentes Geometrias de Defeito	71
3.4.4. Modelo Simplificado	72
3.4.5. Variação do Número de Camadas Metálicas no Reparo	73
3.4.6. Estudo da Espessura das Camadas no Reparo	76
3.4.7. Estudo das Deformações no Duto Reparado	78
3.4.8. Estudo da Tensão Cisalhante no Adesivo	80
3.4.9. Estudo das Terminações das Camadas Metálicas	81
3.4.10. Discussão dos Resultados Numéricos	83
4. Modelagem Analítica	88
4.1. Introdução	88
4.2. Princípios Básicos	89
4.3. Tensões Equivalentes nos Regimes Elástico e Plástico	94
4.4. Aplicação das Equações nas Regiões Elásticas e Elasto-Plásticas do Comportamento do Sistema Duto-Reparo	96
4.5. Programa para a Aplicação da Modelagem Analítica	104
5. Abordagem Experimental e seus Resultados	107
5.1. Introdução	107
5.2. Preparação e Instrumentação dos Espécimes Tubulares	108
5.3. Dispositivo Experimental	113
5.3.1. Sistema de Pressão	113
5.3.2. Sistema de Aquisição de Dados	114
5.4. Análise dos Resultados Experimentais	116
6. Avaliação e Comparação dos Resultados	130
6.1. Comparações Numéricas, Analíticas e Experimentais	130
6.2. Comparações Adicionais dos Modelos Analítico e Numérico	136

6.3. Exemplo de Aplicação	138
7. Conclusões, Limitações e Sugestões	143
7.1. Conclusões	143
7.2. Limitações e Sugestões	147
Referências bibliográficas	148
Apêndice	
A. Fator de eficiência de junta longitudinal soldada	150
B. Caracterização do Material Utilizado	150
C. Determinação da Espessura Ideal da Camada Metálica no Reparo	152
D. Cálculo das Tensões a partir das Deformações Experimentais	154
E. Variante da Técnica de Reparo Proposta	159

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Aplicação de um reparo com três camadas.

Figura 2.1. Paralelepípedo elementar representativo de um estado de tensão.

Figura 2.2. Estado de tensões num tubo sem carregamento de torção e pressão interna.

Figura 2.3 – Idealização da geometria de um defeito para a avaliação.

Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns modelos de materiais.

Figura 2.5 – Junta colada simples.

Figura 2.6 Resistência da junta colada simples

Figura 2.7 – Junta colada no reparo de dutos

Figura 2.8 Distribuição das tensões cisalhantes na junta colada [16]

Figura 2.9 – Tipos de falha nas juntas coladas [14].

Figura 2.10 - Simulação numérica da falha adesiva e coesiva [13].

Figura 3.1 Método de Newton-Raphson [19].

Figura 3.2 – Não linearidades no duto sem defeito

Figura 3.3 - Elementos 2D

Figura 3.4 – Elementos 3D

Figura 3.5 – Curvas bilineares tensão vs deformação de engenharia e real

Figura 3.6 - Curva multilinear tensão vs deformação e ampliação da região (i)

Figura 3.7 – Dimensões na modelagem 2D

Figura 3.8 – Dimensões na modelagem axisimétrica

Figura 3.9 – Malhas testadas.

Figura 3.10 – Detalhes da modelagem 2D

- Figura 3.11 – Detalhes na modelagem 3D.
- Figura 3.12 – Detalhes na modelagem axisimétrica.
- Figura 3.13 – Duto carregado, modelo linear 3D.
- Figura 3.14 – Componente da modelagem numérica.
- Figura 3.15 – Regiões do comportamento.
- Figura 3.16 – Transição elasto-plástica na região do defeito
- Figura 3.17 – Modelos com diferente profundidade de defeito.
- Figura 3.18 – Comportamento das tensões para o modelo com $C=0.7$ e sua comparação com o modelo de $C=0.3$.
- Figura 3.19 – Comportamento das tensões num reparo com as mesmas propriedades mecânicas que o duto.
- Figura 3.20 – Geometrias transversais dos defeitos estudados.
- Figura 3.21 – Discretização dos modelos reparados com diferentes geometrias transversais do defeito.
- Figura 3.22 – Comportamento das tensões para os três tipos de defeito.
- Figura 3.23 – Modelo simplificado.
- Figura 3.24 – Comportamentos nos modelos de uma, duas, três e quatro camadas com igual espessura de chapa no reparo.
- Figura 3.25 – Modelos com diferentes espessuras das camadas metálicas, com a mesma espessura equivalente de reparo em todos os modelos.
- Figura 3.26 – Tensões circunferências no defeito
- Figura 3.27 – Deformações globais no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.
- Figura 3.28 – Deformações no defeito e fora do reparo no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.
- Figura 3.29 – Tensões cisalhantes no adesivo.
- Figura 3.30 – Distribuição das tensões cisalhantes na primeira camada de adesivo.
- Figura 3.31 – Distribuição de tensões ao longo da parede do duto.
- Figura 3.32 – Comparação do uso da não linearidade geométrica no duto.
- Figura 3.33 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Figura 3.34 – Comparação dos materiais bilineares e multilineares.

Figura 3.35 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Figura 4.1 – Estado de tensões e deformações num ponto do defeito

Figura 4.2 - Área da interface do programa

Figura 4.3 – Resultados no programa

Figura 5.1 - Dimensões dos espécimes tubulares

Figura 5.2 – Instrumentação no defeito

Figura 5.3 - Distribuição das camadas metálicas

Figura 5.4 - Etapas na colagem.

Figura 5.5 Posição dos extensômetros elétricos.

Figura 5.6 - Sistema de pressão.

Figura 5.7 - Sistema de aquisição de dados.

Figura 5.8 - Espécimes testados.

Figura 5.9 - Deformações nos dutos sem defeito.

Figura 5.10 - Deformações no duto com defeito não reparado

Figura 5.11 - Deformações no duto de uma camada no reparo

Figura 5.12 - Vazamento no espécime de uma camada no reparo.

Figura 5.13 - Ruptura do espécime de uma camada.

Figura 5.14 - Deformações nos espécimes de duas camadas no reparo.

Figura 5.15 - Vazamento no espécime de duas camadas no reparo.

Figura 5.16 - Deformações nos espécimes de três camadas no reparo.

Figura 5.17 - Vazamento no espécime de três camadas no reparo.

Figura 5.18 - Deformações nos espécimes de quatro camadas no reparo.

Figura 5.19 - Ruptura no espécime de quatro camadas no reparo.

Figura 5.20 - Análise das deformações circunferências na região do defeito.

Figura 5.21 - Deformação circunferencial na região do defeito para um espécime de N camadas no reparo.

Figura 5.22 - Comparação das deformações circunferenciais na parede externa dos reparos.

Figura 5.23 - Gráfico volume injetado de água no espécime vs pressão.

Figura 5.24 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Figura 5.25 – Abaulamento nos defeitos.

Figura 5.26 - Deformações no espécime duas camadas de aço inox no reparo.

Figura 5.27 - Comparação das deformações circunferências para os espécimes de quatro camadas de aço de baixo carbono e duas camadas de aço inoxidável no reparo.

Figura 5.28 – Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão

Figura 5.29 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Figura 6.1 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de quatro camadas

Figura 6.2 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de quatro camadas.

Figura 6.3 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de três camadas

Figura 6.4 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de três camadas.

Figura 6.5 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de duas camadas

Figura 6.6 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de uma camadas

Figura 6.7 - Comparação numérica e analítica no modelo convencional

Figura 6.8 Comparação numérica e analítica no modelo com mesmo material no reparo.

Figura 6.9 Comparação numérica e analítica no modelo com diferentes profundidades do defeito

Figura 6.10 Resultados da modelagem matemática para o duto com reparo de aço inox 304

Figura 6.11 Resultados da modelagem analítica para o duto com reparo de aço de baixo carbono.

Figura B.1 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio a tração

Figura B.2 - Gráficos tensão vs deformação dos corpos de prova de cada material

Figura C.1 – Tensões circunferências no defeito

Figura C.2 – Variação da tensão com a variação na espessura da camada de adesivo.

Figura C.3 – Modelos sm espessura de adesivo nas camadas.

Figura C.4 – Comportamentos nos modelos sem junção.

Figura D.1 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Figura E.1 – Variante do método de reparo

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito.

Tabela 2.2 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo [14]

Tabela 2.3 - Principais aderentes adesivos [14]

Tabela 2.4 - Características físicas de adesivos [14]

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do duto e chapa 1

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (bilinear)

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (multilinear)

Tabela 3.4 – Tensões e deslocamentos radiais

Tabela 5.1 Espécimes testados

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Tabela 6.1 Comparações de pressão no duto de quatro camadas

Tabela 6.2 Comparações de pressão no duto de três camadas.

Tabela 6.3 Comparações de pressão no duto de duas camadas

Tabela 6.4 Comparações de pressão no duto de uma camada

Tabela B.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova do ensaio a tração

Lista de Símbolos

- σ_{ii} : tensão normal ao plano “i”
 σ_{ij} : tensão cisalhante no plano “j”
 σ_i : tensão na direção principal “i”, onde $i=1, 2, 3$
 σ_c : tensão circunferencial
 σ_r : tensão radial
 σ_l : tensão longitudinal
 $\sigma_{tração}$: tensão num ensaio a tração
 σ_{Tresca} : tensão equivalente de Tresca
 σ_{Mises} : tensão equivalente de Mises
 σ_{eq} : tensão equivalente
 S_y : limite ao escoamento
 S_u : resistência a tração
 U_d : energia elástica de distorção por unidade de volume
 E : módulo de elasticidade
 μ : coeficiente de Poisson
 P : pressão
 L_{DC} : carga limite ao colapso plástico do componente danificado.
 L_{UC} : carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.
 $MAWP$: máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código do projeto.
 $MAWP_r$: carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.
 e_c : deformação circunferencial
 e_l : deformação longitudinal
 e_r : deformação radial
 e_i : deformação na direção principal “i”, $i=1, 2, 3$
 de_i^p : incremento de deformação plástica na direção “i”.
 e_i : deformação total na direção i.
 e_i^p : deformação plástica total na direção i.
 e_{eq} : deformação equivalente
 P_1 : pressão interna
 P_2 : pressão externa
 R : raio medio
 ΔR : raio interno
 E_r : módulo de elasticidade das camadas metálicas

E_c : módulo de elasticidade do adesivo

E_m : módulo de elasticidade ponderado

e : espessura das camadas metálicas

t : espessura da parede do duto

$1/C$: fator de concentração de tensão

E_{pr} : Modulo de encruamento linear ou módulo de elasticidade no regime plástico das camadas metálicas

E_{pc} : Modulo de encruamento linear ou módulo de elasticidade no regime plástico do adesivo

μ_r : Coeficiente de Poisson das camadas metálicas

μ_c : Coeficiente de Poisson do adesivo

μ_{pr} : Coeficiente de Poisson das camadas metálicas no regime plástico

μ_{pc} : Coeficiente de Poisson do adesivo no regime plástico

μ_m : Coeficiente de Poisson ponderado

P_{yr} : Pressão que origina a plastificação nas camadas metálicas na região do defeito

P_{yc} : Pressão que origina a plastificação no adesivo na região do defeito

P_{yd} : Pressão que origina a plastificação do duto na região do defeito reparado

P_{ud} : Pressão de ruptura do duto na região do defeito reparado

σ_{eq_di} : Tensão equivalente no duto na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

σ_{eq_ri} : Tensão equivalente no reparo na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

σ_{eq_ci} : Tensão equivalente no adesivo na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

S_{yd} : Limite de escoamento do duto

S_{yr} : Limite de escoamento das camadas metálicas

S_{yc} : Limite de escoamento do adesivo

S_{ud} : Resistência a tração do duto

a_k : variáveis 1, k=1.. 6

A_i e B_j : variáveis 2, i=1, 2, 3 e j=1, 2

h : profundidade do defeito

e_{aprox} : espessura aproximada para o reparo

1

Introdução

1.1

Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um reparo em dutos, que utiliza multicamadas metálicas coladas; estudando seu comportamento e propondo modelos numéricos e analíticos que buscam seu dimensionamento otimizado.

1.2

Considerações Iniciais

Desde tempos remotos os dutos são muito utilizados para o transporte de fluidos e gases [1]. Por sua eficiência e segurança no transporte de óleo, gás e seus derivados, o uso de dutos se estendeu por todo o mundo, onde a malha global pode ser avaliada em alguns milhões de quilômetros. Com o aumento das necessidades de energia dos mercados, programas privados e governamentais de ampliação das redes dutoviarias são cada vez mais comuns. No entanto, o seu custo de projeto, aquisição e instalação representa um grande investimento inicial, com prazos de retorno de até 30 anos [2]. Sendo assim, o esforço para acrescentar vida útil às redes dutoviarias é perfeitamente justificável.

Devido às condições de trabalho, tais como ambiente corrosivo, possibilidade de serem atingidos por ferramentas em escavações, recalques dos apoios, movimentação de solos, etc, os dutos estão sujeitos a vários tipos de danos, sendo a perda de espessura um dos mais comuns. A corrosão é uma das principais

causas de perda localizada de espessura, que com o passar do tempo pode se tornar acentuada nos dutos de aço. Uma vez detectada uma perda de espessura relevante, procura-se aumentar a vida útil de um duto reparando-se o trecho danificado.

1.3

Métodos Convencionais de Reparo para Dutos com Defeitos

Os tipos de reparos nos dutos podem ser divididos em reparos de contingência, reparos temporários e reparos permanentes [3]. Os reparos de contingência são realizados para minimizar os impactos ao meio ambiente e às pessoas, e viabilizam a execução de reparos temporários ou permanentes. Os reparos temporários são realizados para reforçar as regiões com defeito, procurando devolver a continuidade operacional do duto, o qual posteriormente deve ser substituído por um reparo permanente. Os reparos permanentes devolvem a integridade estrutural ao duto. Exemplos de reparos permanentes são:

- **Corte e Substituição:** consiste na troca do trecho corroído por um segmento de duto novo. É indicado na recuperação de dutos que perderam sua estanqueidade.
- **Dupla Calha Soldada:** consiste em envolver o duto com duas meias calhas soldadas longitudinalmente e circunferencialmente no duto, sem deixar nenhum espaço anular. Estes reparos têm suas variantes que são, por exemplo, reparos feitos com dupla calha com fechamento e aperto por parafusos, entre outros.
- **Dupla Calha com Enchimento:** consiste em envolver o trecho corroído com uma luva de diâmetro maior que o diâmetro do duto. No espaço anular se injeta resina epóxi ou outro material similar sob pressão.
- **Luva de Material Compósito:** consiste em envolver o trecho corroído com mangas de materiais compostos formados por tecido de fibra de vidro e uma matriz de resina.

Cada um dos métodos mencionados apresenta desvantagens. O método de corte e substituição normalmente implica em parada operacional acarretando alto custo. A técnica de dupla calha com soldagem direta apresenta grande risco no caso da linha estar em operação, dependendo do produto circulante. A técnica de dupla calha com enchimento epóxi não é suficientemente rápida, uma vez que exige a construção de um molde com dimensões precisas, o que aumenta o custo e o tempo para a realização do reparo [2]. O reparo com material compósito, devido a seu baixo módulo de elasticidade, trabalha após grandes deformações plásticas terem ocorrido no duto. Estes compostos também podem sofrer degradação com o tempo.

1.4

Alcance do Trabalho

Este trabalho analisa um novo método de reparo para dutos com defeitos de perda de espessura, que consiste na utilização de multicamadas metálicas que são coladas ao duto com adesivo epóxi. Este método objetiva devolver a integridade estrutural do duto de uma forma simples e econômica.

A resistência de um reparo formado por multicamadas metálicas depende do tipo de arranjo das juntas coladas. Este tipo de reparo se sobrepõe em praticamente toda a área circunferencial do duto, onde se desenvolve a maior tensão causada pela pressão interna.

Para conhecer o comportamento deste tipo de reparo, foram utilizados métodos analíticos, métodos experimentais e o método dos elementos finitos. O uso de uma técnica como os elementos finitos apresenta a grande vantagem de poder considerar a não linearidade do material, já que são levadas em consideração situações de estado limite para o cálculo das pressões que originam a plastificação e a ruptura do duto na região do defeito.

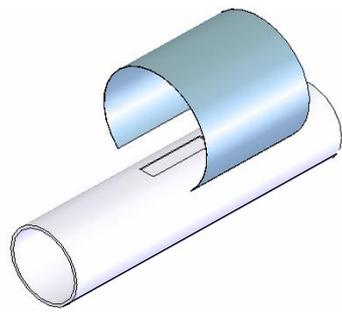
Na abordagem experimental foram testados oito espécimes tubulares, devidamente instrumentados para a obtenção de dados de pressões, variações

volumétricas e deformações ocorridas em pontos localizados de diferentes seções dos espécimes tubulares.

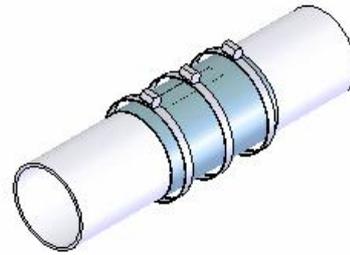
1.5

Reparo Utilizando Multicamadas Metálicas Coladas

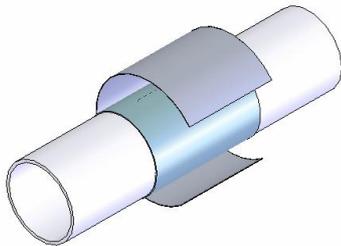
O método de reparo que utiliza multicamadas metálicas consiste na utilização de finas chapas de aço coladas na região do duto que apresenta defeito. As chapas são previamente dobradas por calandragem, têm um comprimento longitudinal igual a quatro vezes o comprimento do defeito, e um comprimento circunferencial 5% menor que a circunferência do duto. As chapas e o duto passam por um tratamento superficial de lixamento e limpeza para garantir a colagem das superfícies. O adesivo epóxi é preparado usando-se uma quantidade de 1280 gramas por metro quadrado (de área sobreposta para a colagem). O adesivo utilizado constituiu na mistura do Araldite® AV 138 e o Endurecedor HV 998 em uma relação de peso de 2.5:1. A mistura tem um tempo de manuseio de aproximadamente 30 minutos na temperatura de 25°C. A superfície interna da primeira camada e a superfície externa do duto são untadas com o adesivo. Esta camada é colocada no duto com sua junção a 180° do defeito e é fixada por braçadeiras durante cinco horas. As duas camadas seguintes são coladas segundo o mesmo procedimento, com cada junção posicionada a 90° da junção da primeira camada, sem a coincidência de junções. No caso de utilizar-se uma quarta camada, esta é montada na mesma posição da primeira. Após da cura do adesivo as camadas e o duto formam um só corpo. O procedimento é mostrado na figura 1.1.



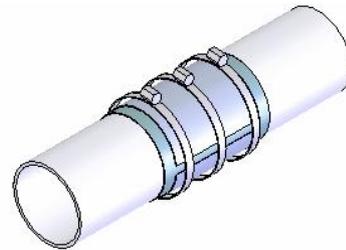
Colagem da primeira camada
Junção a 180° do defeito



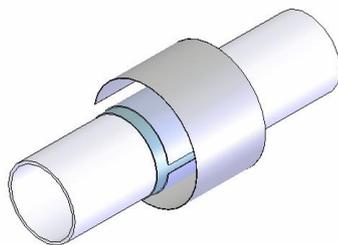
Braçadeiras fixam a primeira
camada



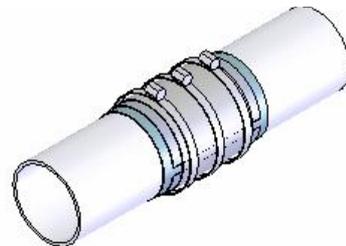
Colagem da segunda camada
Junção a -90° do defeito



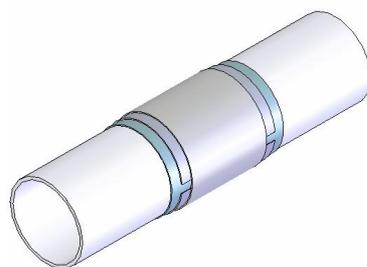
Braçadeiras fixam a segunda
camada



Colagem da terceira camada
Junção a 90° do defeito



Abraçadeiras fixam a terceira
camada



Reparo final de três camadas

Figura 1.1 – Aplicação de um reparo com três camadas.

1.6

Roteiro da Dissertação

Esta dissertação foi dividida em sete capítulos: um de introdução (este), cinco de desenvolvimento e um de conclusões. A seguir estão listados os tópicos principais de cada capítulo.

- Capítulo 2: são apresentados conceitos básicos da integridade estrutural em dutos e se faz o resumo da pesquisa bibliográfica na qual se sustenta parte do estudo feito.
- Capítulo 3: é feita a modelagem numérica descrevendo passo a passo o seu desenvolvimento, estuda-se a influência das não linearidades e se apresentam os resultados dos diferentes modelos numéricos desenvolvidos.
- Capítulo 4: apresenta-se o modelo analítico, onde as equações nas quais se baseia este modelo são deduzidas e aplicadas nos regimes de comportamento achados no capítulo anterior. Mostra-se também um programa para facilitar a aplicação da modelagem.
- Capítulo 5: é feita a abordagem experimental, que inclui a preparação e instrumentação dos espécimes tubulares, a descrição do dispositivo experimental e a análise dos resultados.
- Capítulo 6: é feita a comparação dos resultados, mediante os quais podem ser avaliados os modelos numéricos e analíticos. Também se apresenta um exemplo de aplicação onde se projeta e analisa um reparo de multicamadas metálicas a partir da modelagem desenvolvida.
- Capítulo 7: são feitas as conclusões sobre a eficácia do método de reparo proposto.

2

Fundamentos para a Avaliação de Integridade de Dutos

Este capítulo apresenta conceitos básicos da integridade estrutural em dutos e faz o resumo da pesquisa bibliográfica na qual se sustenta parte do estudo feito nesta dissertação. São também apresentados os critérios da Tensão Admissível e o Fator de Resistência Remanescente para avaliar a integridade estrutural de um duto com reparo e critérios para o uso e seleção dos adesivos, assim como o estudo do comportamento das juntas coladas, analisando-se a distribuição das tensões nelas existentes e a forma de ruptura destas juntas.

2.1

Integridade Estrutural em Dutos

Nos dutos em operação, as tensões atuantes são originadas por distintas solicitações ou carregamentos. A análise das tensões é feita através da aplicação de critérios de resistência, que tornam possível comparar um estado triaxial de tensões com o limite de resistência do material, obtido no ensaio de tração uniaxial.

O estado triaxial de tensões em um corpo em equilíbrio é representado pelo paralelepípedo elementar mostrado na figura 2.1.a. As componentes perpendiculares aos planos do paralelepípedo são as tensões normais (σ_{ii}), e as componentes tangenciais, são as tensões cisalhantes (σ_{ij}). Os planos principais são definidos como aqueles onde a componente cisalhante é nula, e as tensões

normais ali atuantes são chamadas tensões principais, como mostrado na figura 2.1.b.

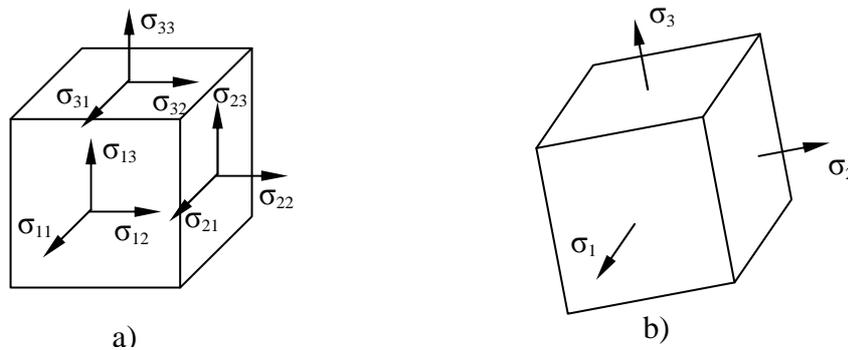


Figura 2.1. Paralelepípedo elementar representativo de um estado de tensão.

No caso de um duto (sem carregamento de torção), as direções dos planos principais são facilmente identificadas, já que estes coincidem com a direção circunferencial, longitudinal e radial do tubo. Em algumas aplicações, as tensões radiais podem se aproximar de zero, então, reduzindo-se a um estado biaxial de tensões.

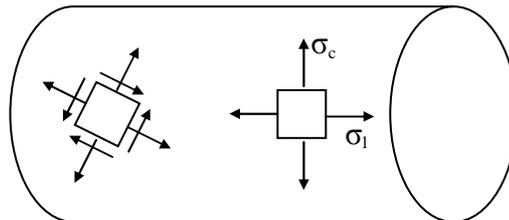


Figura 2.2. Estado de tensões num tubo sem carregamento de torção e pressão interna.

2.1.1

Critérios de Resistência

Dois critérios de resistência para materiais dúcteis são os de Tresca (máxima tensão cisalhante) e o de von Mises (máxima energia de distorção), cujas eficiências são comprovadas através de testes e dos sucessos dos projetos ao longo

da história. Estes critérios podem ser aplicados tanto para o escoamento como para a ruptura dúctil [4].

O critério de Tresca, ou da máxima tensão cisalhante, diz que acontece o escoamento quando no ponto mais solicitado do material a tensão cisalhante máxima atinge um valor crítico.

Considerando um estado de tensões neste ponto representado pelas tensões principais, existem três tensões cisalhantes máximas que assumem valores iguais às metades das diferenças das tensões principais. Chamando-se $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, a maior tensão cisalhante máxima será $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. O valor crítico é representado pela tensão cisalhante máxima obtida do ensaio a tração uniaxial ($\sigma_{tração}/2$) onde $\sigma_1 > 0$ e σ_2 e σ_3 são nulas [5]. No escoamento, $\sigma_{tração} = S_y$ e o critério de Tresca pode então ser representado por:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = S_y \quad (2.1)$$

Esta formulação simples facilita seu emprego em soluções analíticas de problemas elasto-plásticos; mas ignora a influência de uma das tensões principais o que, em alguns casos, tira a exatidão do método.

O critério de von Mises ou da máxima energia de distorção apresenta valores melhores na caracterização do escoamento, sendo menos conservativo que o critério de Tresca [4]. Segundo este critério, acontece o escoamento no ponto mais solicitado em um componente qualquer – estado triaxial de tensões, quando a sua energia elástica de distorção por unidade de volume for igual a energia de distorção que atua no corpo de prova num teste uniaxial de tração no instante do escoamento [6], isto é, quando $\sigma_{tração} = S_y$.

$$U_d = \frac{1 + \mu}{3.E} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} = \frac{1 + \mu}{3.E} \cdot \frac{\sigma_{tração}^2}{2}$$

Então:

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = S_y \quad (2.2)$$

2.1.2

Tensões em Dutos sem Defeito

Segundo a norma ASME B31.4 [7], o cálculo da pressão de projeto para dutos sem defeito é realizado utilizando-se o critério da Tresca [4]. Para um tubo de paredes finas, considera-se σ_1 como a tensão circunferencial (σ_c) e σ_3 como a tensão radial ou pressão interna ($\sigma_r = -P$) a qual pode ser desprezada por ser pequena em relação σ_c . Tem-se então que:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = S_y \cdot \text{fator} ; \quad (2.3)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material.

A recomendação API 5L [8] e a norma B31.4 usam $S_y = SMYS$ (resistência mínima ao escoamento especificada para o material). O *fator* usado na equação (2.3) descompõe-se em três parcelas: (i) fator de projeto, (ii) eficiência da junção por solda e (iii) temperatura de trabalho (F, E e T respectivamente)

$$P_d = \frac{2 \cdot t \cdot SMYS}{D} \cdot F \cdot E \cdot T ; \quad (2.4)$$

onde F é 0.72, E é tirado da tabela A.1 (Apêndice A) e T é igual a 1.

A máxima pressão de operação admissível (MAOP) não poderá ser maior que P_d ; e só poderá ser usada quando for feito um teste hidrostático onde a pressão de

teste máxima deve ser mantida igual a 1.25 x MAOP por pelo menos quatro horas [4].

$$MAOP = \min \left(P_d ; \frac{P_{hidrostática(4horas)}}{1.25} \right)$$

2.1.3

Tensões em Dutos com Defeitos de Corrosão

Nesta seção apresentam-se os principais métodos para avaliação de defeitos de corrosão com orientação longitudinal e carregamento por pressão interna. Estas equações semi-empíricas foram desenvolvidas pelos conhecimentos da mecânica da fratura e ajustadas experimentalmente [9].

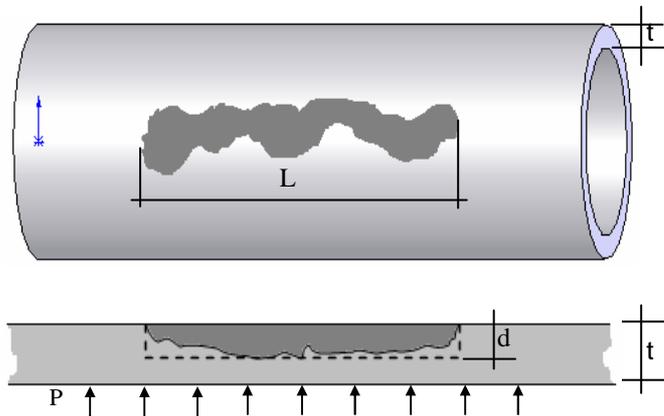


Figura 2.3 – Idealização da geometria de um defeito para a avaliação.

Usando-se o critério de Tresca e um fator de concentração de tensão $1/C$ que envolve a geometria do defeito, pode-se relacionar a pressão que faz um duto falhar com a resistência à falha por colapso plástico da seguinte forma:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_C = \frac{P_{defeito} \cdot D}{2 \cdot t} \cdot \frac{1}{C} = S_{flow}$$

onde resistência ao colapso plástico é dada por S_{flow} , e tem um valor compreendido entre o limite de escoamento e a resistência à ruptura do material (ou limite à tração). Então:

$$P_{defeito} = \frac{2 \cdot t}{D} \cdot S_{flow} \cdot C \quad (2.5)$$

O parâmetro C tem a seguinte forma:
$$C = \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

A : Área longitudinal de material perdido

A_0 : Área longitudinal da seção com defeito

M : Fator de dilatação

Pode-se dividir a equação (2.5) em três parcelas. A primeira depende da geometria original do duto, a segunda depende da resistência considerada para o colapso plástico do material e a terceira da geometria do defeito.

As equações mais conhecidas para o cálculo da pressão de falha num duto com defeito de corrosão tem o mesmo formato da equação anterior com a diferença de alguns parâmetros. A tabela 2.1 apresenta um resumo dos métodos usados para defeitos representados por seu comprimento L e profundidade máxima d , onde se inclui o fator de projeto para calcular a pressão de operação no duto com defeito.

Tabela 2.1 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito [4].

Método	S_{flow}	Formato do defeito	A/A_0	M	Fator de projeto
Grosseiro (ResMat)	$Min \left\{ \frac{S_y + S_u}{2}, 1.2 \times S_y \right\}$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	∞	F.E.T *
Área real	SMYS + 70MPa	Área projetada do defeito	$\frac{A}{A_0}$ $A_0 = Lt$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$	F.E.T
B31.G modificado (Arco e Kiefner)	SMYS + 70MPa	Área do defeito com aproximação retangular média	$0,85 \times \frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \left(\frac{L}{Dt} \right)^2}$	F.E.T
DNV RP-F101	S_u ou SMUS	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{Dt}}$	$(D/D-t) \times 0.9 \times F.E.T$
B31.G	se: $0,893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \leq 4$	1.1 x SMYS	Aproximação parabólica $\frac{2 \cdot d}{3 \cdot t}$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$	F.E.T
	se: $0,893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} > 4$	$P_{defeito} = 1,1 \cdot P_d \cdot \left(1 - \frac{d}{t} \right)$ P_d achada na seção sem defeito			

* Critério que usa conceitos básicos de Resistência dos Materiais

Na equação DNV RP-F101 incluem-se fatores adicionais $(D/D-t)$ no fator de projeto para que esta possa ser incluída no mesmo formato das equações anteriores. Resultados anteriores [9; 10] mostram que a equação DNV RP-F101 é a mais exata, e a B31.G a mais conservadora, sendo ambas as mais utilizadas na prática.

No caso de dutos corroídos trabalha-se com a máxima pressão de operação admissível reduzida, determinada pela Tabela 2.1 ($MAOP_{reduzida} = P_{defeito} \times \text{fator de projeto}$), a qual não deverá exceder à MAOP originalmente determinada para o duto sem defeito.

2.1.4

Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando os Critérios de Aceitação

A norma API RP 579 [11] utiliza um ou mais dos seguintes critérios de aceitação para avaliar a integridade de um componente estrutural.

- **Tensão Admissível**

Tem base no cálculo das tensões que resultam de diferentes condições de carregamento, classificação e superposição das tensões, e comparação das tensões calculadas com um valor admissível de tensão. Este valor admissível é geralmente estabelecido como uma fração da tensão de escoamento ou tensão de ruptura, e esta fração pode ser associada com o coeficiente de segurança. Este valor crítico não é muito utilizado, já que se encontram dificuldades do cálculo das tensões em componentes com defeitos.

- **RSF - Fator de Resistência Remanescente**

Define-se como a razão entre as resistências à falha determinadas para o componente com defeito e para o componente sem defeito.

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (2.7)$$

onde:

L_{DC} : carga limite ao colapso plástico do componente danificado.

L_{UC} : carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.

Com esta definição, este critério de aceitação pode ser estabelecido usando fórmulas tradicionais dos códigos de projeto, análise elástica de tensões ou análise elasto-plástica.

Se o RSF calculado for maior que RSF_a , definida como o RSF admissível, o componente danificado pode continuar operando normalmente. Se o RSF calculado for menor que o RSF admissível o componente pode ser reparado, re-classificado ou aplica-se alguma forma de solução para reduzir a severidade do ambiente de operação. A re-classificação da pressão pode ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \blacksquare \text{ Se } RSF < RSF_a \text{ então.... } MAWP_r &= MAWP \cdot \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) \\ \blacksquare \text{ Se } RSF \geq RSF_a \text{ então... } MAWP_r &= MAWP \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde:

$MAWP$: máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código do projeto.

$MAWP_r$: carga limite ao colapso plástico do componente com defeito.

Um valor recomendado para o RSF_a é 0.9.

- **FAD - Diagrama para a Avaliação de Falha**

Este critério é usado para tratar componentes que têm defeitos tipo trinca, para os quais são usados as avaliações limites: fratura, colapso plástico e combinação de ambas.

2.1.5

Noções Básicas da Plasticidade

A grande maioria dos componentes estruturais são projetados para trabalhar no regime elástico. Quando um componente trabalha no regime plástico, ele experimenta grandes deformações com um pequeno incremento da carga aplicada. Se o carregamento for cíclico, as deformações plásticas originadas nos entalhes ou em alguns defeitos, diminuem consideravelmente a vida a fadiga do componente [12].

O comportamento elasto-plástico da maioria dos materiais estruturais pode ser representado a través dos modelos mostrados na figura 2.4, os quais são obtidos a partir de idealizações ou simplificações do ensaio de tração [5].

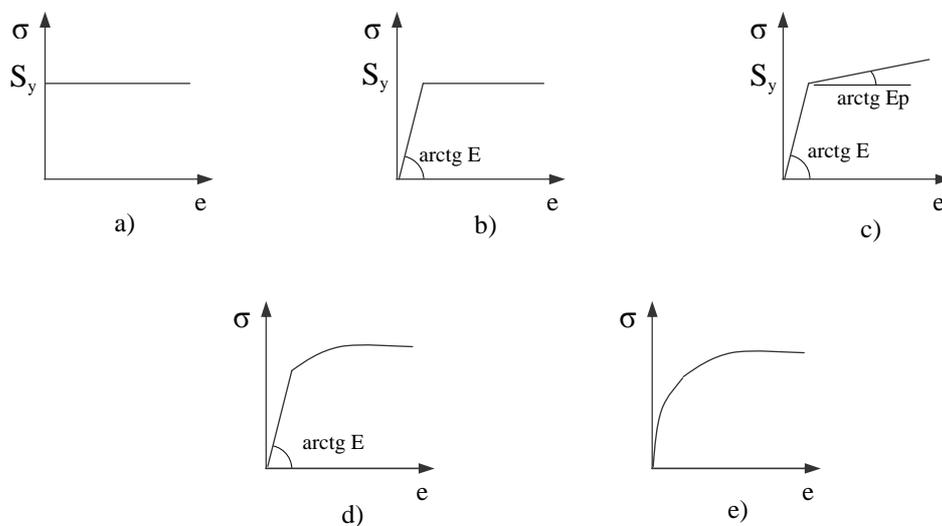


Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns modelos de materiais.

Os modelos mostrados na figura 2.4 são:

- (a) Modelo perfeitamente plástico: o qual não sofre deformação elástica. Assim que toda a deformação que experimenta é permanente.
- (b) Modelo elástico perfeitamente plástico: experimenta deformações elásticas e plásticas. A deformação elástica ocorre até atingir-se o valor da

resistência ao escoamento S_y , a partir do qual o material se deforma indefinidamente sem que haja aumento da tensão.

(c) Modelo de plastificação com encruamento linear: no qual o material tem uma reserva de resistência após do escoamento, fenômeno que é conhecido como “encruamento”. Na figura mostra-se E_p , que é equivalente ao módulo de elasticidade, mas no regime plástico.

(d) e (e) Modelos não lineares: onde no primeiro, a não linearidade tem começo depois de atingido o limite de proporcionalidade do material, e no segundo, a não linearidade tem início desde a aplicação da carga. A resistência ao escoamento nestes modelos é obtida determinando-se a tensão correspondente a valores convencionados de deformação plástica (0.2%) ou de deformação total (0.5%).

2.1.6

Relações Tensão-Deformação

No regime elástico as deformações que se apresentam num determinado material são linearmente relacionadas às tensões pela lei de Hooke. No regime plástico as deformações não são unicamente dependentes das tensões, mas também são dependentes do histórico de carregamento ou de como o estado de tensões foi alcançado [13].

São vários os critérios usados na teoria clássica da plasticidade que relacionam tensões e deformações, mas é comum a observância das seguintes hipóteses [6]:

- O material se comporta isotropicamente
- As deformações plásticas se produzem a volume constante, permitindo escrever-se a equação:

$$de_1^p + de_2^p + de_3^p = 0 \quad (2.9)$$

onde de_i^p é o incremento de deformação plástica na direção “i”.

Como consequência desta última hipótese, a qual é comprovada experimentalmente, se deduz que o coeficiente de Poisson para o regime plástico é igual a 0.5.

Em geral nos planos principais tem-se que [13]:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] + e_1^p + de_1^p \\ e_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_3 + \sigma_1)] + e_2^p + de_2^p \\ e_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] + e_3^p + de_3^p \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde:

e_i : deformação total na direção i.

e_i^p : deformação plástica total na direção i.

Para o cálculo das deformações equivalentes no regime plástico se utiliza a deformação de von Mises

$$de_{eq}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(de_1^p - de_2^p)^2 + (de_2^p - de_3^p)^2 + (de_3^p - de_1^p)^2} \quad (2.11)$$

Para um ensaio uniaxial a tração, os equivalentes plásticos de deformação e o equivalente de tensão, se reduzem a [13]:

$$de_p = de_1^p \quad (2.12)$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \quad (2.13)$$

Então para achar a deformação equivalente e a tensão total equivalente nos estados triaxiais segundo o critério de von Mises, tem-se [13]:

$$e_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.15)$$

2.2

Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos

2.2.1

Materiais Adesivos

Tentando substituir ou suplementar os métodos convencionais de junção, como por exemplo, a soldagem, foram desenvolvidas a técnicas de unir materiais por adesão. Devido ao avanço da tecnologia dos materiais, tem-se disponíveis no mercado novos materiais adesivos que permitem unir materiais, tais como os metais. Isto originou um grande aumento do uso de adesivos nas aplicações de engenharia, sendo estes muito utilizados em indústrias aeronáuticas [14].

Na atualidade se dispõe de um grande número de adesivos, os quais pode-se agrupá-los em adesivos inorgânicos, termofixos, termoplásticos, elastômeros, naturais [14].

2.2.2

Seleção do Adesivo

A performance de uma junta colada não só depende das propriedades físicas ou químicas dos adesivos, mas também de outros fatores como os materiais em contato e sua exposição ao meio, entre outros. Na tabela 2.2 estão listados os fatores que devem ser considerados ao selecionar um adesivo.

Tabela 2.2 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo [14]

FATORES DE PROJETO	CONSIDERAÇÕES
Requisitos para montagem	Colagem, selagem, isolamento, desenvolvimento ou aplicações de produção, reparo e manutenção.
Forma do adesivo	Pó, filme, à base de solvente ou à base de água ou pasta.
Método de aplicação	Manual ou mecânico, pincelamento, laminação ou “spray”.
Necessidade do processo	Consistência, tempo de cura, vida útil, tempo, temperatura, pressão para cura, pré-tratamentos para superfície, equipamentos, processos após montagem e acabamento.
Projeto de junta	Tipos de forças, área de colagem, número de montagens.
Performance exigida	Resistência mecânica, montagem estrutural temporária ou permanente, se o carregamento na junção é contínuo ou intermitente, direção da carga.
Condições de serviço	Calor, frio, umidade, química, radiação e riscos biológicos.
Outras exigências	Custo dos materiais, toxicidade, inflamabilidade, facilidade de manuseio, odor, cor, propriedades corrosivas, ópticas, térmicas e outras propriedades físicas e especificações a serem satisfeitas.

No projeto da junta é recomendável que a área de colagem possua uma rugosidade que permite ao adesivo uma boa ancoragem.

Na tabela 2.3 mostram-se alguns dos principais aderentes adesivos e sua compatibilidade com os aderentes.

Tabela 2.3 - Principais aderentes adesivos [14]

	Adesivos																						
	I	Naturais					Elastômeros				Termoplásticos				Termofixos								
Aderentes	Silicato de sódio	Colas animais	Cola de amina	Dextrina	Caseína	Acrilonitrilo butadieno	Policloropreno	Poliuretano	Borracha natural	Nitrato de celulose	Álcool polivinílico	Acetato de polivinil	Poliacrilato	Resina de silicone	Cianoacrilato	Formaldeído fenólico	Uréia formaldeído	Melamina formaldeído	Poliésteres (insaturados)	Resina epóxi	Poliâmida	Nitrado fenólico	Epóxi fenólico
Metais						X	X		X			X			X					X	X	X	X
Vidros e cerâmicos	X	X					X			X	X				X					X			X
Madeira					X			X	X		X					X	X	X		X			
Papel	X	X	X	X	X					X	X	X											
Couro		X				X	X		X	X													
Têxteis		X				X			X	X		X											
Nitrilo						X									X								
Natural						X			X						X								
Poliuretano						X	X	X															
Cloreto de polivinil						X	X	X												X			
Acetato de celulose								X		X					X								
Nitrato de celulose								X		X					X								
Etil celulose										X					X					X		X	
Poliétileno																				X		X	
Polipropileno																				X		X	
Nylon							X									X				X			
Poliéster																		X	X				
Melamina						X	X													X			
Poliâmida																				X	X		

As características físicas de adesivos são mostradas na tabela seguinte.

Tabela 2.4 - Características físicas de adesivos [14]

Forma Física	Considerações
Líquidos com viscosidade alta ou baixa	Muitas formulações podem existir neste estado. São fáceis de aplicar, com a possibilidade do controle da viscosidade pelo usuário.
Pasta	Esta forma é adequada para produções em massa, onde preenchimento de vazios são necessários. Uma grande variação na consistência pode ser obtida
Filme	Esta forma é restrita a superfícies lisas e são de fácil e rápida aplicação sem desperdício e com espessura da camada de adesivo uniforme
Pó	Esta forma requer a mistura com líquido ou ativação térmica para alcançar o estado líquido. Alguns tipos possuem catalisadores latentes que serão ativados durante a cura. Em geral, são formas econômicas de adesivo com longo período de conservação.
Granulados, cubos e outras formas sólidas.	São formas convenientes para facilitar a aplicação e a cura para aplicações particulares. Longo período de conservação.

Neste trabalho optou-se pelo adesivo em pasta, por ser o mais adequado no preenchimento dos defeitos de corrosão.

O adesivo a ser utilizado no reparo são as resinas epóxi porque têm excelente aderência aos materiais metálicos, geralmente possuem resistência maior do que os outros tipos numa faixa mais ampla de temperaturas, e são ideais para estruturas submetidas a altas tensões ou condições de serviço adversas, tais como calor e umidade.

A resina epóxi é indicada para reforços estruturais e revestimentos, porque depois da cura resulta um polímero termofixo que suporta altas temperaturas (acima de 120°C com aproximadamente as mesmas propriedades mecânicas para o adesivo epóxi usado neste reparo), além de ter resistência ao envelhecimento por calor e resistência química aos diversos tipos de solo e solventes. É importante na seleção do adesivo considerar o tempo de manuseio, a temperatura do duto durante a aplicação, a temperatura de operação do duto, o tempo de aplicação e as condições locais. [14]

2.3

Tensões nas Juntas Coladas

2.3.1

Distribuição de Tensões numa Junta Colada

Existem distintos tipos de juntas coladas, cada qual necessitando de um determinado tipo de análise para o conhecimento da sua distribuição de tensões. Um dos mais conhecidos é o tipo de junta sobreposta simples que se mostra na figura 2.5.

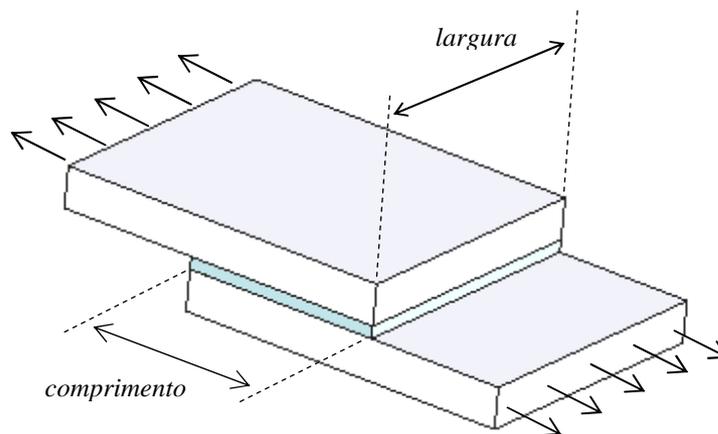


Figura 2.5 – Junta colada simples.

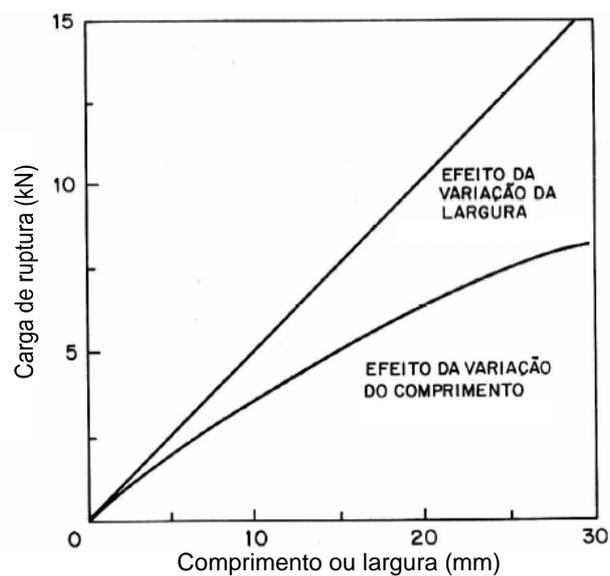


Figura 2.6 Resistência da junta colada simples [14]

Na figura 2.6 (cujo gráfico só tem validade qualitativa) pode-se ver que a resistência da junção não aumenta proporcionalmente com o comprimento sobreposto, e alcança um valor limite para grandes comprimentos, mas a resistência aumenta proporcionalmente com a largura da junção. A resistência ao cisalhamento das juntas coladas também depende da espessura da linha de colagem, obtendo-se maior resistência à medida que a espessura diminui [15].

Para os reparos para dutos usando camadas metálicas coladas serão utilizados os conceitos analisados para juntas simples onde o comprimento sobreposto é igual ao perímetro do duto, como pode-se ver na figura 2.7. A largura da junção é o comprimento do reparo.

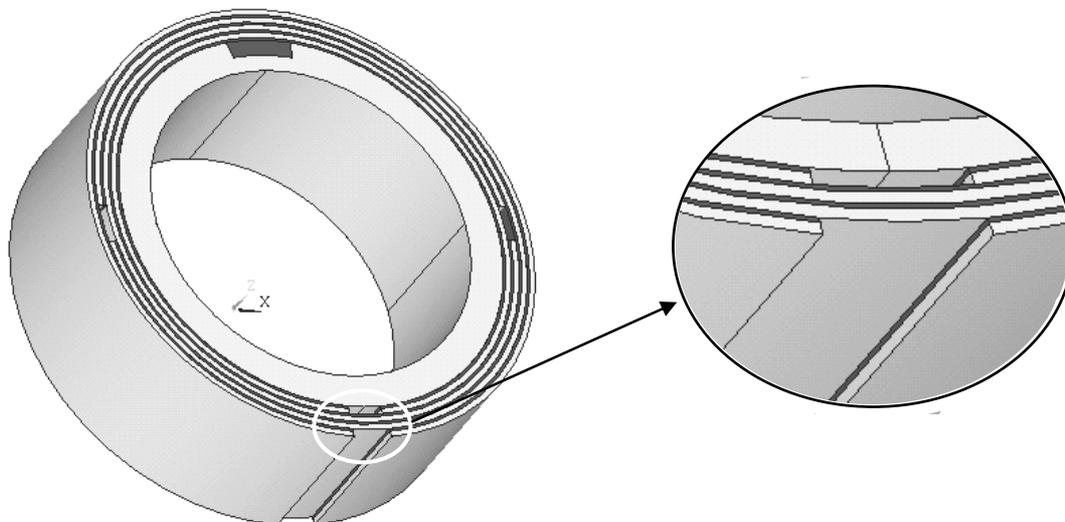


Figura 2.7 – Junta colada no reparo de dutos

O fator de concentração de tensões cisalhantes em juntas coladas é definido pela razão entre a tensão máxima na junta e a tensão média, a qual é definida como a carga dividida pela área real de colagem.

Na análise da distribuição das tensões numa junta colada, podem-se considerar dois tipos de modelos, os que consideram os aderentes (camadas metálicas) e o adesivo com comportamento elástico, e os modelos que consideram os aderentes e o adesivo com comportamento elasto-plástico. Esta consideração da plasticidade do adesivo submetido à tensão cisalhante pode reduzir a concentração de tensões substancialmente, e assim aumentar a resistência prevista das juntas, em

comparação à resistência prevista pelos modelos que só consideram o comportamento elástico da junta [16], conforme mostrado na figura 2.8.

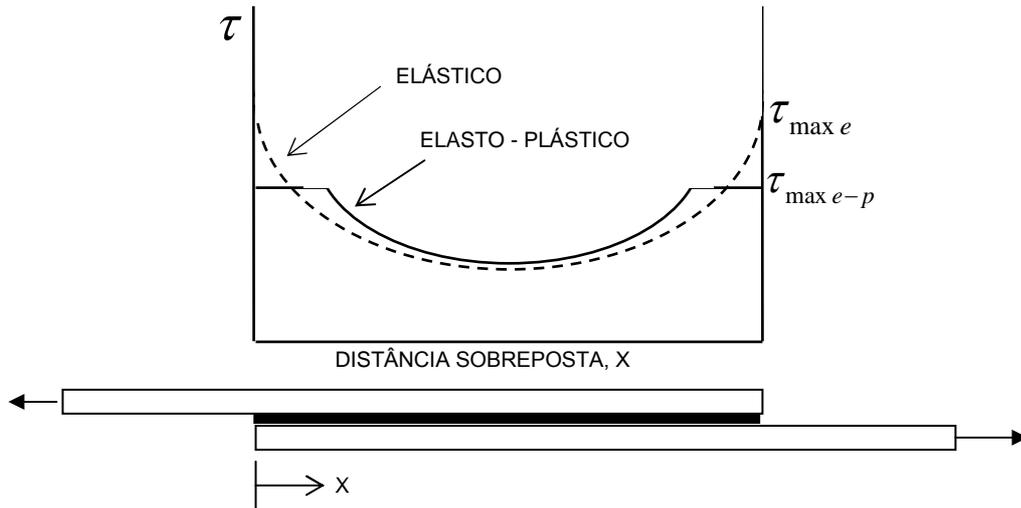


Figura 2.8 Distribuição das tensões cisalhantes na junta colada [17]

2.3.2

Ruptura de uma Junta Colada

As falhas nas juntas coladas podem ocorrer no adesivo, nos aderentes ou na interface adesivo-aderente. As falhas mais comuns são as falhas adesivas e as falhas coesivas. A falha coesiva ocorre no interior do adesivo, e a falha adesiva ocorre na interface adesivo-aderente, como é mostrado na figura 2.9. A que tem mais probabilidade de acontecer é a falha coesiva, já que as forças de adesão por unidade de área são maiores que a resistência à ruptura experimental [14].

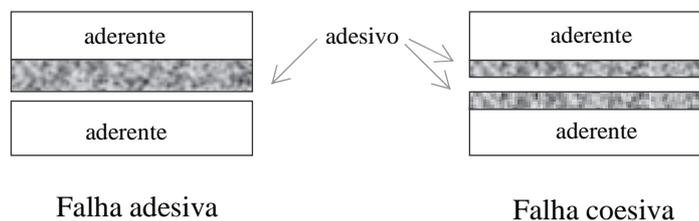


Figura 2.9 – Tipos de falha nas juntas coladas [14].

Neste trabalho, na modelagem por elementos finitos, não são utilizados os elementos de contato, os quais podem ser mais recomendáveis para o estudo de falhas por adesão (este tipo de elemento representa melhor os fenômenos de interação entre as superfícies).

A referencia [17] apresenta a distribuição das deformações presentes numa junta colada, esta foi carregada para induzir uma tensão cisalhante no adesivo. Os resultados são obtidos mediante uma análise numérica, onde considera que só acontece a ruptura quando todos os elementos da junta colada atingem seu limite de tensão cisalhante. Na figura 2.10.a apresentam-se à falha por adesão, enquanto na figura 2.10.b se mostra uma falha coesiva no instante em que ela se inicia no extremo da junta, e logo se vai propagando até o último elemento.

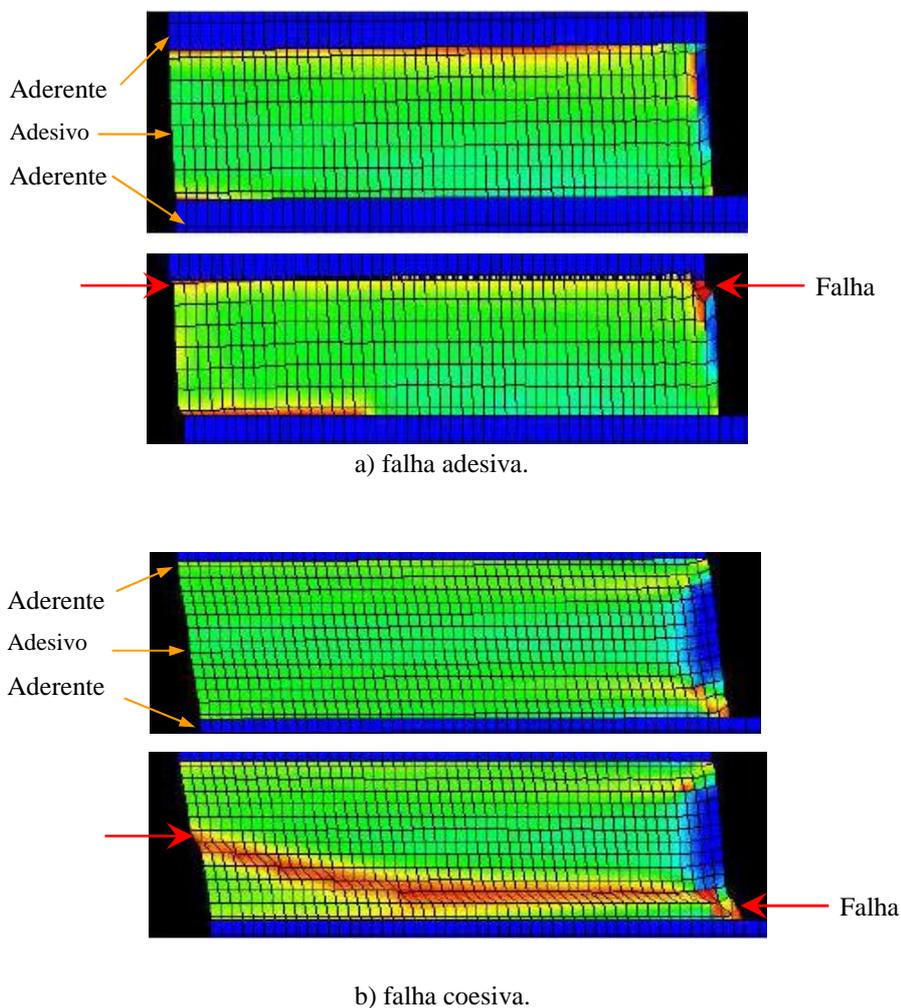


Figura 2.10 - Simulação numérica da falha adesiva e coesiva [13].

Na modelagem numérica desenvolvida neste trabalho, também se considera a falha coesiva quando todos os elementos da camada de adesivo tenham atingido sua resistência máxima ao cisalhamento, como mostrado na figura 2.10, mas neste caso, com um comprimento de área sobreposta igual ao perímetro do duto

3

Modelagem Numérica

Com a finalidade de compreender e otimizar o comportamento do duto reparado e propor modelos numéricos que melhor o representem, foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação.

3.1

Introdução

A modelagem pelos elementos finitos se inicia pela discretização de uma dada geometria em um número finito de elementos. Esta discretização permite a resolução do problema impondo um sistema de equações, que é aplicável a quase qualquer estrutura por mais complicada que esta seja, mediante um grande número de operações de natureza repetitiva que pode ser adaptada a uma programação numérica para ser resolvida por um computador. Para cada elemento obtido da discretização acha-se uma matriz de rigidez que relaciona as forças com as deformações; logo se procede à montagem da matriz de rigidez total para a estrutura. Em geral, dado que o método de cálculo mediante elementos finitos é um procedimento aproximado, a precisão requerida aumenta diretamente com o número de elementos usados. É recomendável, em alguns casos, utilizar mais de uma discretização, com a finalidade de comparar e obter melhores resultados.

As cargas externas aplicadas à estrutura se substituem por sistemas de forças equivalentes concentradas nos nós. Os processos numéricos vão desde análises lineares até complicadas análises não lineares. Estes são necessários para aplicações onde se precisa estudar a falha do componente após a ocorrência do escoamento. Nas análises não lineares se utilizam métodos incrementais e iterativos com o objetivo de reduzir ao máximo a diferença entre as forças internas e externas nos elementos para que elas fiquem dentro de intervalos aceitáveis. Quando isso acontece, uma próxima etapa de incremento de carga é realizada, e neste contexto existem métodos de convergência numérica tais como o de Newton-Raphson ou o método de comprimento de arco.

Todo programa de elementos finitos segue três etapas para o cálculo [18]:

Pré-processamento, o qual tem o objetivo de discretizar a geometria do modelo mediante nós e elementos.

Solução é a parte interna do processo onde se resolvem os sistemas de equações a partir dos dados introduzidos, o qual inclui a formação das matrizes de rigidez dos elementos finitos, montagem da matriz de rigidez, aplicação das condições de contorno, cálculo dos deslocamentos e cálculo de tensões.

Pós-processamento, onde os resultados são analisados e mostrados.

Neste trabalho foi utilizado o programa comercial Ansys 10.0. Alguns modelos foram analisados até a ruptura, necessitando então a inclusão de análises não lineares. Isto aumentou de maneira considerável o trabalho computacional. Desta forma, foi necessária a criação de modelos distintos para que fossem obtidos resultados aceitáveis. Os modelos criados agrupam-se em modelos planos 2D, axissimétricos e modelos 3D.

A modelagem 2D usando o estado plano de deformações possibilita a análise de situações elasto-plásticas na região dos defeitos, onde a deformação longitudinal é desprezível quando comparada à deformação circunferencial.

A modelagem 3D possibilita a obtenção do comportamento das tensões e deformações em um estado triaxial, mas devido ao peso computacional que acontece quando os elementos atingem estados elasto-plásticos, pode ser necessário utilizar simetrias e discretizações algumas grosseiras.

A modelagem axissimétrica é útil para determinar o efeito que tem os extremos do reparo com relação à concentração de tensões na parede de duto.

3.2

Especificações para a Análise Não Linear

3.2.1

Análise Incremental não Linear

Devido ao estudo da ruptura do modelo é importante a boa aplicação dos incrementos de carga, já que quando a pressão aplicada tem o valor próximo da pressão que produz a ruptura, estes incrementos devem ser muito pequenos para tentar lograr a convergência. Para que aconteça o equilíbrio num corpo, o vetor das forças externas deve ser equilibrado pelo vetor das forças internas da estrutura num instante de tempo t , o que é representado pela equação [19]:

$${}^tR - {}^tF = 0$$

Uma análise incremental deve obter a solução da condição de equilíbrio num instante $t + \Delta t$ a partir da solução conhecida no instante t , procurando assim ${}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F = 0$. Este pode ser representado pela igualdade dos incrementos das forças externas acontecidas nos instantes t e $t + \Delta t$, e o vetor incremento das forças internas originadas pelo incremento das forças externas

$$\Delta R = \Delta F$$

Então a matriz de rigidez K , correspondente às condições geométricas e ao material da estrutura no instante t , é utilizada para avaliar o vetor do incremento das forças internas (ΔF) com o vetor incremento dos deslocamentos (U), no instante t :

$${}^t K \cdot U \cong {}^{t+\Delta t} R - {}^t F$$

A equação anterior é a condição de equilíbrio que se procura para o instante $t + \Delta t$, no entanto, devido a não linearidade da matriz ${}^t K$, é necessário utilizar-se um processo iterativo para garantir-se a verificação da condição de equilíbrio no instante $t + \Delta t$. Desta forma, a representação da equação de equilíbrio na iteração (k-1) fornece:

$${}^{t+\Delta t} K^{(k-1)} \cdot U^{(k)} \cong {}^{t+\Delta t} R - {}^t F^{(k-1)} \quad k=1,2,\dots,n$$

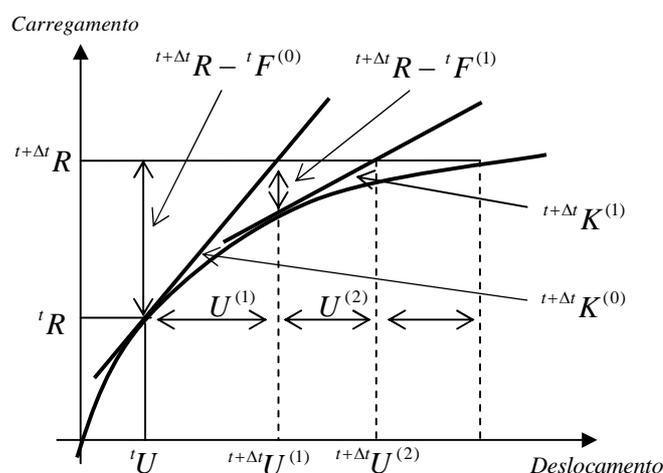


Figura 3.1 Método de Newton-Raphson [19].

Entre os métodos utilizados pelo programa Ansys para a obtenção da verificação da condição de equilíbrio na solução dos problemas não lineares, encontra-se o método iterativo de Newton-Raphson. Nesta aproximação, a carga é subdividida em incrementos, que podem ser aplicados sobre vários passos de carga. Antes de cada solução, o método de Newton-Raphson compara a diferença do vetor de carga, que é a diferença entre as forças internas (cargas que correspondem às tensões do elemento), e as cargas aplicadas. O programa realiza uma solução linear, usando a

diferença de cargas, e comprova sua convergência. Se a convergência não é alcançada, o vetor de diferença de carga é novamente avaliado, a matriz rigidez é atualizada, e a nova solução é obtida, este processo iterativo continua até a convergência [20].

O programa conta com ferramentas que fazem mais eficaz o trabalho de procurar a convergência, tais como “linha de procura”, “passo de carga automático”, e “bisseção”, os quais podem ser ativados se o usuário achar conveniente. Se a convergência não é alcançada, então o programa tenta resolver com um menor incremento de carga.

Em algumas análises estáticas não lineares em que é utilizado o método de Newton-Raphson, a matriz de rigidez pode chegar a ser não única, provocando sérios problemas de convergência. Nestes casos o programa permite ativar uma alternativa para a iteração, que é o método de Comprimento de Arco, o qual faz com que as iterações de equilíbrio do método Newton-Raphson convirjam ao longo de um arco, ajudando a prevenir a divergência, já que trabalha controlando a energia de deformação, evitando as soluções biunívocas [20].

A análise não linear tem três níveis de operações:

- O primeiro nível consiste em que o usuário do programa defina explicitamente os passos de carga sobre um intervalo de tempo, assumindo que as cargas variam linearmente dentro dos passos de carga.
- Dentro de cada passo de carga, o operador pode fazer que o programa realize várias soluções (sub-passos ou tempo de passo) para aplicar a carga gradualmente.
- Em cada sub-passo, o programa pode realizar um número de iterações de equilíbrio para obter a convergência.

3.2.2

Não Linearidades nos Dutos

As não linearidades estudadas são:

- Não linearidade geométrica, que ocorre quando se trabalha com grandes deslocamentos.
- Não linearidade do material, que ocorre quando o comportamento do material é não linear elástico ou elástico linear e plástico.

Foi feito um estudo simples da influência que tem a inclusão da não linearidade geométrica na análise numérica em dutos com pressão interna. Para este foram feitos dois modelos de dutos sem defeito que trabalha com deformação plana. No primeiro é incluída a não linearidade geométrica e a não linearidade do material. No segundo modelo, apenas se trabalha com a não linearidade do material. Ambos simulam um duto de 76,2mm de diâmetro e 2mm de parede, através do estado plano de deformações. Modelos que trabalham com grandes deslocamentos, próximo a ruptura do modelo, experimentam diminuição da espessura da parede, que também acontece no corpo de prova num teste a tração, onde a área da sua seção transversal diminui consideravelmente. Então, o modelo que inclui grandes deslocamentos trabalha com a curva real tensão vs deformação do material. A curva real considera a redução de área do material, já que utiliza a área real no cálculo da tensão, (a curva de engenharia não considera esta diminuição da área ao calcular a tensão com a área inicial do corpo de prova). Porém, a modelagem que não considera grandes deslocamentos trabalha com a curva de engenharia do material.

Para relacionar a curva de engenharia com a curva real se utilizam as equações:

$$\sigma_v = \sigma(1 + e) \qquad \varepsilon = \ln(e + 1)$$

Sendo “ e ” a deformação de engenharia. Em ambos modelos se trabalha com a curva bilinear (elasto-plástica de encruamento linear), como se mostra mais adiante,

na figura 3.5. A resistência a tração (S_u) na curva de engenharia é de 456 MPa (tabela 3.1), e na curva real é 547.2 MPa. Nos modelos se considera a ruptura quando o primeiro elemento alcança sua resistência a tração.

Na maioria das equações teóricas se utiliza os dados da curva de engenharia, pelo que se faz também a comparação com os valores obtidos da equação $\sigma_c = PD/2t$ que considera a falha quando $\sigma_c = S_u$, segundo o critério de Tresca, pelo que se espera uma pressão de ruptura menor que a pressão de ruptura obtida mediante os elementos finitos usando pequenos deslocamentos (numericamente se fez o análise segundo o critério de Mises), já que o critério de Tresca é mais conservativo que o critério de Mises (neste exemplo, tem uma diferencia de aproximadamente 1MPa). O comportamento dos modelos são mostrados na figura 3.2.

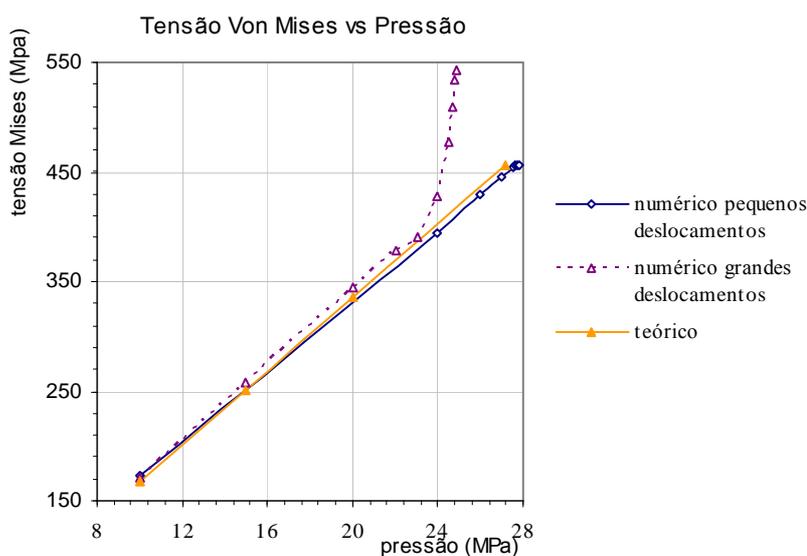


Figura 3.2 – Não linearidades no duto sem defeito

Na figura se pode ver que os comportamentos são similares até um ponto perto da pressão de ruptura, onde o modelo com grandes deslocamentos experimenta uma diminuição acentuada da parede do duto e a tensão aumenta consideravelmente com cada pequeno incremento de pressão.

As semelhanças mostradas para as pressões de ruptura e para o comportamento predito pelo modelo que não inclui grandes deslocamentos e pela equação teórica são importantes para a continuação deste trabalho. Observa-se na figura 3.2 que ambas modelagens apresentam resultados semelhantes (com uma diferença nas pressões de ruptura de 0.4 MPa). Assim resolveu-se trabalhar com os dados da curva de engenharia do material, e pequenos deslocamentos para se facilitar a modelagem analítica que será desenvolvida no capítulo 4.

A diferença entre as pressões de ruptura entre as duas modelagens numéricas da figura 3.2, pode depender de vários fatores, como o aumento de diâmetro, entre outros, que pelas limitações deste trabalho não serão estudados.

3.3

Descrição da Modelagem Numérica

Nesta seção apresenta-se uma descrição do processo de modelagem utilizado no programa.

Tipo de Elemento Utilizado

A escolha dos elementos é feita de acordo com o tipo de análise a realizar e a geometria do modelo.

Para os modelos 2D os elementos devem ter as seguintes características:

- Deformação plana, conseguindo assim melhor aproximação com a realidade na ruptura, porque na região do defeito as deformações longitudinais são

pequenas, podendo ser desprezíveis quando comparadas às deformações circunferenciais.

- Possibilidade de plastificação
- Possibilidade de suportar grandes deformações

Dois tipos de elementos apresentam estas características:

1. Elemento de quatro nós e dois graus de liberdade por nó: sua variante triangular é recomendada para modelos que têm malhas regulares.
2. Elemento de oito nós com dois graus de liberdade por nó: tem bom comportamento na sua variante triangular e é bom para modelos com malhas regulares e irregulares.

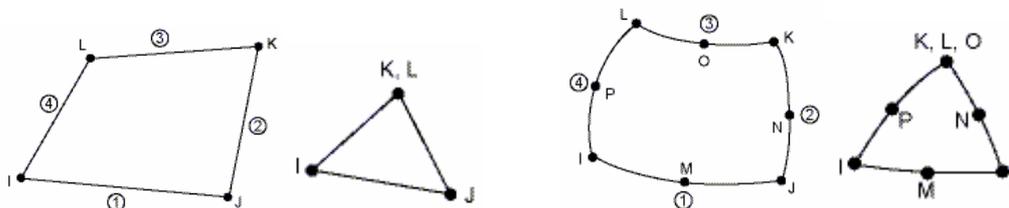


Figura 3.3 - Elementos 2D [20].

Para os modelos planos desenvolvidos, os quais apresentam malhas regulares, utilizou-se o elemento de quatro nós que representa menor trabalho computacional. O programa Ansys tem os elementos Plane 42 e Plane 182 com estas características, sendo o segundo mais indicado para aplicações em materiais incompressíveis. O elemento utilizado foi o Plane 42.

Para o modelo 3D pode-se utilizar:

1. Elemento de oito nós e três graus de liberdade por nó: tem variante prismática e tetraédrica. As malhas com tetraedros não são muito recomendáveis para este tipo de elemento, sendo bom para modelos com malhas regulares.

2. Elemento de vinte nós com três graus de liberdade por nó: tem variante prismática, piramidal e tetraédrica. Este elemento é bom para modelos com malhas irregulares.

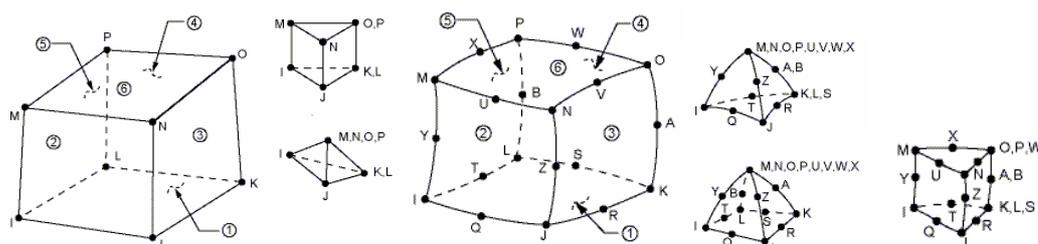


Figura 3.4 – Elementos 3D [20]

Resolveu-se usar o primeiro tipo de elemento trabalhando com malhas regulares. No Ansys foi escolhido o elemento Solid 95.

Para o modelo axissimétrico foi utilizado o mesmo elemento dos modelos 2D.

Materiais

A definição das propriedades dos materiais para a modelagem por elementos finitos é feita segundo o tipo de análise que se pretende fazer. Na maioria dos modelos desenvolvidos se utiliza a curva de engenharia do material (fato que será sustentado mais adiante), a qual é simplificada em: (i) uma curva de engenharia bilinear (com encruamento linear), e (ii) uma curva de engenharia multilinear.

São utilizadas as propriedades de dois tipos de tubos e dois tipos de chapas. No primeiro conjunto tubo-chapa, trabalha-se com a curva bilinear. Para o segundo conjunto tubo-chapa foram feitos ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas dos materiais (Apêndice B).

As curvas bilineares são obtidas prolongando a reta elástica com inclinação E , e a reta plástica com inclinação E' , como se mostra na figura 3.5.

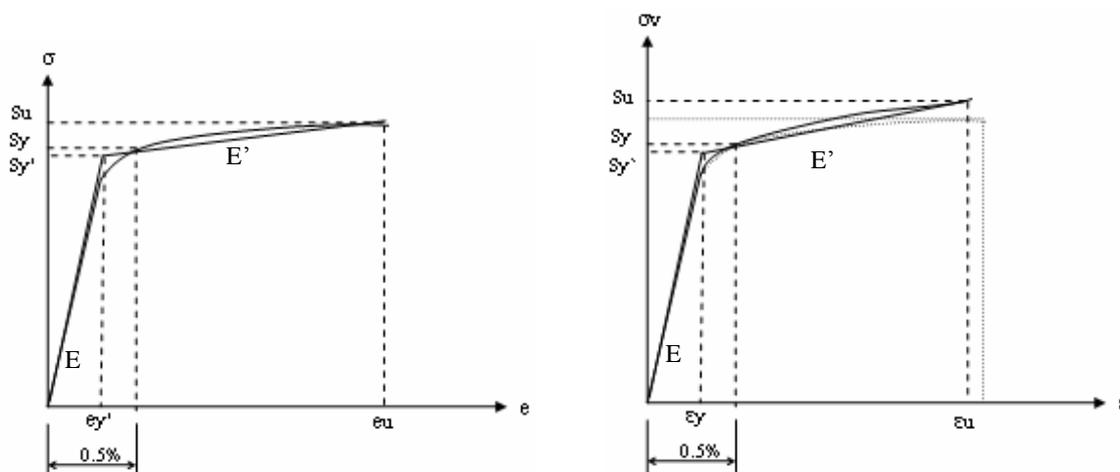


Figura 3.5 – Curvas bilineares tensão vs deformação de engenharia e real

Apresentam-se os dados dos materiais utilizados:

Tabela 3.1 –Propriedades mecânicas do duto e chapa 1 (Apêndice B e referencia [21])

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)	E (GPa)
Duto	387	456	0.19	20	200
Camada metálica	175.8	279	0.088	36	200
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36	4.7

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 – bilinear (Apêndice B e referencia [21])

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)	E (GPa)
Duto	262	310	0.131	34	200
Camada metálica	176.2	295	0.08	35	200
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36	4.7

Os coeficientes de Poisson foram $\mu=0.29$ para todos os aços e $\mu=0.35$ para o adesivo. As propriedades do adesivo foram obtidas do catálogo do fabricante [21].

Duto e chapa 2, multilinear

Utiliza-se uma curva multilinear com a maior quantidade de pontos na região elasto-plástica, que se estende entre o limite de proporcionalidade até o limite ao escoamento. Isto foi feito para permitir uma melhor comparação com os resultados

experimentais, pois nesta região se apresentam grandes variações da tensão com um pequeno incremento da deformação. O módulo de elasticidade dos aços foi considerado com valor $E=200\text{GPa}$ e no adesivo foi $E=4.7\text{GPa}$

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (multilinear)

Ponto	Duto		Camada metálica	
	e (%)	σ (MPa)	e (%)	σ (MPa)
1	0.0475	95	0.05	100
2	0.0742	148,4	0.139	140.55
3	0.109	219.73	0.34	171.18
4	0.127	228.92	0.5	177.66
5	0.173	242.53	2.8	220
6	0.253	253.28	4.3	240
7	0.321	257.19	13	280
8	0.4	260.12	26	295
9	0.5	262.64	35	295
10	3.57	280	-	-
11	17	310	-	-
12	34	310	-	-

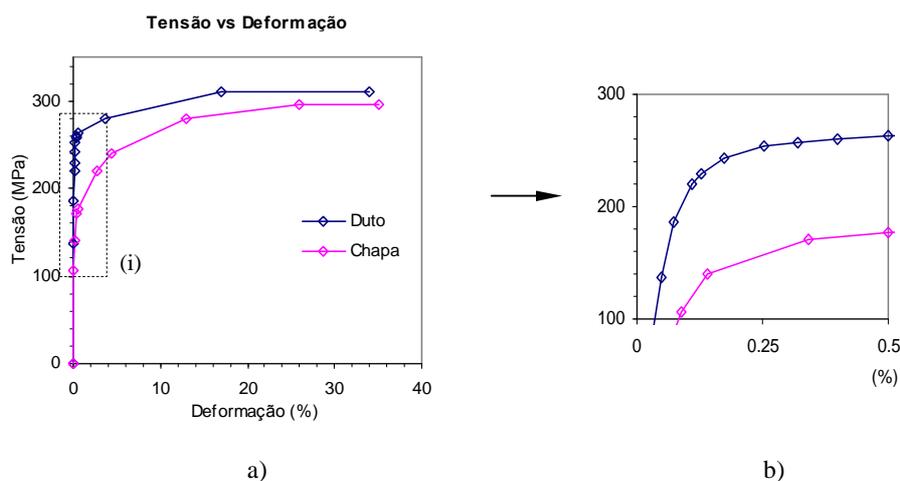


Figura 3.6 - Curva multilinear tensão vs deformação e ampliação da região (i)

Modelagem

Na modelagem de uma estrutura que tem vários componentes, se deve prestar atenção ao tipo de união que vão ter os componentes. Os componentes modelados são: duto, camadas metálicas e adesivo, os quais no modelo foram colados,

trabalhando como um só corpo com distintas propriedades, fato que tem que ser corroborado pelos testes experimentais. Tal hipótese foi feita porque se considera que não existe deslizamento entre os componentes no funcionamento normal desta aplicação. Caso aconteça o deslizamento, este será considerado quando o adesivo tiver atingido seu limite de ruptura ao cisalhamento, originando assim a falha do modelo.

Na modelagem do defeito não se considera a influência da concentração das tensões causada pela mudança abrupta da geometria entre as regiões sem defeito e com defeito. Segundo os resultados de Jorge L. C. Diniz [10], a concentração de tensões não tem relevância quando se trata de uma análise onde se estuda o colapso plástico da região do defeito.

Nas figuras 3.7 e 3.8 apresentam-se as dimensões dos modelos 2D (com os dois tipos de geometrias de defeito) e axissimétrico respectivamente.

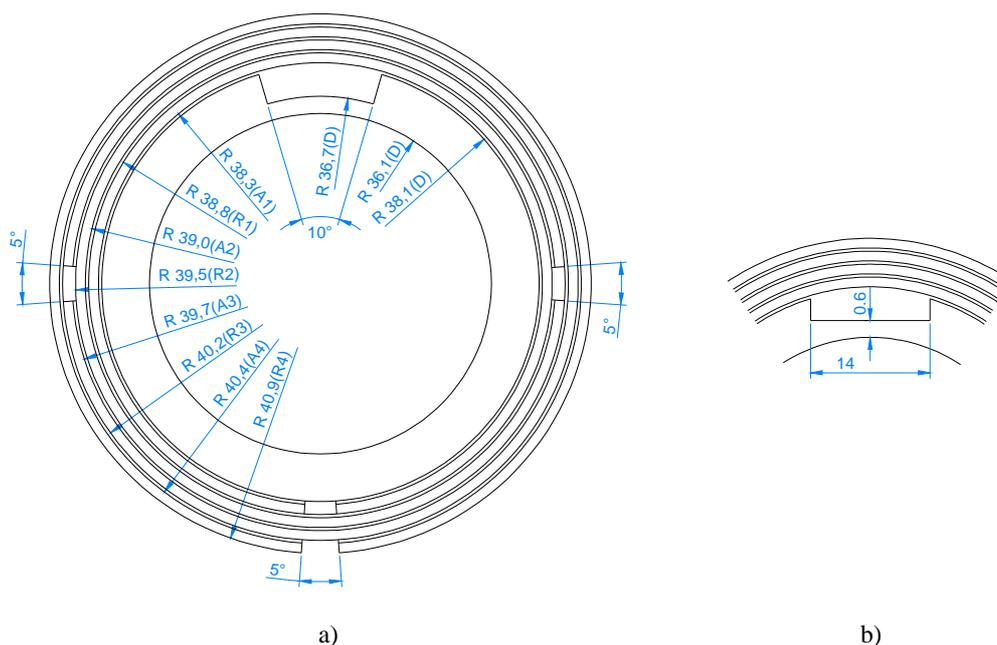


Figura 3.7 – Dimensões na modelagem 2D

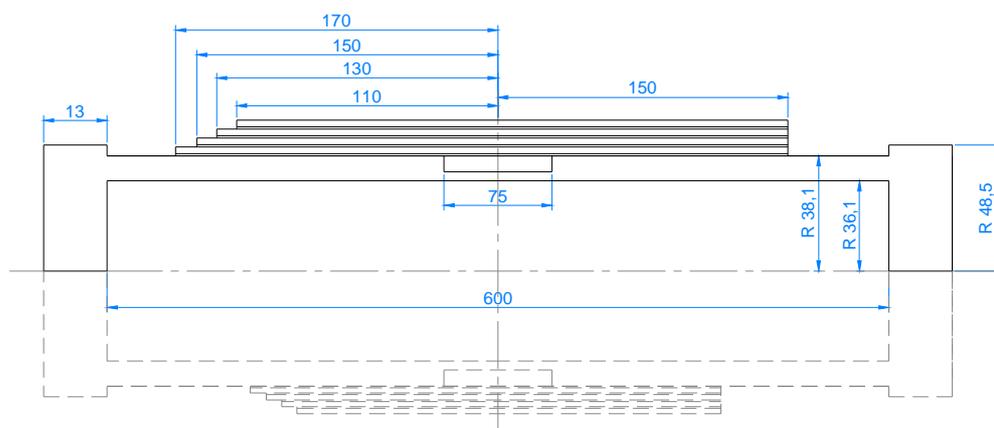
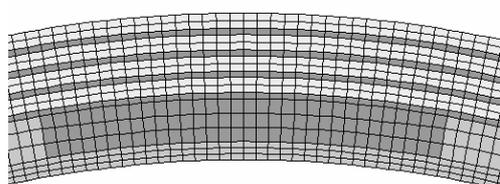


Figura 3.8 – Dimensões na modelagem axisimétrica

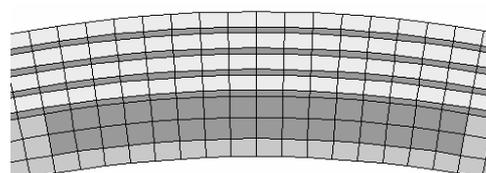
Um modelo 3D foi feito com as dimensões dos modelos anteriores, considerando simetria transversal, na metade do defeito e considerando uma terminação escalonada do reparo, a qual foi modelada elasticamente. No outro modelo 3D, não foram modeladas as interrupções das camadas metálicas, e modelou-se $\frac{1}{4}$ do duto (simetria longitudinal e simetria transversal), considerando-se uma terminação do reparo sem escalonamento. Este modelo trabalha elasto-plásticamente.

Malha

As malhas devem ser feitas o mais homogeneamente possível. No caso da simulação de cilindros, se recomenda usar três elementos na parede do duto [10]. Então, no modelo 2D foram testados dois tipos de malhas, com 10 440 e 3 190 elementos respectivamente, como se mostra na figura 3.9.



Modelo 2D-A



Modelo 2D-B

Figura 3.9 – Malhas testadas.

Os resultados mostraram que não existiu nenhuma diferença entre os resultados obtidos nos dois modelos, ambos apresentam a mesma convergência quando se tenta alcançar seu limite de ruptura, mesmo quando os modelos apresentam um ou dois elementos na região do defeito.

Condições de Contorno

Para o modelo 2D foram utilizadas duas restrições de deslocamento como indicado na figura 3.10.

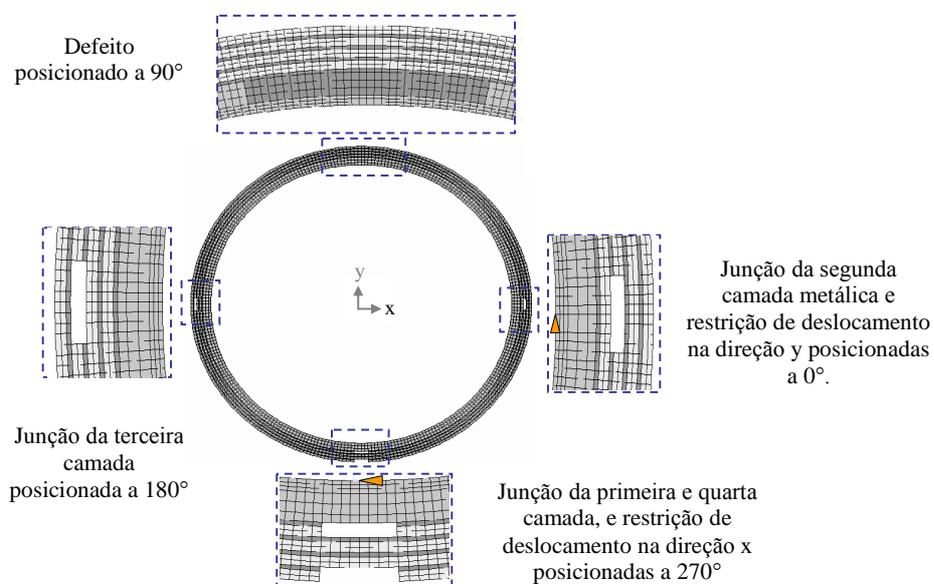


Figura 3.10 – Detalhes da modelagem 2D

As restrições impostas ao modelo 3D se mostram na figura 3.11. A tensão axial imposta é proporcional à pressão interna, e é aplicada para simular o tampo [10].

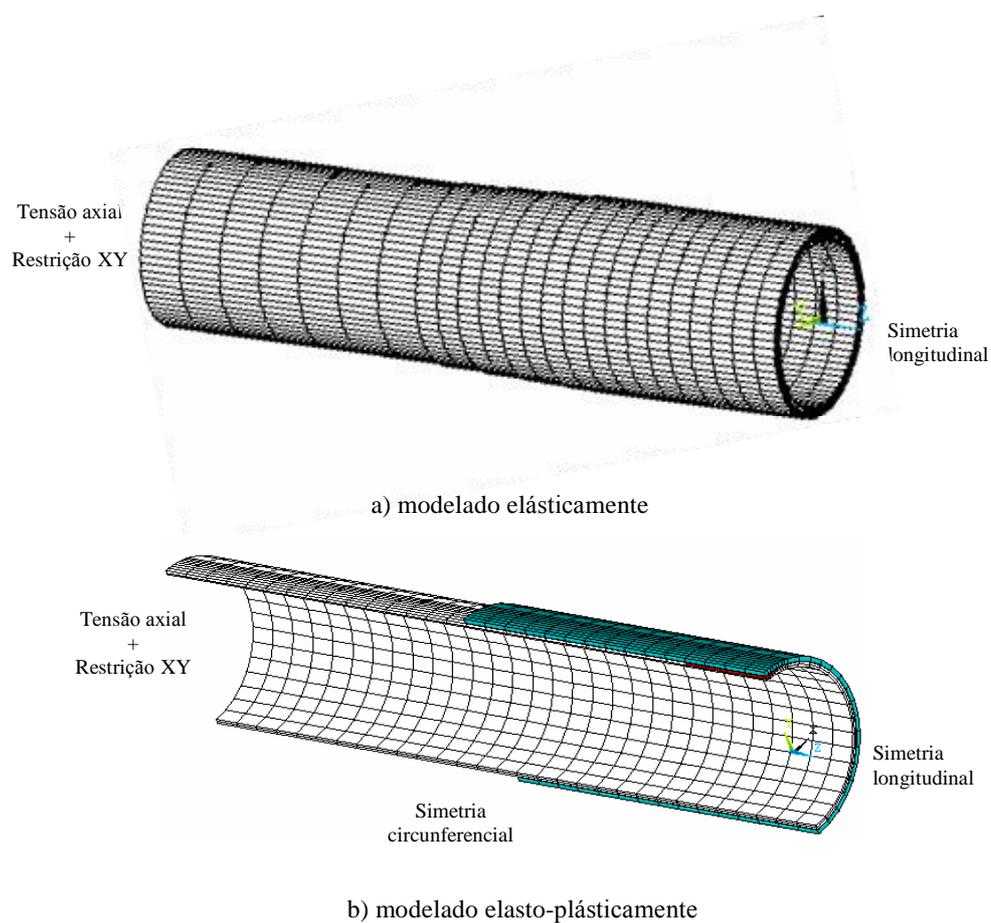


Figura 3.11 – Detalhes na modelagem 3D.

Para o modelo axissimétrico se colocam duas restrições no meio da parede do duto na direção longitudinal do mesmo, e simetria BC (opção do Ansys para modelos axisimétricos) nos tampos do duto.

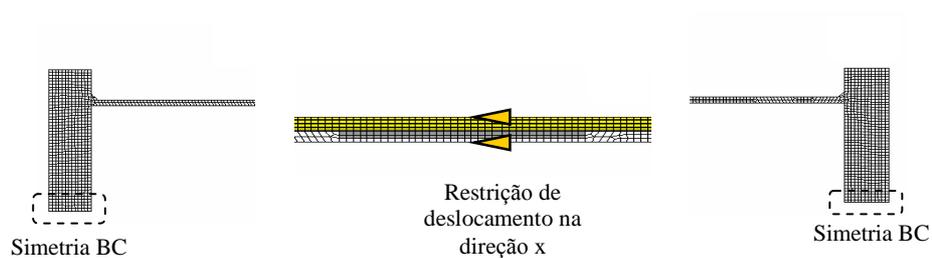


Figura 3.12 – Detalhes na modelagem axisimétrica.

Aplicação do carregamento e controle da solução

Mediante o “controle da solução” se pode aplicar a pressão interna nos modelos com comportamento elasto-plástico de forma apropriada para conseguir a convergência. Cada carga aplicada foi dividida em 30 passos, e cada passo foi dividido em 1000 sub passos, com a opção de tempo ativada para que o programa não faça todos os passos caso não seja necessário. Este também foi programado para fazer até 1000 iterações em cada sub passo para tentar convergir. Isto se traduz em termos de saltos ou incrementos de pressão (ΔP) na região elasto-plástica e na região próxima á ruptura. Com a opção de tempo desativada $\Delta P = P/30000$, já com a opção de tempo ativada, ΔP é ainda menor.

3.4

Análise dos Resultados Numéricos

3.4.1

Distribuição das Tensões em um Duto com Reparo

A distribuição das tensões é bastante irregular devido à geometria complexa e ao uso dos distintos materiais no reparo. Assim, o estudo é feito identificando as regiões mais solicitadas onde à integridade estrutural do duto pode estar afetada, ou para que se possa otimizar o trabalho de reparo. Na figura 3.13 se identificam tais regiões, as quais vão ser posteriormente estudadas utilizando modelos simplificados.

A região mais importante neste estudo é a região do defeito, onde as tensões equivalentes apresentam valores altos. Nos extremos das camadas metálicas, perto das junções circunferenciais, os valores das tensões circunferenciais são pequenos, devido ao comprimento de sobreposição que não é o suficiente para que o adesivo transmita a carga à camada metálica. Porém, é onde o adesivo apresenta as maiores

tensões cisalhantes. Outra região importante é a extremidade longitudinal do reparo, onde pode ocorrer concentração de tensões.

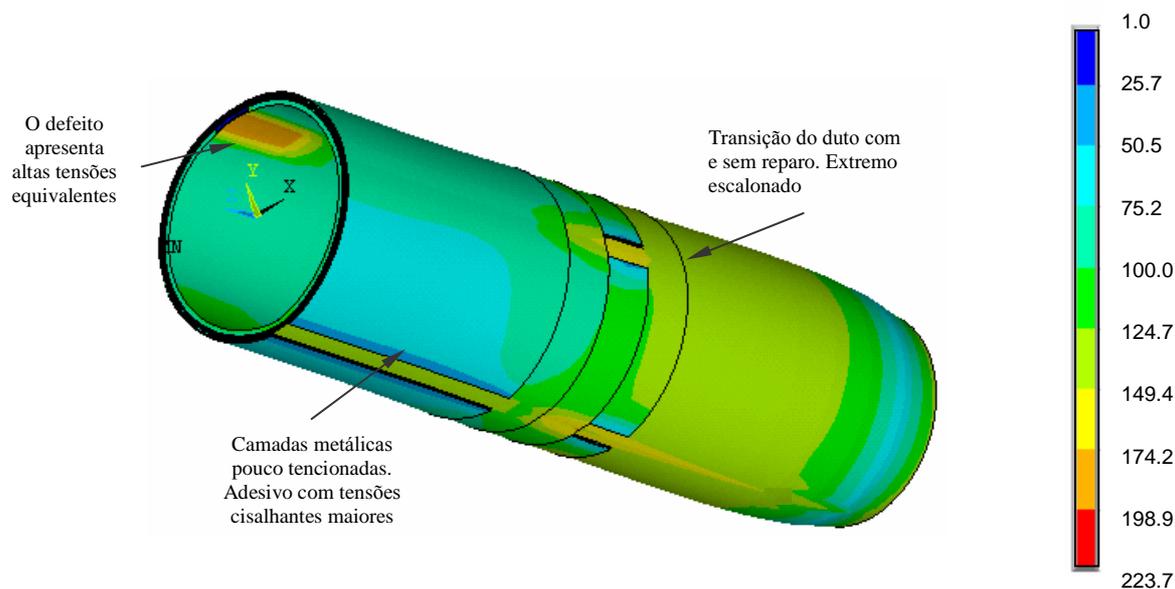


Figura 3.13 – Duto carregado, modelo linear 3D (escala de tensões Von Mises em MPa).

3.4.2

Estudo da Tensão Circunferencial

Nas figuras 3.14 e 3.15 se identificam regiões que dependem do comportamento elástico ou plástico que ocorre em cada uma das camadas, sejam camadas do reparo, do adesivo ou do tubo com defeito. Os dados das tensões mostradas foram coletados em pontos dos componentes sobre a posição radial do centro do defeito. Esta modelagem é feita com dados dos materiais mostrados na tabela 3.1, as dimensões se mostram na figura 3.7 e a análise é feita considerando deformação plana.

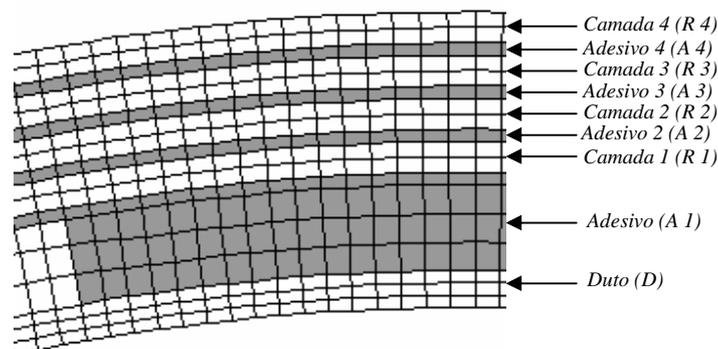


Figura 3.14 – Componente da modelagem numérica.

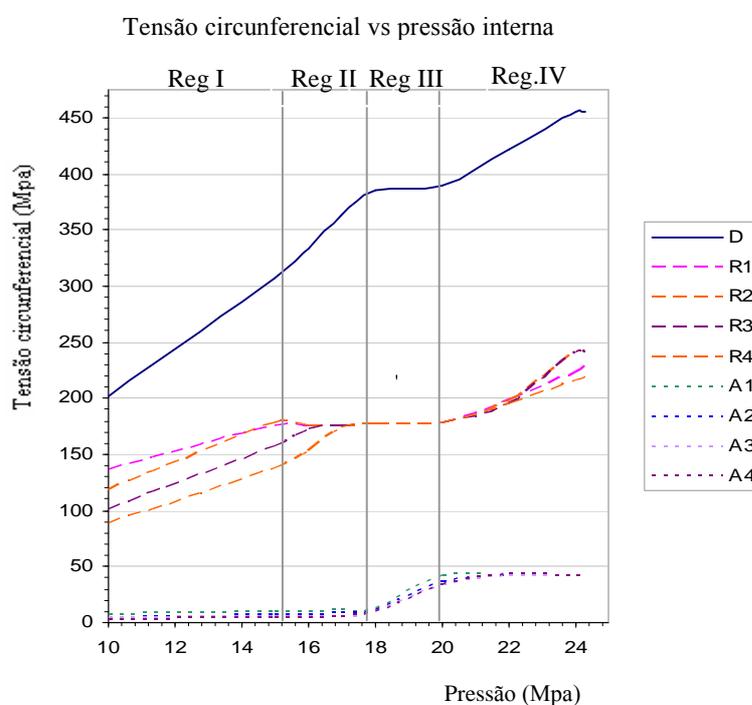


Figura 3.15 – Regiões do comportamento.

As quatro regiões do comportamento mostradas na figura 3.15 são:

- Região I: Nesta região o duto e os componentes do reparo trabalham no regime elástico, entendendo-se desde uma pressão interna igual a zero até uma pressão na qual o primeiro dos componentes atinge seu limite ao escoamento (no caso, a lâmina de reparo mais interna). O aporte de carga de cada

componente é proporcional a seu módulo de elasticidade. Em consequência, o adesivo tem aporte de carga desprezível.

- Região II: Inicia-se a plastificação sucessiva das camadas metálicas, onde seu aporte de incremento de carga diminui consideravelmente. Os incrementos de pressão são resistidos pelo aumento da tensão que ocorre no material do tubo na região do defeito. Os aportes de carga nas lâminas são muito pequenos e dependem do pequeno encruamento do seu material. Esta região se estende desde o início da plastificação dos reparos até o início da plastificação do duto.
- Região III: Inicia-se a plastificação do duto, e com as camadas metálicas já plastificadas, aumenta o aporte de carga no adesivo, o qual tem módulo de elasticidade maior que o módulo com que trabalham o duto e as camadas metálicas na região plástica (encruamento). A região III vai desde a plastificação do duto até a plastificação do adesivo.
- Região IV: Local em que o duto e os componentes do reparo trabalham no regime plástico. Esta região se estende até a ruptura de algum componente do conjunto. Considera-se a falha do modelo quando algum componente atingiu sua tensão de ruptura.

Na figura 3.16 mostra-se a plastificação sucessiva dos componentes do reparo na região do defeito.

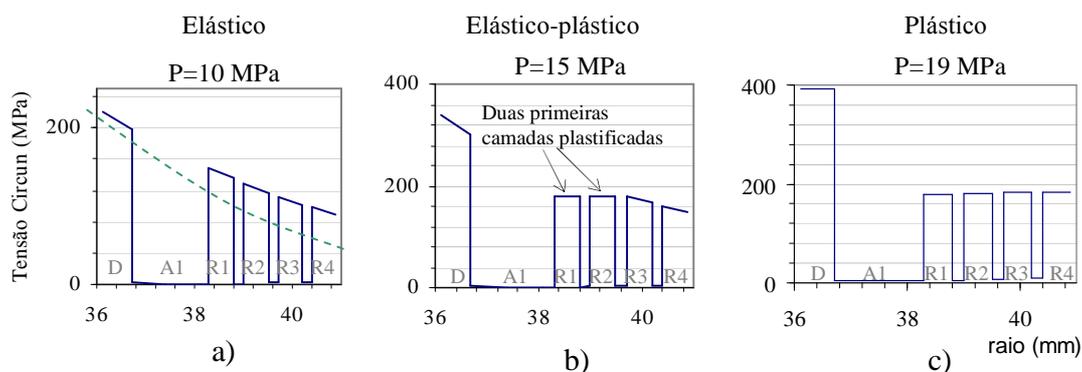


Figura 3.16 – Transição elasto-plástica na região do defeito

Na figura 3.16.a se apresenta a distribuição das tensões circunferenciais que ocorrem nas paredes do duto, das camadas metálicas e do adesivo. Verifica-se comportamento similar à distribuição de tensões de um duto de parede espessa mostrada na curva verde pontilhada. Isto que indica que o componente se comporta como um único corpo com propriedades distintas a um duto de parede espessa de um único material. Este comportamento foi útil na dedução da modelagem matemática.

Nas figuras 3.16.b e 3.16.c as camadas metálicas vão se plastificando, até que todo o componente trabalhe no regime plástico.

3.4.3

Comportamento das Tensões com a Variação de Parâmetros nos Modelos Numéricos

O comportamento que pode ter o duto com reparo usando multicamadas metálicas coladas pode depender de vários fatores. Nesta seção se faz a análise de modelos que têm quatro camadas metálicas de 0.5mm no reparo através da variação dos seguintes parâmetros:

- Diferentes profundidades de defeito
- Diferentes materiais no reparo
- Diferentes geometrias de defeito

3.4.3.1

Diferentes Profundidades de Defeito

Neste item se modela uma profundidade de defeito de 0,6mm (onde $C=0,7$ em defeitos longos sem a influência das paredes, definido na seção 2.1.2), com as mesmas propriedades do modelo anteriormente estudado ($C=0,3$) para quatro camadas no reparo. A figura 3.17 mostra, esquematicamente, os dois defeitos modelados.

Os resultados apresentados na figura 3.18 mostram que os comportamentos são similares, podendo-se identificar as regiões descritas para o modelo com profundidade de 1,4mm. O modelo com profundidade de defeito igual a 0.6mm suporta pressões muito maiores do que a capacidade de um duto novo (33.5MPa e 24MPa respectivamente), devido ao super-dimensionamento da espessura do reparo em relação à pequena profundidade do defeito. A análise é feita considerando deformação plana, com as propriedades indicadas na tabela 3.1 e na figura 3.7.

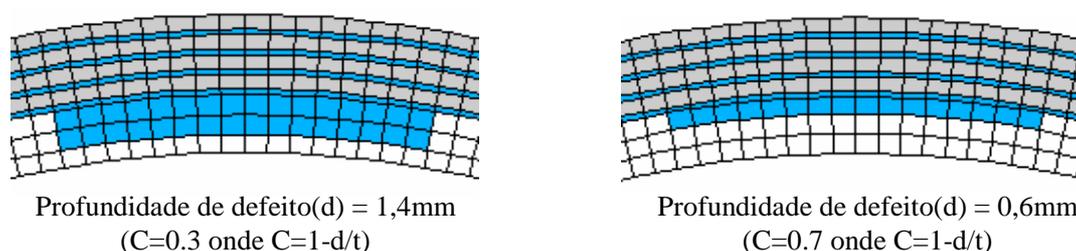


Figura 3.17 – Modelos com diferente profundidade de defeito.

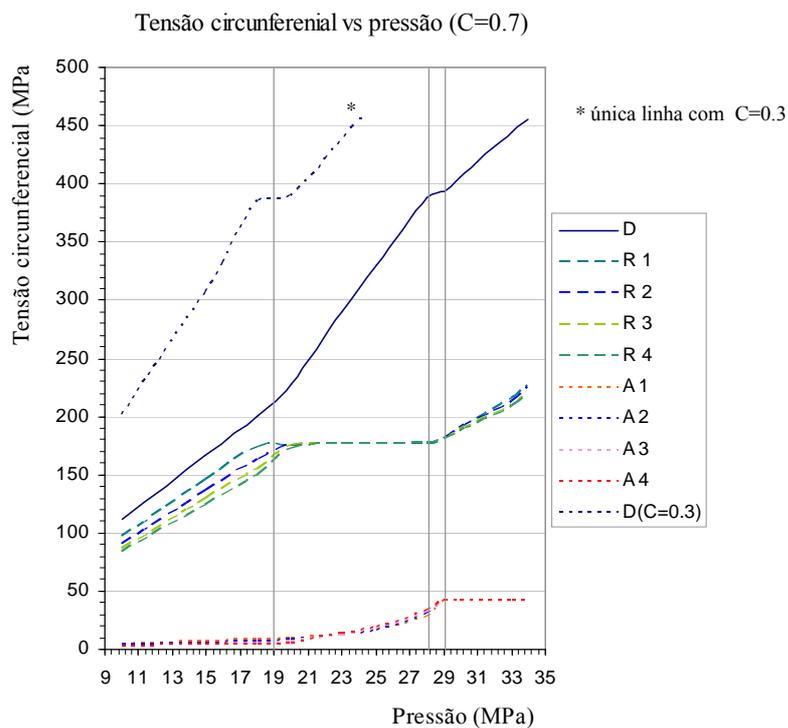


Figura 3.18 – Comportamento das tensões para o modelo com C=0.7 e sua comparação com o modelo de C=0.3.

3.4.3.2

Diferentes Materiais de Reparo

Neste item se muda o material utilizado nas camadas metálicas e se mantém o mesmo material e geometria para o duto (figura 3.7).

Propriedades Mecânicas	S_y (MPa)	S_u (MPa)	e_u (%)
Reparo, modelo anterior	175,8	279	36
Reparo, novo modelo	387	456	20

Na figura 3.19 se apresentam as curvas para a tensão circunferencial vs pressão interna do modelo com o novo material no reparo. Deve-se notar que no modelo, o

duto e o novo reparo são constituídos de materiais com propriedades mecânicas idênticas.

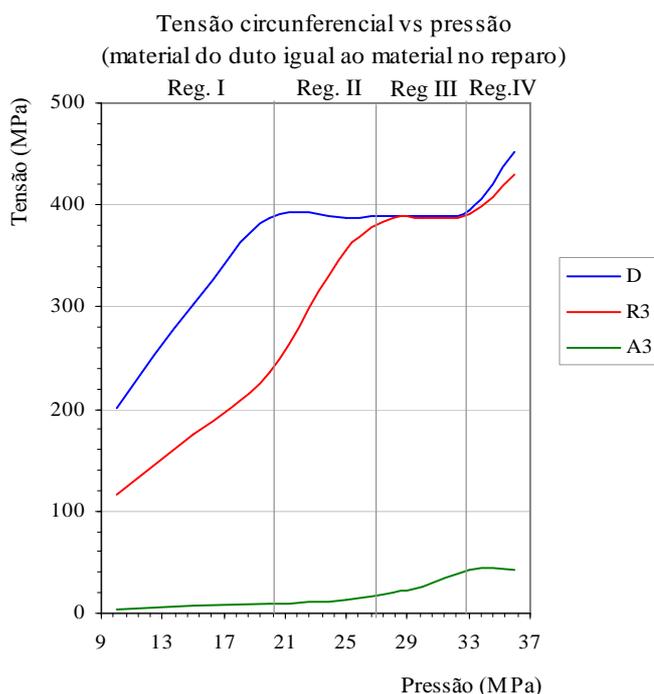


Figura 3.19 – Comportamento das tensões num reparo com as mesmas propriedades mecânicas que o duto (na figura é indicado comportamento da terceira camada metálica e terceira camada de adesivo que tem comportamento equivalente às outras camadas respectivamente).

Através da figura 3.19 se identificam quatro regiões similares às definidas anteriormente, com variações nos seus limites, mas com as mesmas tendências apresentadas, as quais são:

- Região I: O duto e o reparo apresentam aportes de carga proporcionais ao incremento da pressão, até que o duto atinge seu limite de escoamento.
- Região II: Quase toda à suportação da carga   feito pelas camadas metálicas, já que o duto trabalha no regime plástico, até que, também, o reparo atingia seu limite de escoamento.

- Região III: Com o reparo e o duto plastificado a suportação de carga é feito pelo adesivo que rapidamente plastifica.
- Região IV: O duto e o reparo encruam até que ocorre a ruptura.

3.4.3.3

Diferentes Geometrias de Defeito

Nesta seção se estudará o efeito da variação da geometria transversal do defeito (figura 3.20) em relação ao comportamento do modelo já estudado. As três geometrias do defeito têm a mesma profundidade máxima e o mesmo comprimento circunferencial. Além do defeito, todas as outras propriedades dos modelos são iguais. A análise é feita com estado plano de deformações.

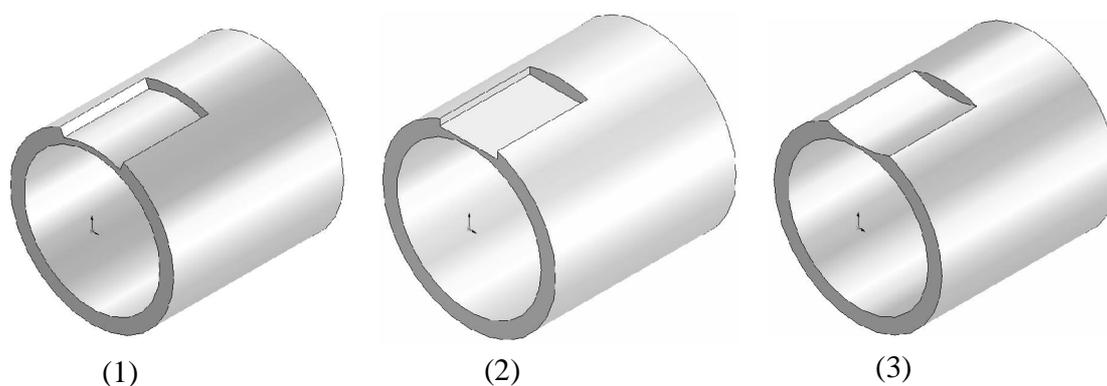


Figura 3.20 – Geometrias transversais dos defeitos estudados.

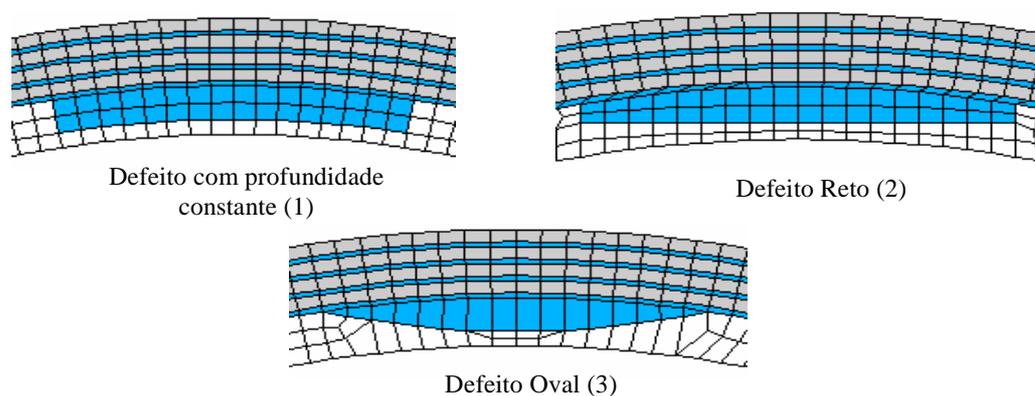


Figura 3.21 – Discretização dos modelos reparados com diferentes geometrias transversais do defeito.

Na figura 3.22 se mostra o comportamento dos modelos no gráfico tensão circunferencial vs pressão. Os três modelos têm comportamentos similares, nas quatro regiões estudadas. As tendências das curvas são as mesmas, mas os valores das tensões mostram pequena discordância, sobretudo, para o modelo com defeito oval no regime elástico. Os valores das tensões convergem quase a uma mesma pressão no seu limite de escoamento, a partir do qual os três modelos têm valores similares da pressão de ruptura.

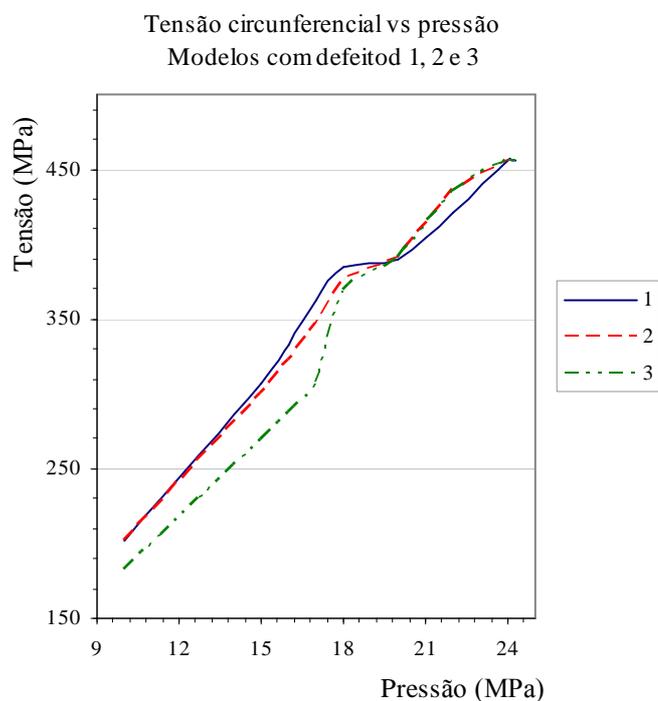


Figura 3.22 – Comportamento das tensões para os três tipos de defeito.

3.4.4

Modelo Simplificado

O objetivo deste estudo é facilitar a obtenção do modelo matemático, para o qual mostra-se o comportamento do duto com reparo quando este é modelado com uma camada metálica equivalente a soma das quatro camadas metálicas presentes no reparo.

O modelo consta de: o do duto com defeito, a primeira camada de adesivo, e uma camada metálica sem junção circunferencial, como se mostra na figura 3.23.a.

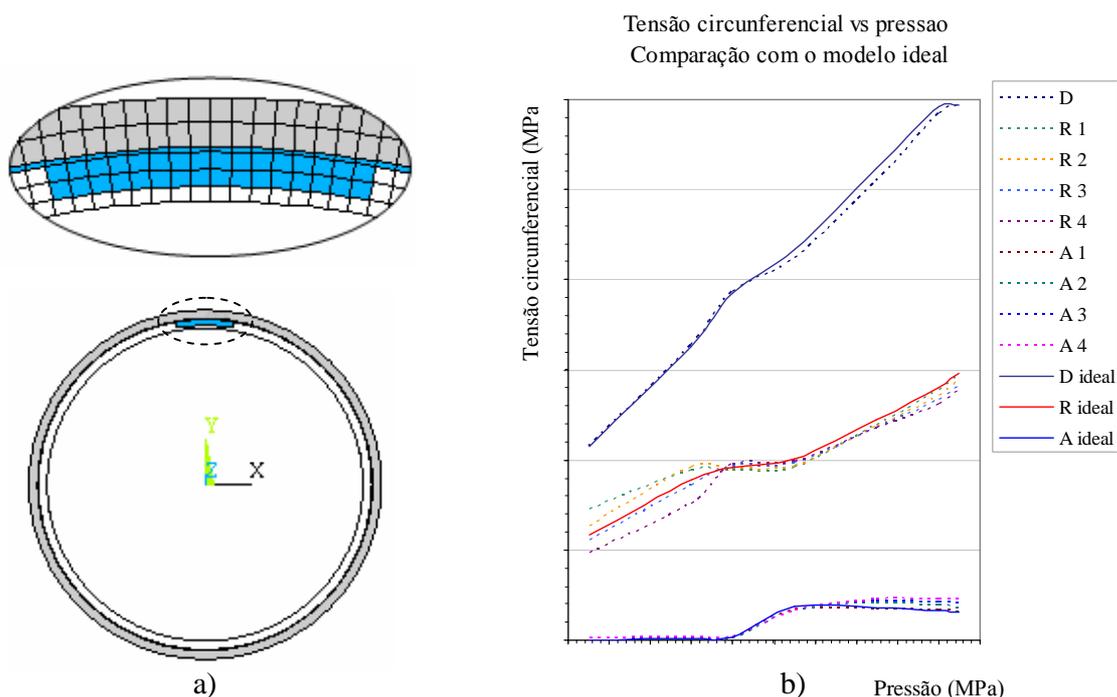


Figura 3.23 – Modelo simplificado.

Na figura 3.23.b apresenta os comportamentos do modelo simplificado e do modelo com todas as camadas metálicas, apresentando comportamentos similares. Isto se deve ao fato de que o adesivo permite o trabalho conjunto das camadas como se estas formassem um só corpo sem a influência das junções.

3.4.5

Varição do Número de Camadas Metálicas no Reparo

O reparo projetado deve ter a quantidade de camadas metálicas necessárias para garantir a integridade estrutural do duto. Faz-se a análise do desempenho do duto com reparo de uma a quatro camadas metálicas, mediante o gráfico tensão vs pressão, onde também se indica a tensão presente num duto novo sem defeito como parâmetro

de comparação. Para a análise se considera um estado plano de deformações, com pequenos deslocamentos e as propriedades indicadas na tabela 3.2 e na figura 2.7.

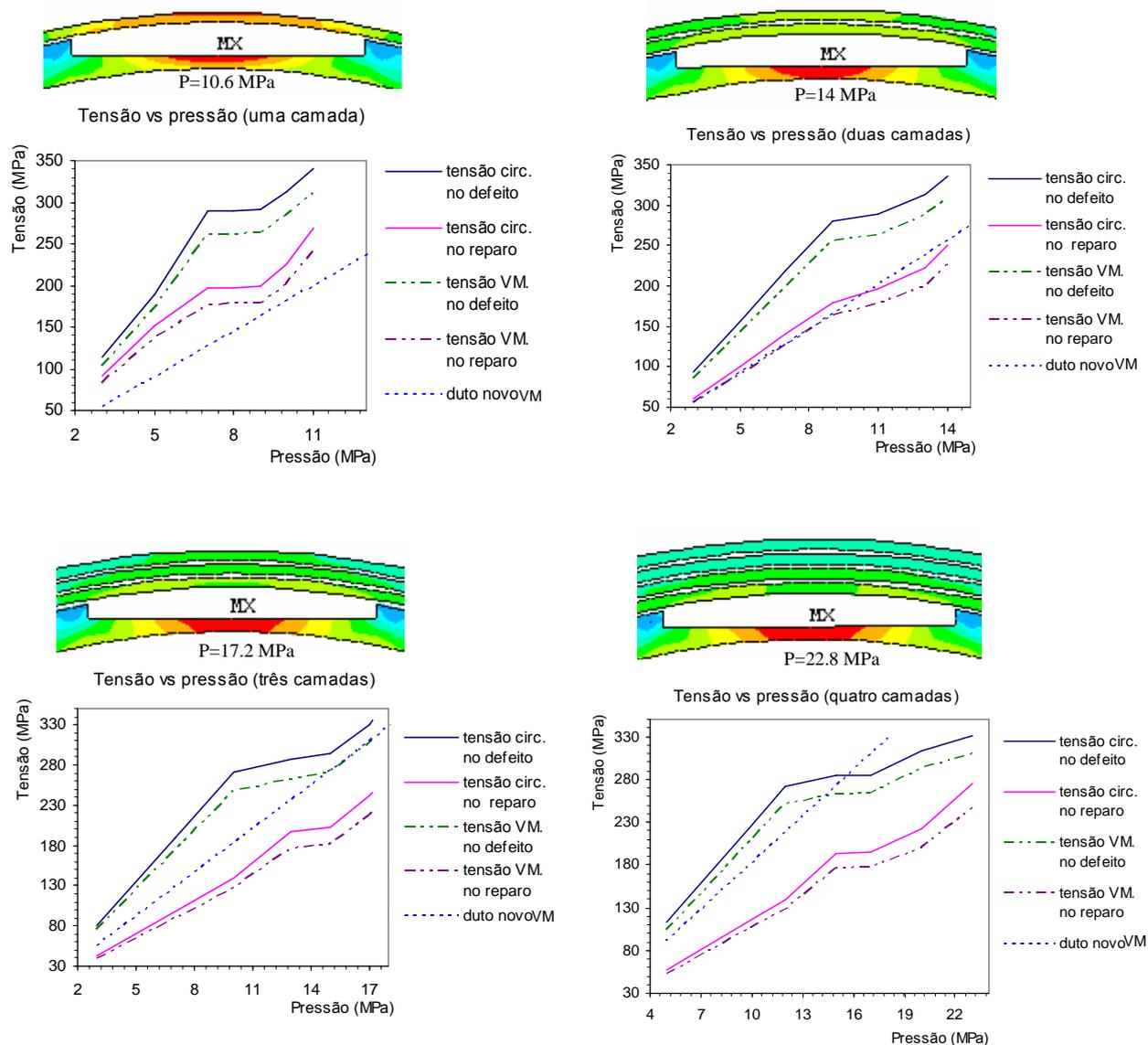


Figura 3.24 – Comportamentos nos modelos de uma, duas, três e quatro camadas com igual espessura de chapa no reparo.

O desempenho de cada modelo é achado por comparação com as tensões presentes no duto sem defeito (e sem reparo).

- O modelo com uma camada metálica falha no defeito com pressão interna de 10.6 MPa. Este reparo é insuficiente, apresentando tensões no defeito sempre maiores que as presentes na região nominal. Este modelo apresenta um comportamento similar ao mostrado na figura 3.15, onde a camada metálica plastifica antes que o duto na região do defeito.
- O modelo com duas camadas falha no defeito com uma pressão aplicada de 14 MPa, e neste caso também a espessura de reparo é pouca para evitar as grandes tensões no defeito. Neste modelo as camadas metálicas e o duto na região de defeito plastificam a uma mesma pressão interna.
- No modelo de três camadas a falha acontece no defeito com pressão interna de 17.2 MPa, mas com uma pequena diferença entre as pressões de ruptura com o duto sem defeito (a falha poderia ocorrer no tubo fora do reparo). No gráfico se pode ver que as tensões no defeito e as tensões na região sem defeito são similares, para pressões perto da pressão de ruptura. O modelo apresenta um comportamento similar ao mostrado na figura 3.18, onde o duto na região do defeito plastifica antes que as camadas metálicas (nas camadas metálicas se considerando um valor médio de tensão).
- O duto com quatro camadas é o único em que a falha acontece na região do tubo sem reparo (região nominal), com pressão interna de 18.6 MPa, já que o defeito reparado só falha com 22.8 MPa de pressão interna. Em todos os casos se considera falha quando o primeiro elemento atinge a tensão de ruptura. Neste modelo, a região do defeito do duto plastifica antes que as camadas metálicas.

É importante notar que o conceito do RFS - Fator de Resistência Remanescente (seção 2.1.4) é insuficiente para comparar o reparo de três e o reparo de quatro camadas, podendo indicar para ambos um RFS próximo a 1, já que só se compara a resistência a falha.

3.4.6

Estudo da Espessura das Camadas no Reparo

Para analisar a espessura ideal de camadas metálicas no reparo foram testados modelos com 2, 3, 4, 5 e 6 camadas metálicas, como mostrado na figura 3.25. Em todos os casos as camadas metálicas somam uma espessura equivalente de dois milímetros. A figura 3.24 indica a posição das junções circunferenciais das camadas metálicas. A primeira junção fica a 180° do defeito, e as subsequentes ficam a 90° da anterior no sentido anti-horário, sem que fique alguma junção acima do defeito (isto é, a 90° no círculo trigonométrico clássico).

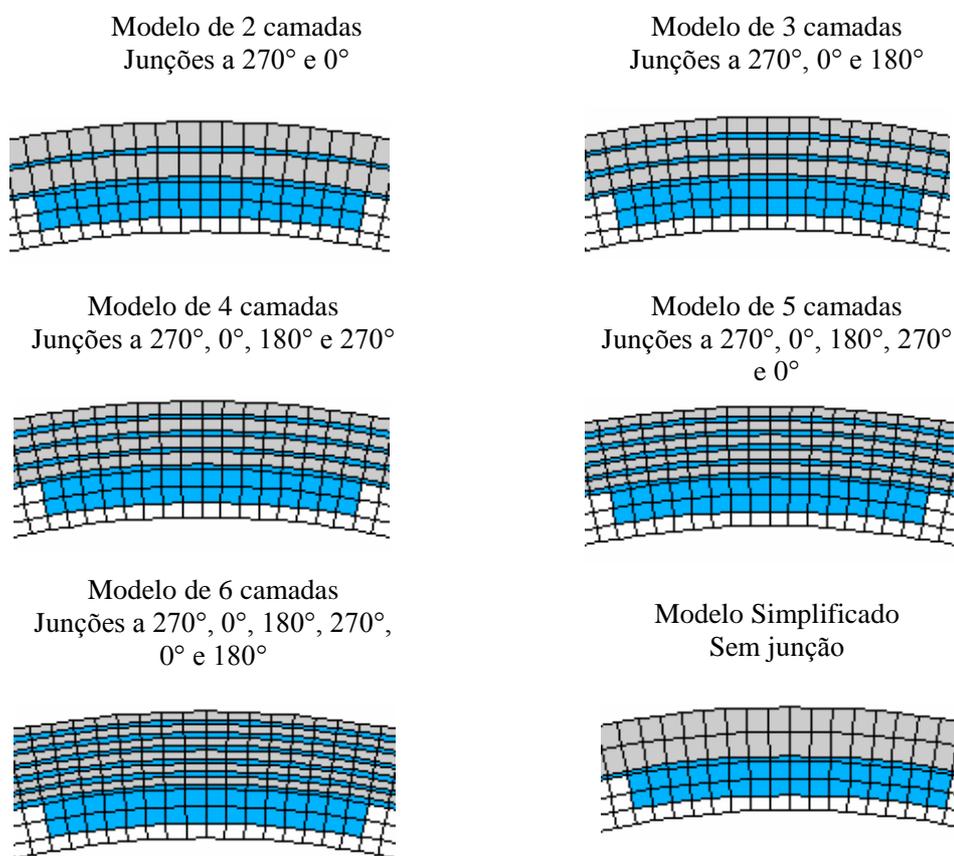


Figura 3.25 – Modelos com diferentes espessuras das camadas metálicas, com a mesma espessura equivalente de reparo em todos os modelos.

Os resultados são comparados com os resultados do modelo simplificado, o qual é considerado como o de melhor performance no controle da tensão circunferencial no defeito. O estudo da melhor espessura é feito considerando unicamente a tensão circunferencial. O estudo é feito com pressões menores que à pressão de ruptura, estando próximas à pressão de escoamento, onde as tendências das curvas são mais claras que na região plástica.

Na figura 3.26 se apresentam os resultados das tensões circunferências na região do defeito para os diferentes reparos.

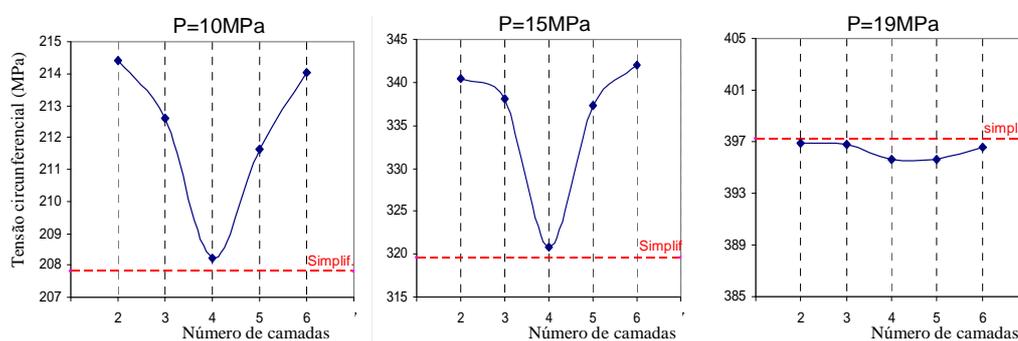


Figura 3.26 – Tensões circunferências no defeito

Pode-se observar que o reparo que tem performance mais próxima ao modelo simplificado é o duto de quatro camadas metálicas. Este comportamento foi atribuído a dois fenômenos:

- O primeiro relaciona-se com a distribuição de tensões que se apresenta em todo cilindro de parede espessa, onde na medida que alguma camada metálica fique mais afastada da parede do duto, esta suporta menos carga.
- O segundo considera o efeito que tem as junções, estas podem originar deslocamentos irregulares nas paredes do duto quando usa-se reparos com poucas camadas.

O estudo mais detalhado é mostrado no Apêndice C, mas a diferença de tensões é pequena entre cada modelo reparado, e o efeito da espessura de cada chapa metálica pode ser considerada desprezível, segundo as tensões apresentadas no defeito.

3.4.7

Estudo das Deformações no Duto Reparado

Nesta seção se mostram os resultados das deformações que o duto apresenta na região do defeito, sendo comparadas com as deformações que ocorrem na região nominal. Os resultados são obtidos do modelo 3D, com uma camada equivalente de reparo (2mm de espessura) e com uma curva multilinear para o material, cujos valores foram mostrados na tabela 3.3. O modelo considera pequenos deslocamentos e a geometria pode ser tirada das figuras 3.7 e 3.8. O modelo carregado pode ser visto na figura 3.27.

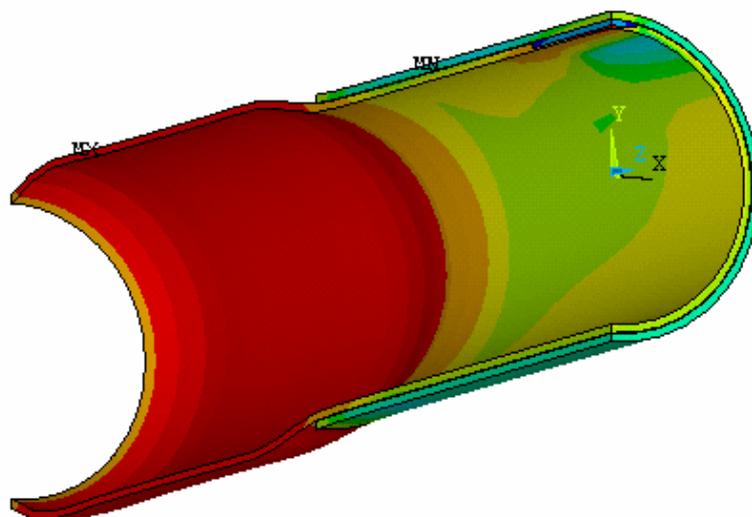


Figura 3.27 – Deformações globais no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.

Os valores das deformações são mostrados a seguir na figura 3.28.

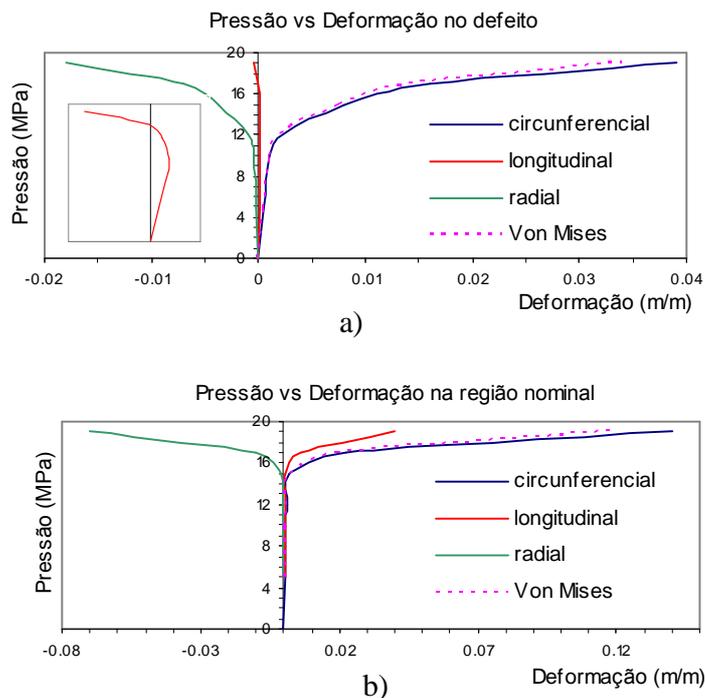


Figura 3.28 – Deformações no defeito e fora do reparo no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.

O resultados mostrados nas figuras 3.27 e 3.28 mostram que as deformações longitudinais no defeito podem ser consideradas desprezíveis, porque seus valores são pequenos em relação às deformações circunferenciais. As deformações radiais aumentam consideravelmente na região plástica, enquanto que fora do reparo, na região nominal, as deformações longitudinais não são desprezíveis tendo valores relevantes.

Pode-se apreciar dois comportamentos elasto-plásticos muito diferentes para o duto com reparo e para o duto novo sem reparo. O duto reparado perde a linearidade (limite de proporcionalidade) a uma pressão aproximada de 10 MPa e o duto novo perde a linearidade a aproximadamente 13MPa. Entretanto, o incremento das deformações elasto-plásticas para cada incremento de pressão é menor no duto reparado, comparado ao forte incremento das deformações que experimenta o duto novo ao incremento da pressão. Este comportamento é devido a plastificação sucessiva de cada componente do duto reparado.

A falha do modelo acontece na região nominal, já que em pressões próximas à ruptura (pressão de ruptura igual a 19MPa), as deformações na região nominal são maiores do que na região reparada.

3.4.8

Estudo da Tensão Cisalhante no Adesivo

Para o estudo do cortante no adesivo identificam-se regiões mais solicitadas e considera-se o estudo feito na seção 2.3, onde se discutiu a distribuição das tensões e o critério de ruptura de uma junta colada simples. O modelo tem as mesmas propriedades que a modelagem anterior.

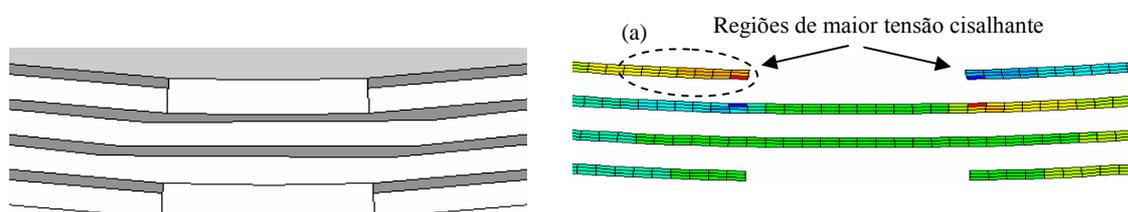


Figura 3.29 – Tensões cisalhantes no adesivo.

Na figura 3.30 mostram-se as tensões cisalhantes que se apresentam na primeira camada de adesivo (camada de adesivo mais solicitada). Pode-se ver o comportamento elasto-plástico da junta, com uma tensão cisalhante máxima de 18.4 MPa que rapidamente diminui até 3,5 MPa na maioria dos elementos no perímetro do tubo. No adesivo da primeira camada observo-se um valor de tensão cisalhante médio, muito menor do que pode suportar, (a resistência ao cisalhamento do adesivo é de 15 MPa, testado a 23°C [21]), isto devido ao grande comprimento de sobreposição desta junta colada.

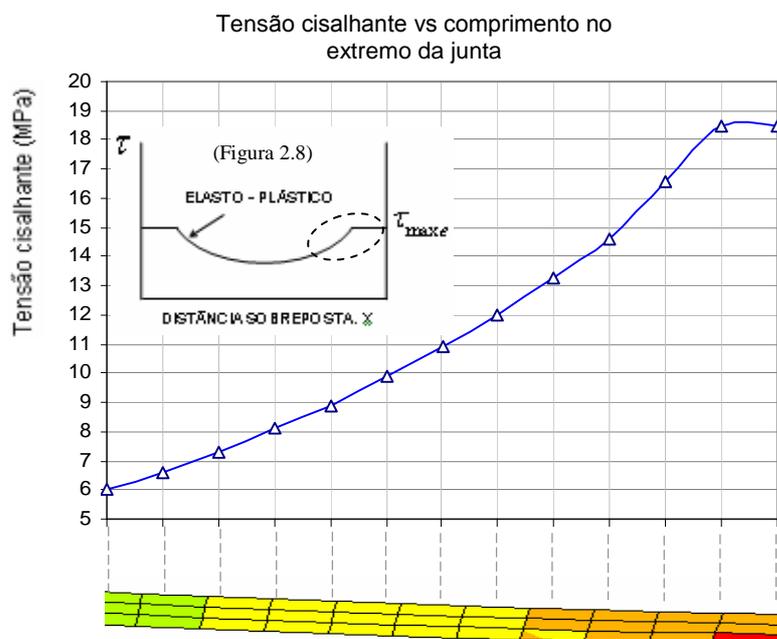


Figura 3.30 – Distribuição das tensões cisalhantes na primeira camada de adesivo.

3.4.9

Estudo das Terminações das Camadas Metálicas

Para tentar evitar a concentração de tensões no duto causada pela terminação longitudinal abrupta dos reparos, propõe-se uma terminação escalonada das camadas metálicas. Nesta seção estuda-se a terminação escalonada das camadas sendo esta comparada com a terminação abrupta, e procura-se determinar qual é a mais conveniente. Recomenda-se um estudo posterior usando grandes deslocamentos na sua modelagem, onde podem-se obter diferenças maiores nos resultados, principalmente no cálculo dos deslocamentos radiais.

Na figura 3.31 pode-se ver como se distribuem as tensões equivalentes e as deformações circunferenciais nas paredes do duto com relação aos dois tipos de acabamento das camadas de reparo, obtidas mediante um modelo axissimétrico carregado com uma pressão de 24 MPa (pressão de ruptura), e com as propriedades

indicadas na tabela 3.1 e figura 3.7. Na tabela 3.4 se mostra como variam as tensões e os deslocamentos ao incrementar a pressão interna aplicada

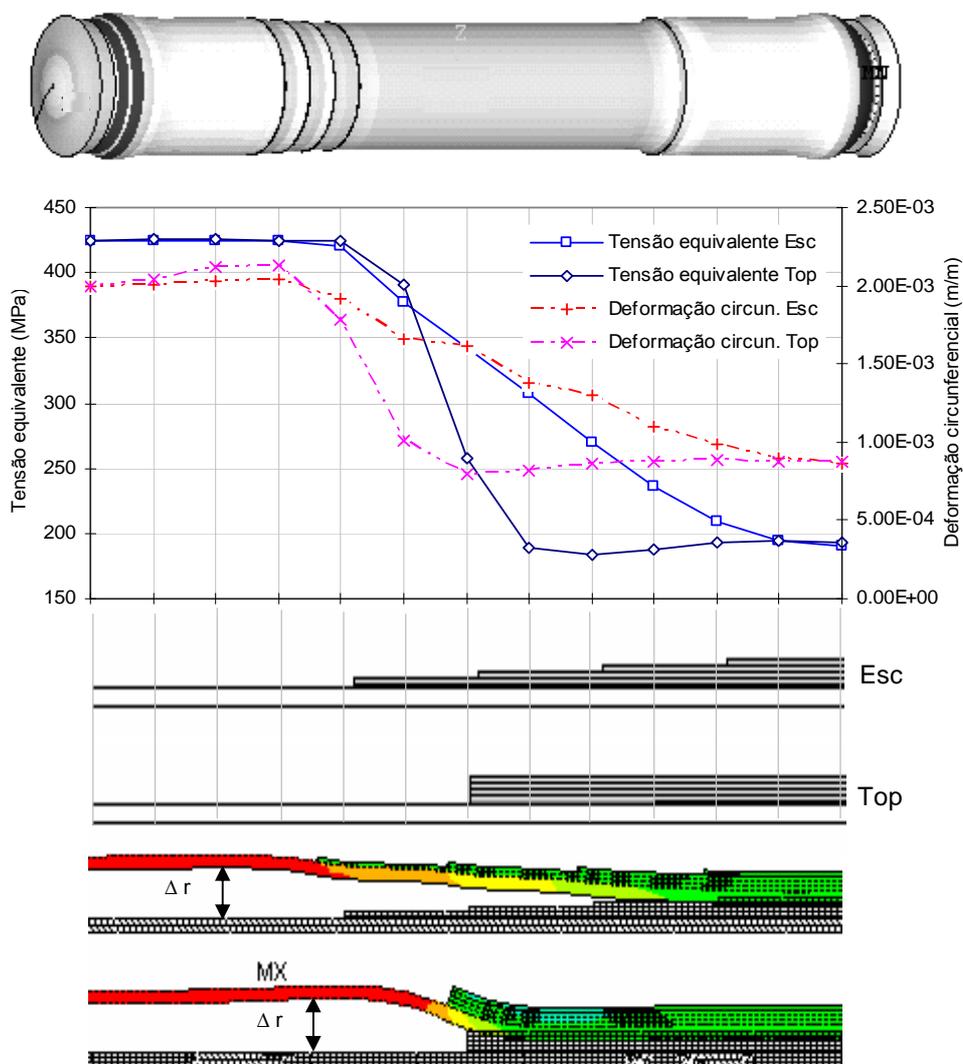


Figura 3.31 – Distribuição de tensões ao longo da parede do duto.

Tabela 3.4 – Tensões e deslocamentos radiais

Pressao (MPa)	Δ raio Esc (mm)	Δ raio Top (mm)	σ equiv. Esc (MPa)	σ equiv. Top (MPa)
10	0,0296	0,0298	170,6	170,8
15	0,044	0,045	255,8	256,9
22	0,068	0,069	387,7	390
24	1,66	1,663	402,7	402,9

A figura 3.31 e tabela 3.4 mostram que não existe diferença relevante entre as máximas tensões equivalentes e os deslocamentos radiais (Δr) entre ambas terminações. Mas, a deformação circunferencial máxima na terminação abrupta é um pouco maior (100 $\mu\text{m}/\text{m}$) que no caso da terminação escalonada, e é onde se origina a falha. Porém, como esta diferença é pequena, a determinação da melhor terminação vai ser confirmada com os testes experimentais.

3.4.10

Discussão dos Resultados Numéricos

Na determinação de um modelo numérico eficaz, se deve ter em conta a influência das possíveis simplificações ou suposições feitas na modelagem.

“Grandes Deslocamentos x Pequenos Deslocamentos”

Na seção 3.2.2 se estudou a importância do trabalho com as não linearidades nos modelos de elementos finitos e sua relação com a curva tensão vs deformação dos materiais introduzidos no programa. Encontra-se diferença entre os comportamentos só quando as pressões são próximas a pressão de ruptura. Na figura 3.32 se mostram os resultados das tensões na região do defeito para um modelo de deformação plana que considera grandes e pequenos deslocamentos, e que trabalha com as propriedades indicadas na tabela 3.1 e na figura 3.7.

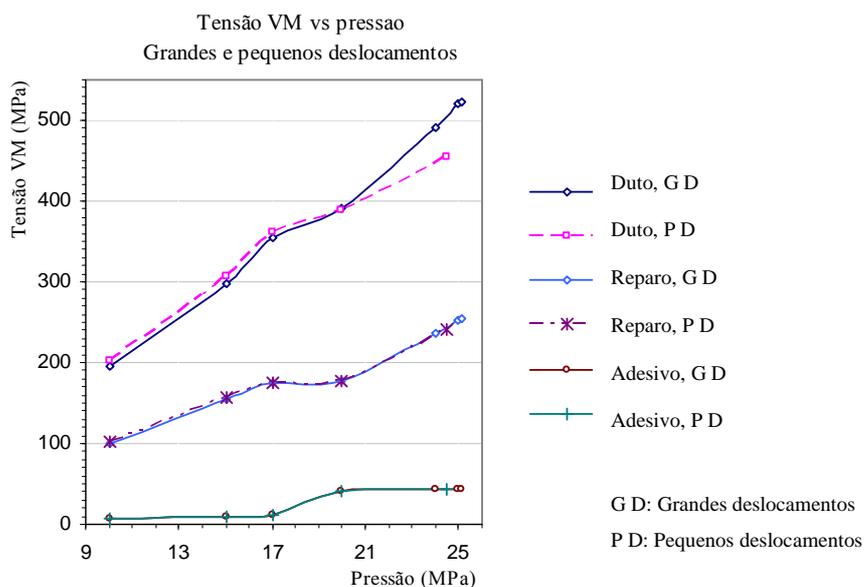


Figura 3.32 – Comparação do uso da não linearidade geométrica no duto.

Pode-se ver a pequena diferença dos comportamentos e as pressões de ruptura (diferença de 0.5MPa na pressão de ruptura entre os dois modelos). Uma diferença não tão pequena foi encontrada no estudo feito para o duto sem defeito, seção 3.2.2 (diferença de 2.7MPa).

Num duto sem defeito, a intensa redução de espessura ou estricção vai acompanhada com o aumento do diâmetro. Já num duto com defeito (dependendo da espessura remanescente de parede no defeito) a estricção da região do defeito vai acompanhada com o abaulamento desta região. Num duto com defeito reparado, esta estricção é limitada pelo reparo, fato que se utiliza para justificar a possibilidade de se trabalhar com pequenos deslocamentos e com a curva de engenharia do material na maioria dos modelos de dutos com reparo (para modelar a estricção é recomendável a utilização de grandes deslocamentos).

Uma modelagem analítica, a partir dos dados numéricos aqui apresentados e que não considera estas não linearidades, foi desenvolvida e é apresentada no próximo capítulo.

“Curvas Bilineares x Curvas Multilineares e modelos 2D x modelos 3D”

A maior parte dos resultados mostrados da seção 3.4.2 a 3.4.6, foram obtidos incluindo simplificações na sua modelagem, utilizando deformação plana e trabalhando com curvas bilineares para os materiais.

È feito um análise comparativo para determinar a influência que tem utilizar modelos 2D de deformação plana, e modelos 3D, que trabalham com dados dos materiais em curvas bilineares e curvas multilineares. Os resultados mostrados na figuras 3.33 correspondem ao duto de quatro camadas no reparo.

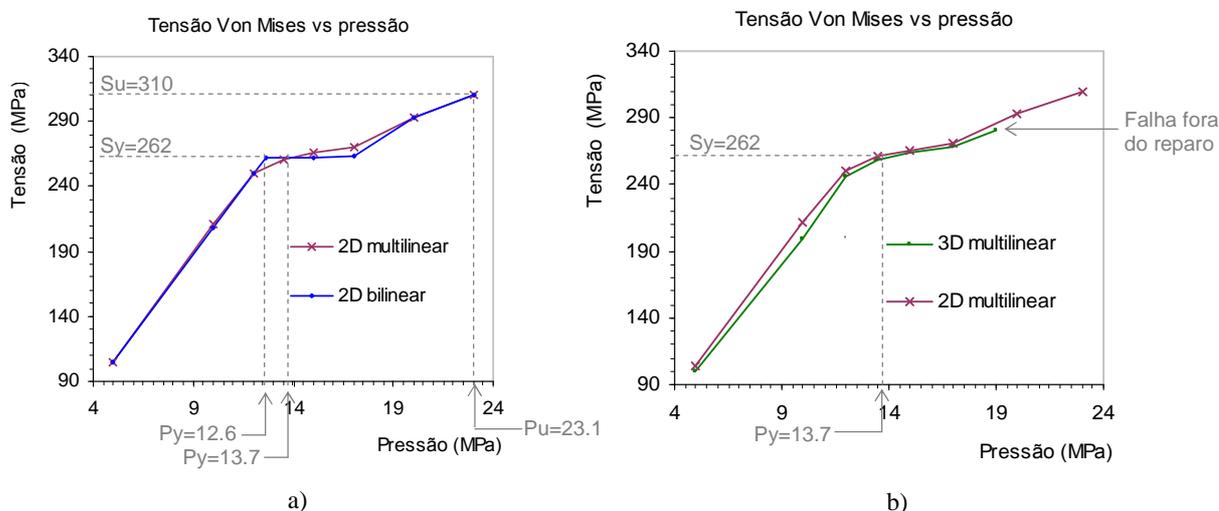


Figura 3.33 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Na figura 3.33.b, pode-se ver que os comportamentos dos modelos 2D de deformação plana e os modelos 3D são similares, ambos atingindo seu limite de escoamento sob a mesma pressão. A modelagem 3D mostra que o tubo falha fora do reparo. Então, a pressão de ruptura não pode ser comparada com o modelo 2D (isto só acontece no caso do modelo de quatro camadas, já que, é o único que rompe fora do reparo).

Na figura 3.33.a, são considerados os efeitos de se trabalhar com curvas bilineares e multilineares nos modelos 2D de deformação plana. Os comportamentos

apresentados são similares, com iguais pressões de ruptura. A diferença quando se deseja comparar as pressões que provocam a tensão de escoamento. Esta diferença se deve ao tipo de construção da curva bilinear do material, como pode se ver na figura 3.34, onde “m” e “n” representam os valores das deformações de escoamento para as curvas bilinear e multilinear respectivamente. A pressão que origina “m” vai ser menor a pressão que origine “n”, observação que se terá em conta ao comparar pressões que provocam a tensão de escoamento.

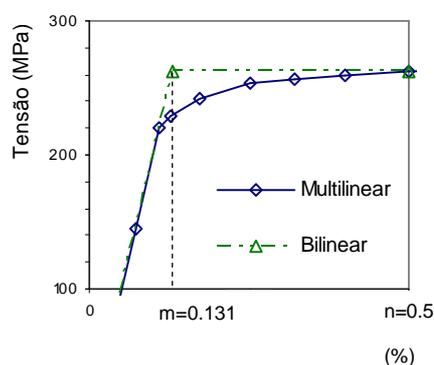


Figura 3.34 – Comparação dos materiais bilineares e multilineares.

Na figura 3.34, pode-se ver que a maior quantidade de pontos utilizados para discretizar a curva multilinear do material, que se estende desde o limite de proporcionalidade do material, até 0.5% de deformação; desta forma se obtém melhores resultados na região elasto-plástica.

Na figura 3.35 se mostra a comparação dos modelos no gráfico pressão vs deformação, onde se pode ver a discordância de resultados na região perto do escoamento.

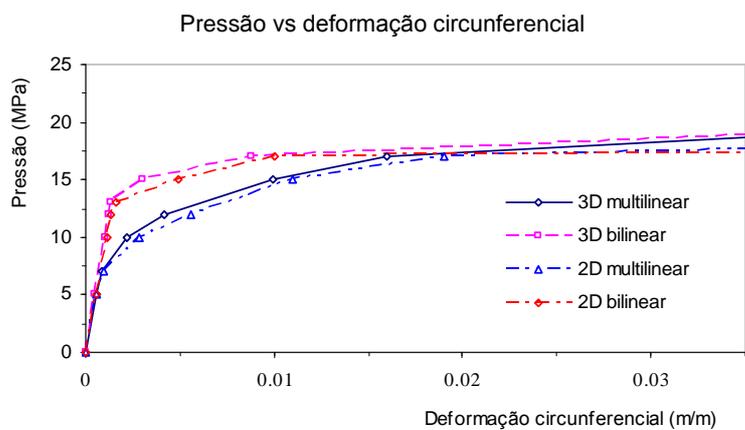


Figura 3.35 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilíneares e bilineares.

Pode-se concluir que para situações onde se requer um estudo bem detalhado do comportamento do duto, é necessário utilizar curvas multilíneares, mas, para situações de engenharia pode-se trabalhar com curvas bilineares, porque a pressão de ruptura do duto calculada com a modelagem bilinear é muito semelhante à obtida com a modelagem multilinear.

4

Modelagem Analítica

Neste capítulo apresenta-se uma metodologia simples para obter as tensões atuantes no defeito e no reparo para uma determinada pressão interna, e também determinar as pressões que ocasionaram a ruptura e o escoamento em cada componente do conjunto tubo-reparo. A aplicação do modelo desenvolvido permite dimensionar apropriadamente a espessura do reparo.

4.1

Introdução

A predição das tensões que resultam da pressão interna tem grande importância quando se quer devolver, a través de um reparo, a integridade estrutural num duto com defeito. Na maioria das equações que se tem para dutos com defeito só se pode obter a máxima pressão de operação, as quais podem ser insuficientes para determinar a qualidade do reparo.

As equações são desenvolvidas para cada uma das regiões de comportamento apresentadas no capítulo 3 (figura 3.15, entre outras). Os resultados globais são conseguidos a partir da adição dos obtidos na região anterior, conseguindo assim equações para trabalhar no regime plástico até a ruptura. Devido à utilização de um modelo de plastificação com encruamento linear para definir os materiais utilizados,

tem-se para cada deformação um determinado valor de tensão em todo o comportamento do material, alcançado-se o ponto de ruptura quando é atingida a tensão à tração do duto. As equações foram desenvolvidas considerando um modelo de reparo simplificado, isto é, com uma só camada de aço cuja espessura é equivalente à espessura total de reparo.

Devido à complexidade das equações, foi desenvolvido um programa numérico para servir como ferramenta para auxílio no cálculo das tensões e no projeto do reparo.

4.2

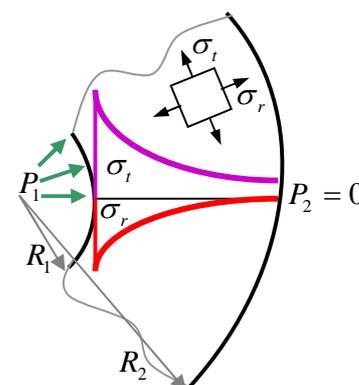
Princípios Básicos

Nesta modelagem são utilizadas equações da elasticidade para cilindros de parede espessa, para assim obter equações que descrevem o comportamento elástico do duto com reparo, as quais também são utilizadas no regime plástico devido ao modelo de encruamento linear usado, cuja eficácia vai ser corroborada no capítulo 6.

As equações utilizadas são:

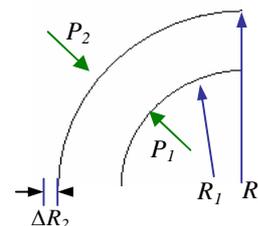
- Tensão circunferencial num duto de parede espessa [21]:

$$\sigma_t = \frac{P_1 \cdot R_1^2 \cdot \left(1 + \frac{R_2^2}{R^2}\right) - P_2 \cdot R_2^2 \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{R^2}\right)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4.1)$$



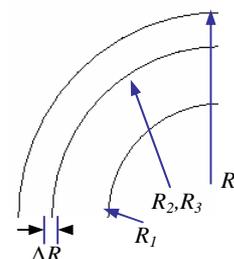
- Variação do raio externo causada pela ação de pressões interna e externa [6]:

$$\Delta R_2 = \frac{R_2}{E} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - P_2 \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu \right) \right) \quad (4.2)$$



- Pressão de interferência [21]

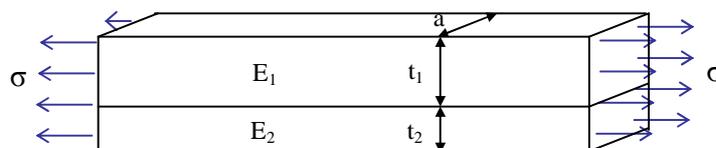
$$P_o = \frac{\frac{\Delta R}{R_2}}{\frac{1}{E_1} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_2 \right)} \quad (4.3)$$



Para se poder aplicar estas equações no cálculo dos reparos é necessário uma primeira aproximação:

Primeira Aproximação

Aproxima-se a seção circular a uma seção reta que está formada por dois materiais distintos, e se encontra o módulo de elasticidade para o conjunto.



Do equilíbrio de forças se obtém:

$$F_1 = \sigma \cdot t_1 \cdot a = \varepsilon \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot a$$

$$F_2 = \sigma \cdot t_2 \cdot a = \varepsilon \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot a$$

$$F = \sigma \cdot (t_1 + t_2) \cdot a = \varepsilon \cdot E \cdot (t_1 + t_2) \cdot a$$

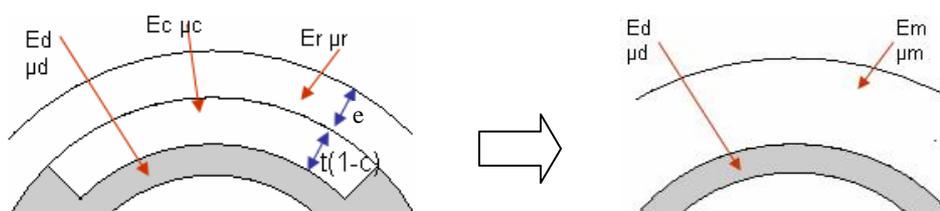
$$F = F_1 + F_2$$

$$\varepsilon \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot a + \varepsilon \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot a = \varepsilon \cdot E \cdot (t_1 + t_2) \cdot a \quad \Rightarrow \quad E = \frac{E_1 \cdot t_1 + E_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (4.4)$$

O material 2 representa o adesivo na região do defeito, e o material 1 representa a soma das camadas metálicas. A mesma aproximação é feita para achar o coeficiente de Poisson do conjunto, porém tem-se:

$$E_m = \frac{E_r \cdot e + E_c \cdot t \cdot (1 - C)}{t \cdot (1 - C) + e} \quad (4.5)$$

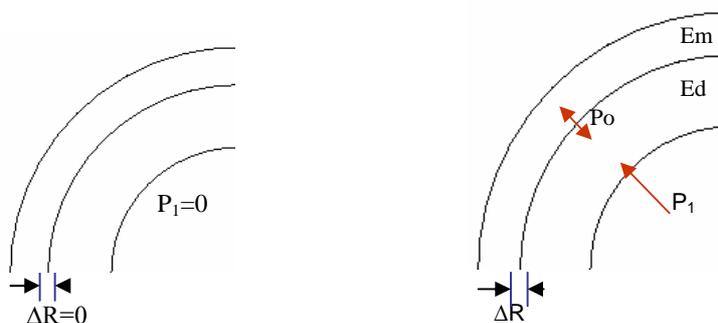
$$\mu_m = \frac{\mu_r \cdot e + \mu_c \cdot t \cdot (1 - C)}{t \cdot (1 - C) + e} \quad (4.6)$$



Nas subsequentes aproximações se utilizam as equações 4.1, 4.2 e 4.3

Segunda Aproximação

No início os dois cilindros não tem interferência. Para cada incremento de P_1 ocorre um incremento de ΔR . Logo, este incremento gera uma pressão de interferência P_0



Então da equação 4.2 para um duto com pressão interna tem-se:

$$\Delta R_2 = \Delta R = \frac{R_2}{E_d} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right)$$

Substituindo ΔR_2 na equação 4.3, encontra-se:

$$P_o = \frac{\frac{R_2}{E_d} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right)}{\frac{1}{E_d} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_d \right) + \frac{1}{E_m} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_m \right)} \quad (4.7)$$

A equação 4.1 pode ser reescrita para cilindros de parede fina sem prejuízo da

exatidão se a relação $\frac{R_1}{t} \approx \frac{R_2}{t} \approx \frac{R}{t}$ for maior que 20. Logo tem-se:

$$\sigma_t = \frac{R}{t} \cdot (P_1 - P_o) \quad (4.8)$$

Usando o valor de P_o (equação 4.7) na equação acima tem-se que:

$$\sigma_t = \frac{R}{t} \cdot \left(P_1 - \frac{\frac{1}{E_d} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right)}{\frac{1}{E_d} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_d \right) + \frac{1}{E_m} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_m \right)} \right) \quad (4.9)$$

E substituindo alguns termos:

$$R_1 = r$$

$$R_2 = r + t \cdot C$$

$$R_3 = r + t$$

$$R_4 = r + t + h$$

$$P_1 = P$$

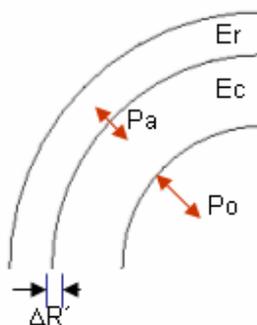
A tensão circunferencial na região corroída do tubo para um defeito com grande

comprimento, por exemplo $L > 5 \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}$, será:

$$\sigma_{\text{circ d}} = \frac{r.P}{t.C} \cdot \left[1 - \frac{\frac{2.r^2}{(r+t.C)^2 - r^2}}{\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right]} \right] \quad (4.10)$$

Terceira Aproximação

Para achar a tensão média no reparo (camadas metálicas) se trabalha de modo similar. A pressão P_o gera uma variação $\Delta R'$ (interno do reparo) que gera outra pressão entre o adesivo e o reparo.



Então a equação 4.2 neste caso fica:

$$\Delta R' = \frac{R_3}{E_c} \cdot \left(2 \cdot P_o \cdot \frac{R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \right)$$

Substituindo o valor de P_o e calculando $\Delta R'$ é possível determinar a pressão de interferência P_a entre o reparo e o adesivo:

$$P_a = \frac{4.P.r^2.(r+t.C)^2}{\left[(r+t.C)^2 - r^2 \right] \cdot \left[(r+t)^2 - (r+t.C)^2 \right] \cdot \left[\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right] \right]}{\left[\frac{(r+t)^2 + (r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2} - \mu_c \right] + \frac{E_c}{E_r} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_r \right]} \quad (4.11)$$

A tensão circunferencial no reparo pode ser determinada através da equação 4.1 para duto de parede delgada onde atua a pressão Pa:

$$\sigma_{circ r} = \frac{\left(r+t+\frac{h}{2} \right) \cdot P}{h} \cdot \left[\frac{4.r^2.(r+t.C)^2}{\left[(r+t.C)^2 - r^2 \right] \cdot \left[(r+t)^2 - (r+t.C)^2 \right] \cdot \left[\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right] \right]}{\left[\frac{(r+t)^2 + (r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2} - \mu_c \right] + \frac{E_c}{E_r} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_r \right]} \right] \quad (4.12)$$

4.3

Tensões Equivalentes nos Regimes Elástico e Plástico

As equações desenvolvidas anteriormente podem ser usadas para prever as tensões na região do defeito, achar a espessura necessária para um reparo e também analisar o comportamento do duto com reparo, tal como definido pelas regiões elasto-plásticas identificadas no capítulo 3 (figura 3.14 e 3.18).

Este modelo pretende identificar as pressões que provocam o escoamento e também a ruptura de um duto com reparo. Como os estados de tensão nos casos de dutos reais são estados multiaxiais, estes estados de tensão devem ser convertidos em estados uniaxiais equivalentes de tensões, para permitir a sua comparação com as propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Com esta finalidade, se usa o

critério de von Mises. Na figura 4.1 se mostra de maneira qualitativa os estados de tensões e deformações num elemento diferencial na região do defeito.

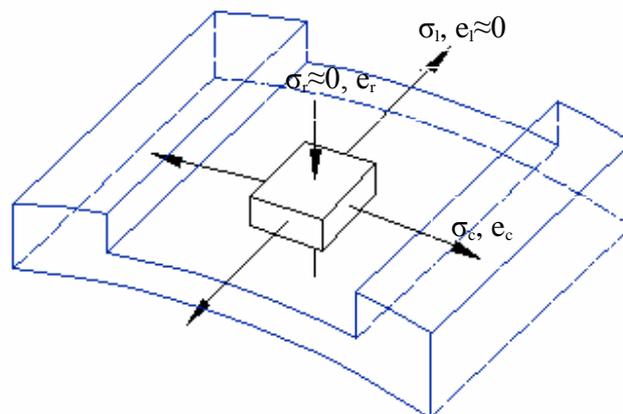


Figura 4.1 – Estado de tensões e deformações num ponto do defeito

Considera-se a deformação longitudinal igual a zero. Isto acontece porque a parte do duto sem defeito e a espessura de reparo utilizado fazem com que a região do defeito tenha deformações longitudinais muito pequenas quando comparadas às deformações circunferenciais (as regiões com e sem defeito do duto devem ter aproximadamente deformações longitudinais iguais). A tensão radial pode ser considerada desprezível se comparada à tensão circunferencial se o duto for de parede fina. Estas aproximações foram corroboradas pelos resultados experimentais e numéricos apresentadas nos capítulos 3 e 5 respectivamente.

Para a região do defeito no regime elástico tem-se:

$$e_l = \frac{1}{E}(\sigma_l - \mu\sigma_c - \mu\sigma_r) \text{ com: } e_l \approx 0 \text{ e } \sigma_r \approx 0$$

$$\text{Então: } \sigma_l \approx \mu\sigma_c$$

A equação de von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_l^2 + \sigma_r^2 - \sigma_c \cdot \sigma_r - \sigma_c \cdot \sigma_l - \sigma_l \cdot \sigma_r}$$

Fica reduzida a:

$$\sigma_{eq} = \sigma_c \sqrt{1 + \mu^2 - \mu} \tag{4.12}$$

Tal consideração vai ser utilizada também para encontrar as tensões equivalentes elásticas presentes no reparo e no adesivo na região do defeito.

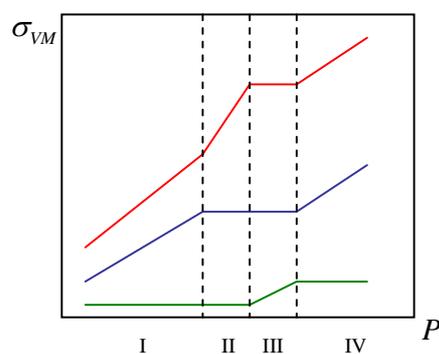
O calculo complica-se quando se quer calcular a tensão equivalente de Mises na região plástica, pelo que a partir da tensão de escoamento, utiliza-se o critério de Tresca para o cálculo da tensão equivalente.

4.4

Aplicação das Equações nas Regiões Elásticas e Elasto-Plásticas do Comportamento do Sistema Duto-Reparo

O estudo foi dividido em duas possibilidades no que tange o comportamento das tensões. A primeira é quando o reparo plastifica primeiro que o duto. A outra ocorre quando o duto plastifica antes do reparo. Nos dois casos se agrupam as constantes para formarem variáveis (variáveis 1). Estas variáveis 1 são também agrupadas para formar um novo grupo de variáveis (variáveis 2) dependendo da região de comportamento encontrada (I até IV), com o fim de simplificar a formulação.

a) Reparo plastifica primeiro



Variáveis 1: Dividem-se em variáveis para os coeficientes de Poisson, módulos de elasticidade e variáveis geométricas.

Coefficientes de Poisson nas regiões:

$$\mu_m := \frac{\mu_r \cdot e + \mu_c \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os μ do reparo e do adesivo, ambos no estado elástico (Região I)

$$\mu_{pm1} := \frac{\mu_{pr} \cdot e + \mu_c \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os μ do reparo no estado plástico e do adesivo no estado elástico (Região II)

$$\mu_{pm2} := \frac{\mu_{pr} \cdot e + \mu_{pc} \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os μ do reparo e do adesivo, ambos no estado plástico (Região III e IV)

*Neste caso a palavra “reparo” significa “camadas metálicas”.

Módulos de Elasticidade nas regiões:

$$E_m := \frac{E_r \cdot e + E_c \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os E do reparo e do adesivo, ambos no estado elástico (Região I)

$$E_{m1} := \frac{E_{pr} \cdot e + E_c \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os E do reparo no estado plástico e do adesivo no estado elástico (Região II)

$$E_{m2} := \frac{E_{pr} \cdot e + E_{pc} \cdot t \cdot (1 - C)}{e + t \cdot (1 - C)}$$

Relaciona os μ do reparo e do adesivo, ambos no estado plástico (Região III e IV)

Constantes geométricas:

$$a1 := 2 \cdot \frac{r^2}{(r + t \cdot C)^2 - r^2}$$

$$a2 := \frac{(r + t \cdot C)^2 + r^2}{(r + t \cdot C)^2 - r^2}$$

$$a3 := \frac{(r + t + e)^2 + (r + t \cdot C)^2}{(r + t + e)^2 - (r + t \cdot C)^2}$$

$$a4 := 2 \cdot \frac{(r + t \cdot C)^2}{(r + t)^2 - (r + t \cdot C)^2}$$

$$a5 := \frac{(r + t)^2 + (r + t \cdot C)^2}{(r + t)^2 - (r + t \cdot C)^2}$$

$$a6 := \frac{(r + t + e)^2 + (r + t)^2}{(r + t + e)^2 - (r + t)^2}$$

Variáveis 2: São as combinações das variáveis 1

Para a região I, onde o duto e a “combinação” reparo-adesivo trabalham no estado elástico.

$$A := \frac{a1}{a2 - \mu d + \left(\frac{E_d}{E_m} \right) \cdot (a6 + \mu m)}$$

$$B := \frac{a4}{a5 - \mu c + \left(\frac{E_c}{E_r} \right) \cdot (a6 + \mu r)}$$

Para a região II, onde o duto e o adesivo trabalham no regime elástico e o reparo trabalha plasticamente.

$$A1 := \frac{a1}{a2 - \mu d + \left(\frac{E_d}{E_{m1}} \right) \cdot (a6 + \mu p m1)}$$

$$B1 := \frac{a4}{a5 - \mu c + \left(\frac{E_c}{E_{pr}} \right) \cdot (a6 + \mu pr)}$$

Para a região III, onde o duto e o reparo trabalham plasticamente, enquanto que o adesivo continua trabalhando elasticamente

$$A2 := \frac{a1}{a2 - \mu p d + \left(\frac{E_{pd}}{E_{m1}} \right) \cdot (a6 + \mu p m1)}$$

$$B2 := \frac{a4}{a5 - \mu p c + \left(\frac{E_{pc}}{E_{pr}} \right) \cdot (a6 + \mu pr)}$$

Para a região IV, onde todos os componentes trabalham no regime plástico.

$$A3 := \frac{a1}{a2 - \mu_{pd} + \left(\frac{E_{pd}}{E_{m2}} \right) \cdot (a3 + \mu_{pm2})}$$

A seguir são definidos os limites das regiões e as tensões de Von Mises no duto, reparo e adesivo. Os limites são as pressões que originam a plastificação de algum dos componentes da estrutura.

- **Região I:** No intervalo

$$0 \leq P \leq P_{y1}$$

Onde:

$$P_{y1} := \frac{S_{yr} \cdot e}{(r + t) \cdot A \cdot B \cdot \sqrt{1 + \mu_r^2 - \mu_r}} \quad \text{Pressão que origina a plastificação do reparo}$$

Para $P=P1$ no intervalo, se tem as tensões equivalentes em cada componente:

$$\sigma_{eq_dI}(P1) := \frac{r}{t \cdot C} \cdot P1 \cdot (1 - A) \cdot \sqrt{1 + \mu_d^2 - \mu_d}$$

$$\sigma_{eq_rI}(P1) := \frac{r + t}{e} \cdot P1 \cdot A \cdot B \cdot \sqrt{1 + \mu_r^2 - \mu_r}$$

$$\sigma_{eq_cI}(P1) := \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot P1 \cdot A \cdot (1 - B) \cdot \sqrt{1 + \mu_c^2 - \mu_c}$$

- **Região II:** Fica no intervalo

$$P_{y1} < P \leq P_{y2}$$

Onde:

$$P_{y2} := \frac{\frac{t \cdot C}{r} \cdot \frac{S_{yd}}{\sqrt{1 + \mu_d^2 - \mu_d}} + P_{y1} \cdot (A - A1)}{1 - A1} \quad \text{Pressão que origina a plastificação do duto no defeito}$$

Para $P=P2$ no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dII}(P2) := [P_{yr} \cdot (1 - A) + (P2 - P_{yr}) \cdot (1 - A1)] \frac{r}{t \cdot C} \cdot \sqrt{1 + \mu d^2 - \mu d}$$

$$\sigma_{eq_rII}(P2) := S_{yr} + \frac{r + t}{e} \cdot (P2 - P_{yr}) \cdot A1 \cdot B1$$

$$\sigma_{eq_cII}(P2) := [P_{yr} \cdot A \cdot (1 - B) + (P2 - P_{yr}) \cdot A1 \cdot (1 - B1)] \cdot \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot \sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}$$

- **Região III:** Fica no intervalo

$$P_{yd} < P \leq P_{yc}$$

Onde:

$$P_{yc} := \frac{\frac{t \cdot (1 - C)}{r + t \cdot C} \cdot \frac{S_{yc}}{\sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}} - P_{yr} \cdot A \cdot (1 - B) - (P_{yd} - P_{yr}) \cdot A1 \cdot (1 - B1)}{A2 \cdot (1 - B1)} + P_{yd}$$

Pressão que origina a plastificação do adesivo

Para $P=P3$ no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dIII}(P3) := S_{yd} + \frac{r}{t \cdot C} \cdot (P3 - P_{yd}) \cdot (1 - A2)$$

$$\sigma_{eq_rIII}(P3) := S_{yr} + [(P_{yd} - P_{yr}) \cdot A1 \cdot B1 + (P3 - P_{yd}) \cdot A2 \cdot B1] \cdot \frac{r + t}{e}$$

$$\sigma_{eq_cIII}(P3) := [P_{yr} \cdot A \cdot (1 - B) + (P_{yd} - P_{yr}) \cdot A1 \cdot (1 - B1) + (P3 - P_{yd}) \cdot A2 \cdot (1 - B1)] \cdot \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot \sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}$$

- **Região IV:** Fica no intervalo

$$P_{yc} < P \leq P_{ud}$$

Onde:

$$P_{ud} := \frac{(\sigma_{ud} - \sigma_{yd}) \cdot \frac{t \cdot C}{r} - (P_{yc} - P_{yd}) \cdot (1 - A_2)}{1 - A_3} + P_{yc} \quad \text{Pressão de ruptura do duto no defeito}$$

Para $P=P_4$ no intervalo, tem-se:

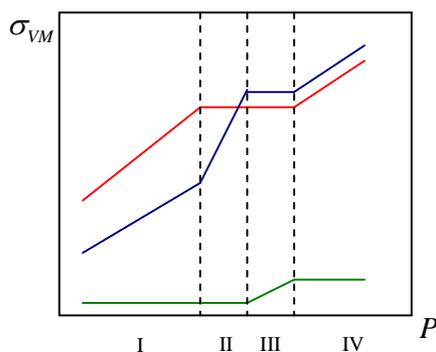
$$\sigma_{eq_dIV}(P_4) := \sigma_{yd} + [(P_{yc} - P_{yd}) \cdot (1 - A_2) + (P_4 - P_{yc}) \cdot (1 - A_3)] \cdot \frac{r}{t \cdot C}$$

$$\sigma_{eq_rIV}(P_4) := \sigma_{yr} + [(P_{yd} - P_{yr}) \cdot A_1 \cdot B_1 + (P_{yc} - P_{yd}) \cdot A_2 \cdot B_1 + (P_4 - P_{yc}) \cdot A_3 \cdot B_2] \cdot \frac{r + t}{e}$$

$$\sigma_{eq_cIV}(P_4) := \sigma_{yc} + \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot (P_4 - P_{yc}) \cdot A_3 \cdot (1 - B_2)$$

b) Duto plastifica primeiro

O procedimento de cálculo nesta seção é similar a anterior



As Variáveis 1 são iguais em ambos os casos, e as Variáveis 2 têm pouca variação.

Variáveis 2: Trabalha-se com novas variáveis onde $M=A$, $M_1 \neq A_1$, $M_2=A_2$, $M_3=A_3$, $N=B$, $N_1=B_1$, $N_2=B_2$, então:

Para a região II, onde o duto trabalha no regime plástico e a combinação reparo-adesivo trabalha no regime elástico.

$$M1 := \frac{a1}{a2 - \mu p d + \left(\frac{E p d}{E m} \right) \cdot (a6 + \mu m)}$$

Definem-se os limites das regiões

- **Região I:** No intervalo

$$0 \leq P \leq P_{yd}$$

Onde:

$$P_{yd} := \frac{S_{yd} \cdot t \cdot C}{r \cdot (1 - M) \cdot \sqrt{1 + \mu d^2} - \mu d}$$

Para $P=P1$ no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dI}(P1) := \frac{r}{t \cdot C} \cdot P1 \cdot (1 - M) \cdot \sqrt{1 + \mu d^2} - \mu d$$

$$\sigma_{eq_rI}(P1) := \frac{r + t}{e} \cdot P1 \cdot M \cdot N \cdot \sqrt{1 + \mu r^2} - \mu r$$

$$\sigma_{eq_cI}(P1) := \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot P1 \cdot M \cdot (1 - N) \cdot \sqrt{1 + \mu c^2} - \mu c$$

- **Região II:** No intervalo

$$P_{yd} < P \leq P_{yr}$$

Onde:

$$P_{yr} := \frac{S_{yr} \cdot e}{(r + t) \cdot M1 \cdot N \cdot \sqrt{1 + \mu r^2} - \mu r} - \frac{P_{yd} \cdot (M - M1)}{M1}$$

Para $P=P2$ no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dII}(P2) := S_{yd} + (P2 - P_{yd}) \cdot (1 - M1) \cdot \frac{r}{t \cdot C}$$

$$\sigma_{eq_rII}(P2) := \frac{r+t}{e} \cdot N \cdot [P_{yd} \cdot (M - M1) + P2 \cdot M1] \cdot \sqrt{1 + \mu r^2 - \mu r}$$

$$\sigma_{eq_cII}(P2) := \frac{r+t \cdot C}{t \cdot (1-C)} \cdot (1-N) \cdot [P_{yd} \cdot M + (P2 - P_{yd}) \cdot M1] \cdot \sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}$$

- **Região III:** No intervalo

$$P_{yr} < P \leq P_{yc}$$

Onde:

$$P_{yc} := \left[\frac{S_{yc} \cdot t \cdot (1-C)}{(r+t \cdot C) \cdot \sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}} - (1-N) \cdot [P_{yd} \cdot (M - N1) + P_{yr} \cdot M1] \right] \cdot \frac{1}{M2 \cdot (1-N1)} + P_{yr}$$

Para P=P3 no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dIII}(P3) := S_{yd} + \frac{r}{t \cdot C} \cdot [(P_{yr} - P_{yd}) \cdot (1 - M1) + (P3 - P_{yr}) \cdot (1 - M2)]$$

$$\sigma_{eq_rIII}(P3) := S_{yr} + \frac{r+t}{e} \cdot (P3 - P_{yr}) \cdot M2 \cdot N1$$

$$\sigma_{eq_cIII}(P3) := \frac{r+t \cdot C}{t \cdot (1-C)} \cdot [(1-N) \cdot [P_{yd} \cdot (M - M1) + P_{yr} \cdot M1] + (P3 - P_{yr}) \cdot M2 \cdot (1 - N1)] \cdot \sqrt{1 + \mu c^2 - \mu c}$$

- **Região IV:** No intervalo

$$P_{yc} < P \leq P_{ud}$$

Onde:

$$P_{ud} := \frac{(S_{ud} - S_{yd}) \cdot \frac{t \cdot C}{r} - (P_{yr} - P_{yd}) \cdot (1 - M1) - (P_{yc} - P_{yr}) \cdot (1 - M2)}{1 - M3} + P_{yc}$$

Para P=P4 no intervalo, tem-se:

$$\sigma_{eq_dIV}(P4) := S_{yd} + \frac{r}{t \cdot C} \cdot [(P_{yr} - P_{yd}) \cdot (1 - M1) + (P_{yc} - P_{yr}) \cdot (1 - M2) + (P4 - P_{yc}) \cdot (1 - M3)]$$

$$\sigma_{eq_rIV}(P4) := S_{yr} + \frac{r+t}{e} \cdot [(P_{yc} - P_{yr}) \cdot M2 \cdot N1 + (P4 - P_{yc}) \cdot M3 \cdot N2]$$

$$\sigma_{eq_cIV}(P4) := S_{yc} + \frac{r + t \cdot C}{t \cdot (1 - C)} \cdot (P4 - P_{yc}) \cdot M3 \cdot (1 - N2)$$

Duas condições são impostas para saber quem alcança a plastificação primeiro:

- Se $P_{yd} \geq P_{yr} \rightarrow$ Reparo plastifica primeiro.
- Se $P_{yr} > P_{yd} \rightarrow$ Duto plastifica primeiro.

Onde:

$$P_{yr} := \frac{S_{yr} \cdot e}{(r + t) \cdot A \cdot B \cdot \sqrt{1 + \mu r^2} - \mu r} \quad P_{yd} := \frac{S_{yd} \cdot t \cdot C}{r \cdot (1 - M) \cdot \sqrt{1 + \mu d^2} - \mu d}$$

4.5

Programa para a Aplicação da Modelagem Analítica

Desenvolveu-se um programa que permite a utilização da modelagem matemática, mediante o qual pode-se determinar o comportamento das tensões e as pressões que provocam o escoamento e a ruptura no duto. Pode-se também, mediante a comparação com o desempenho de um duto sem defeito, encontrar a espessura apropriada para o reparo. Utilizando o equilíbrio de forças, propõe-se uma equação simples para pré definir a espessura mínima do reparo requerido, a qual é utilizada para ter uma referência da espessura de reparo que se deve ingressar no programa:

$$\frac{P \cdot D}{2} = S_{ud} \cdot (t - h) + S_{ur} \cdot e_{aprox} \quad \text{então temos que:} \quad e_{aprox} = \frac{S_{ud} \cdot h}{S_{ur}} \quad (4.13)$$

onde h é a profundidade do defeito.

Na figura 4.2 se mostra a interface do programa.

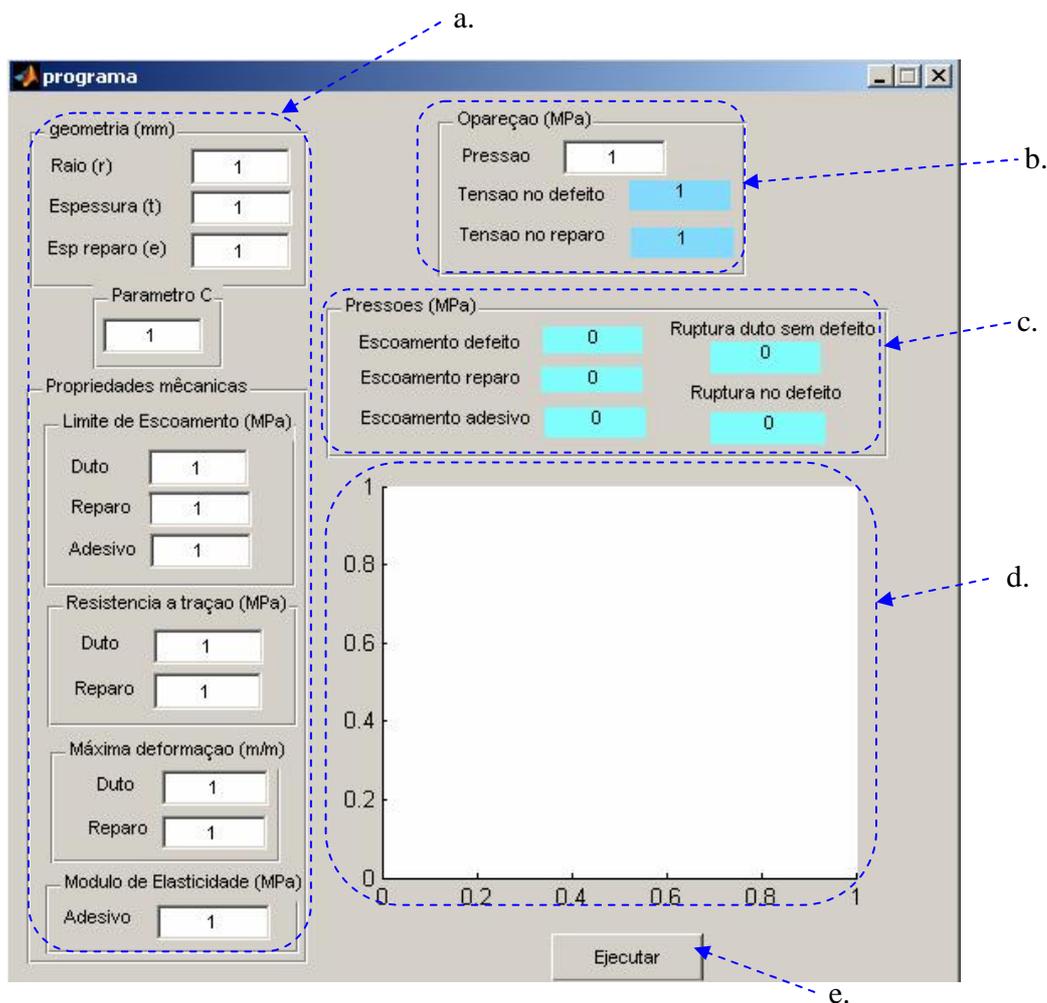
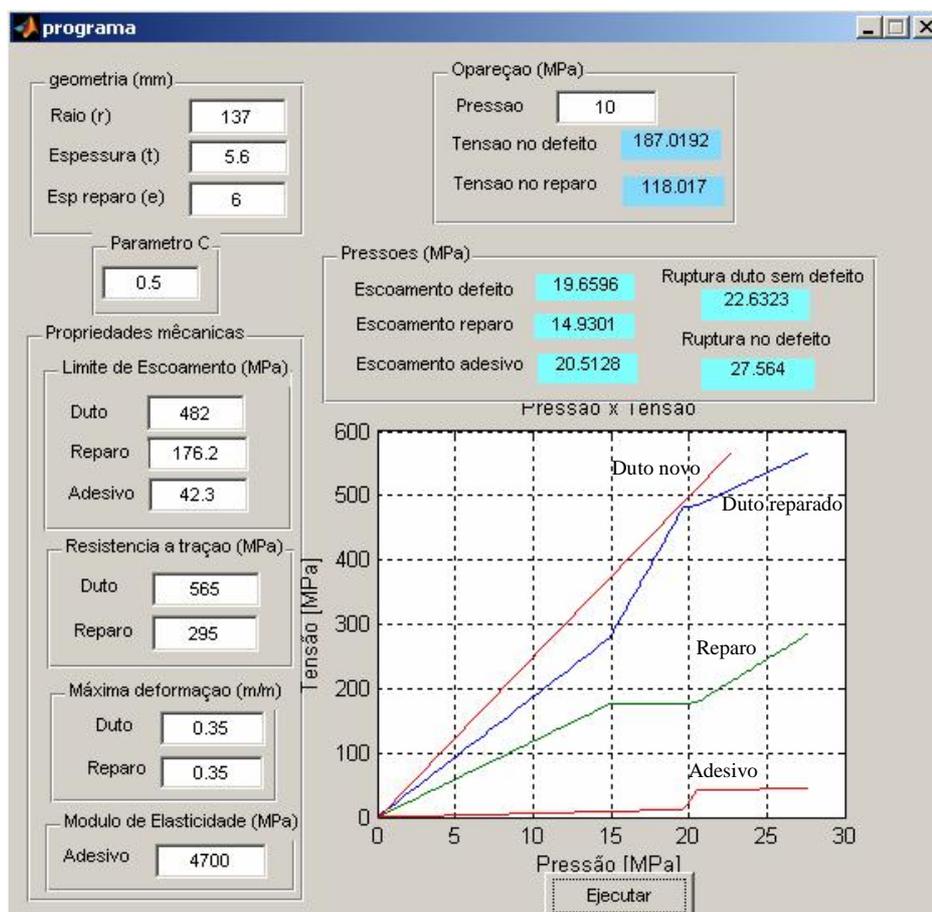


Figura 4.2 - Area da interface do programa

- Entrada dos dados da geometria, propriedades mecânicas e o parâmetro C, que pode ser calculado com as equações da tabela 2.1. O dado da espessura do reparo (e) pode ser pré calculado com a equação 4.13.
- Área dos dados e resultados de operação. Ingressa-se alguma pressão de operação e se obtêm os valores de tensão equivalente no defeito e no reparo, as quais são importantes para avaliar o reparo ou recalculer a pressão de operação.

- c. Obtem-se as pressões que delimitam o comportamento do reparo e uma aproximada pressão de ruptura de um duto sem reparo achada pelo critério de Tresca.
- d. Área do gráfico tensão vs pressão
- e. Executa o programa.



*Duto API 5L X70

Figura 4.3 – Resultados no programa

Na figura 4.3 são mostrados os resultados e o comportamento do duto API 5L X70 reparado, com o qual se pode projetar o reparo requerido mediante a comparação com o comportamento de um duto sem defeito.

5

Abordagem Experimental e seus Resultados

Neste capítulo descreve-se o procedimento para o teste de oito espécimes tubulares e se faz a análise dos resultados.

5.1

Introdução

Foram testados oito espécimes tubulares, cinco dos quais foram reparados utilizando multicamadas metálicas coladas. Nestes foram usinados defeitos para simular perda de espessura. Vale dizer que em todos os espécimes reparados o defeito tem a mesma geometria, mas muda-se o número de camadas e o material usado nos reparos.

Mediante os resultados obtidos experimentalmente pode-se avaliar o estudo feito nos capítulos 3 e 4, e ao mesmo tempo corroborar a eficácia do método de reparo proposto.

Com a instrumentação dos espécimes ensaiados e a determinação experimental de variáveis tais como deformações, pressões e variações volumétricas, pode-se comparar resultados e tentar otimizar o método de reparo. Para isto, foi indispensável a caracterização dos materiais utilizados. Esta caracterização é feita mediante ensaios de tração de corpos de prova retirados dos tubos e das chapas de reforço. Também foram analisados os tipos de falhas acontecidas nos espécimes reparados.

No Apêndice D propôs-se uma metodologia para o cálculo das tensões equivalentes na região do defeito, para um duto reparado, a partir das deformações circunferências medidas experimentalmente.

5.2

Preparação e Instrumentação dos Espécimes Tubulares

As etapas para a preparação dos espécimes tubulares reparados são descritas a seguir:

a. Fabricação dos Espécimes Tubulares:

Os tubos dos espécimes tubulares foram cortados em comprimentos iguais a 600mm de uma única vara com comprimento total de 6m e 3” de diâmetro. A caracterização do material da vara é mostrada no Apêndice B. A usinagem dos defeitos foi feita mediante a operação de fresagem com uma profundidade máxima nominal igual a 1.4mm, deixando nos defeitos espessuras de parede remanescentes iguais a 0.6mm. A fresagem foi feita a 180° da solda longitudinal de fechamento do tubo. Na figura são apresentadas as dimensões dos espécimes, bem como as dimensões dos tampos planos que foram soldados aos tubos.

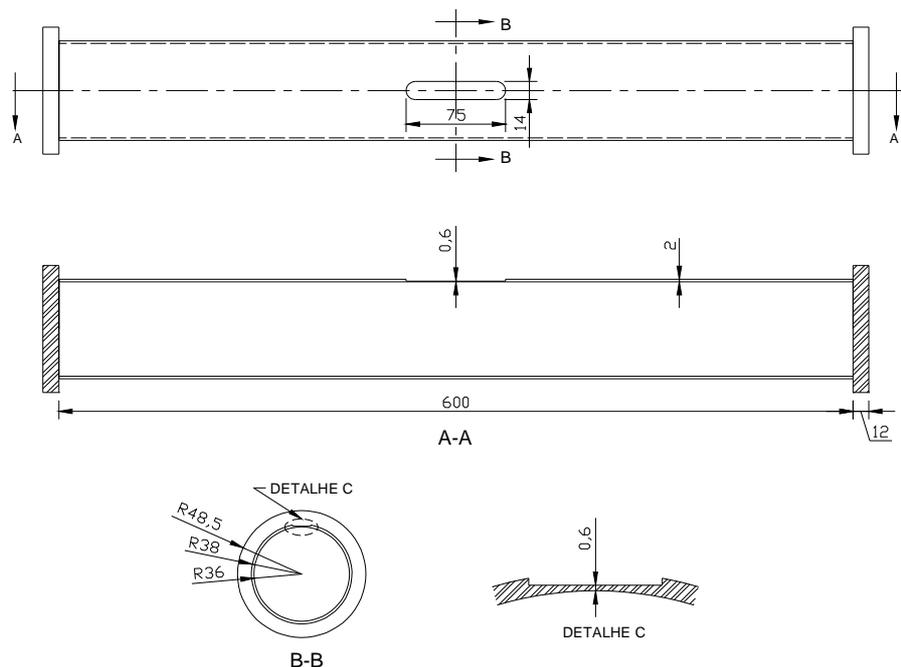


Figura 5.1 - Dimensões dos espécimes tubulares

Na tabela a seguir se indicam os espécimes que foram testados neste trabalho:

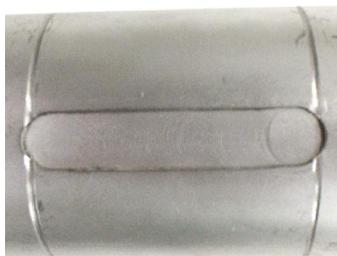
Tabela 5.1 Espécimes testados

Espécime	Descrição
DRC 001	Duto sem defeito nem reparo
DRC 002	Duto sem defeito nem reparo
DRC 003	Duto com defeito e uma camada de reparo
DRC 004	Duto com defeito e duas camadas de reparo
DRC 005	Duto com defeito e três camadas de reparo
DRC 006	Duto com defeito e quatro camadas de reparo
DRC 007	Duto com defeito e sem reparo
DRC 008	Duto com defeito e duas camadas de aço inox 304 de reparo

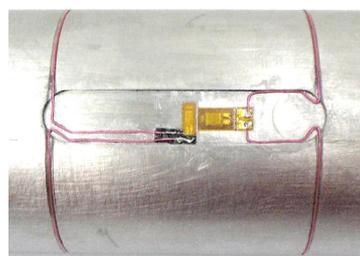
*O espécime DRC 008 foi projetado segundo os resultados da modelagem matemática.

b. Instrumentação dos Espécimes no Defeito

Para medir as deformações presentes nas regiões dos defeitos foram colados extensômetros elétricos de 120Ω e 350Ω (tipo KFC-2-C1-11 marca Kyowa de 2mm e tipo EA-06-125AC-350 marca MM), com adesivo Loctite 496. No cabeamento foram usados fios especiais com recobrimento de teflon com 0.5mm de diâmetro (como se mostra na figura 5.2.a), os quais passam por canais de 0.5mm de profundidade feitos nos tubos para evitar que os fios fossem cortados pelas camadas metálicas quando estas fossem aplicadas e quando o tubo e o sistema de reparo fossem testados. Na figura 5.2.b, se mostra a instrumentação do defeito com dois extensômetros elétricos posicionados nas direções circunferencial e longitudinal.



a)



b)

Figura 5.2 – Instrumentação no defeito

c. Distribuição e Preparação das Camadas Metálicas

Para determinar a melhor distribuição que podem ter as camadas metálicas, estas foram coladas com uma extremidade escalonada e outra com finalização abrupta.

Os comprimentos médios das camadas foram feitos iguais a $4L$, conforme mostrado na figura 5.3.

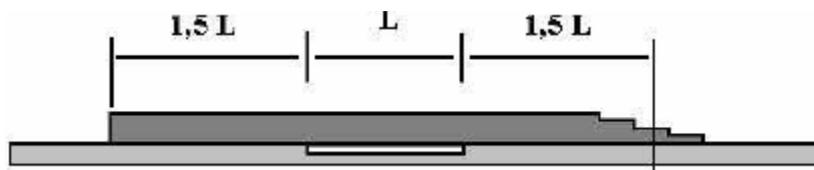


Figura 5.3 - Distribuição das camadas metálicas

A largura da chapa para camada, é igual a: $2 \cdot \pi \cdot (\text{raio do tubo} + \text{espessura das camadas anteriores} + \text{espessura do adesivo} - 5\% \text{ da circunferência do duto})$, considerando uma espessura de 0.1mm para cada camada de adesivo. Com um comprimento de defeito de 75mm tem-se as seguintes dimensões dos reparos todos feitos de chapa de aço de baixo carbono (SAE 1008):

- Primeira camada: 320mm de comprimento, 238mm de largura.
- Segunda camada: 300mm de comprimento, 242mm de largura.
- Terceira camada: 280mm de comprimento, 246mm de largura.
- Quarta camada: 260mm de comprimento, 250mm de largura.

O corte da chapa para obtenção das lâminas de reparo é feito tendo em consideração seu sentido de laminação, para que este coincida com o sentido circunferencial do duto. As lâminas foram lixadas para garantir a eliminação de óxidos ou outras impurezas, e então calandradas, como se pode ver na figura 5.4.

d. Processo de Colagem

Utilizou-se o adesivo formado pela mistura de Araldite® AV 138 com o Endurecedor HV 998, com uma relação de 100/40 partes por peso como

recomenda o fabricante [21]. A quantidade de adesivo foi calculada segundo a recomendação feita no capítulo 1 seção 3 de usar 1280 gramas por metro quadrado. Por exemplo, a primeira camada tem uma área sobreposta de 0.0076 m² o que precisa de 98 gramas de adesivo, e segundo a relação de 100/40 pode-se escrever:

$$\text{peso de Araldite} = \frac{5}{7} \text{ peso total requerido}$$

$$\text{peso de Endurecedor} = \frac{2}{7} \text{ peso total requerido}$$

Então, para cada camada se tem:

- Primeira camada: 70g de Araldite AV 138 e 28g de Endurecedor HV 998
- Segunda camada: 60g de Araldite AV 138 e 24g de Endurecedor HV 998
- Terceira camada: 60g de Araldite AV 138 e 24g de Endurecedor HV 998
- Quarta camada: 50g de Araldite AV 138 e 20g de Endurecedor HV 998

O tempo de manuseio do adesivo é de 30 minutos a 24°C, tempo no qual foi depositado o adesivo em ambas superfícies das partes a serem coladas. Estas foram pressionadas entre si por meio de braçadeiras, como se pode observar na figura 5.4, por um tempo de 5 horas por camada. Este serve para a cura parcial do adesivo e só então se podem retirar as braçadeiras, e procede-se a colagem da camada seguinte. O tempo de cura para que o adesivo alcance sua maior resistência é de 24 horas a 24°C, sendo que este tempo decresce na medida na medida que aumenta a temperatura [21].

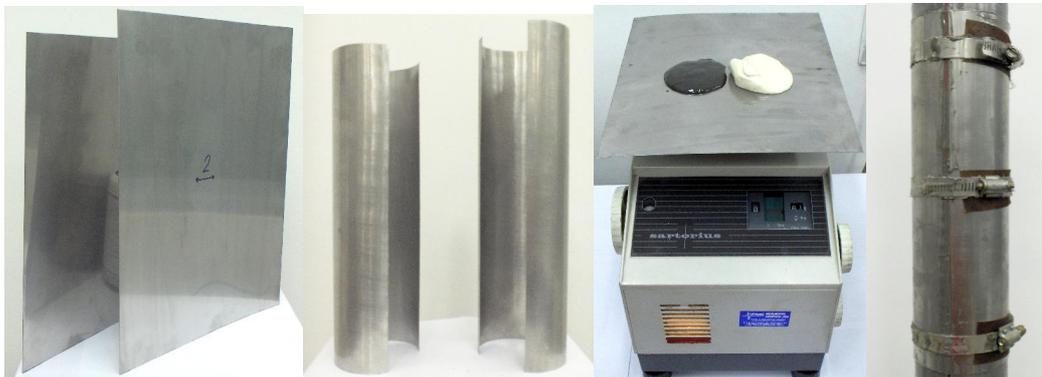


Figura 5.4 - Etapas na colagem.

e. Instrumentação Final dos Espécimes

Os espécimes foram instrumentados novamente com extensômetros elétricos tipo EA-06-125AC-350 marca MM de 350Ω , nas regiões longe dos reparos e sobre os reparos. A posição final dos extensômetros elétricos é mostrada na figura 5.5 e descrita na tabela 5.2, para cada espécime ensaiado:

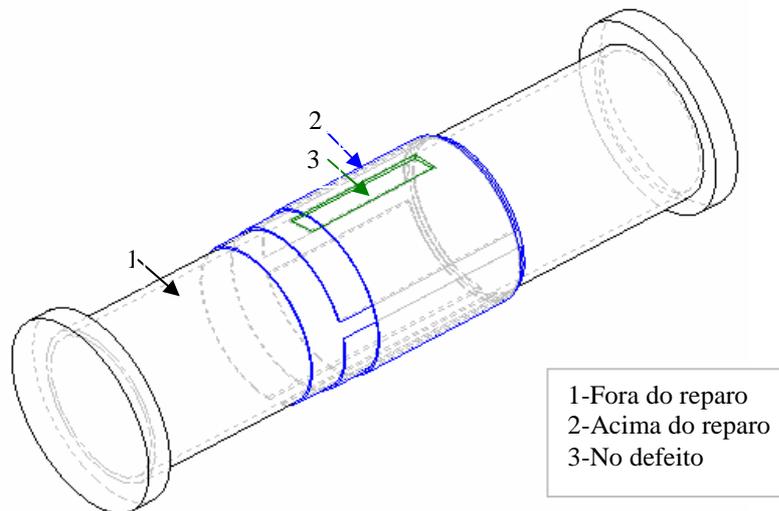


Figura 5.5 Posição dos extensômetros elétricos.

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Espécime	Posição e orientação dos extensômetros elétricos		
	Fora do reparo	Acima do reparo	No defeito
DCR 001	circunferencial e longitudinal (no centro do duto)	(sem reparo)	(sem defeito)
DCR 002	circunferencial e longitudinal (no centro do duto)	(sem reparo)	(sem defeito)
DCR 003	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 004	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 005	circunferencial	circunferencial e longitudinal	circunferencial
DCR 006	circunferencial	circunferencial	circunferencial
DCR 007	circunferencial	(sem reparo)	circunferencial e longitudinal
DCR 008	-----	circunferencial e longitudinal	circunferencial e longitudinal

5.3

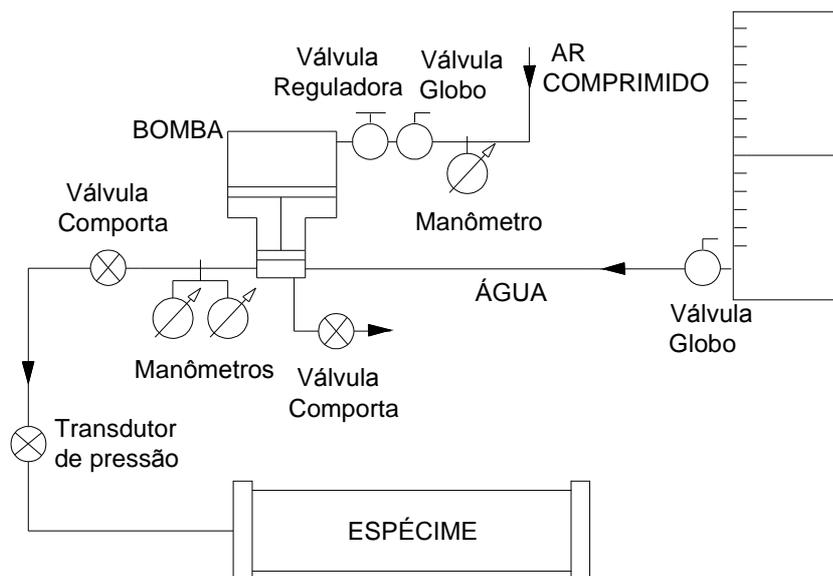
Dispositivo Experimental

Os testes experimentais foram feitos no laboratório de Fotomecânica e Comportamento Mecânico dos Materiais da PUC-Rio, que possui uma instalação para testar dutos sob pressão interna.

5.3.1

Sistema de Pressão

A pressão é proporcionada por uma bomba de embolo Haskel NS-110 acionada por ar comprimido. A vazão do líquido da bomba é controlada por uma válvula manual que regula a entrada de ar. As pressões da entrada de ar e saída de água são medidas por manômetros tipo Bourdon. Esta última é também medida por um transdutor de pressão. A figura 5.6 mostra o sistema de pressão.



a) Esquema do sistema de pressão.



b) Bomba de embolo.



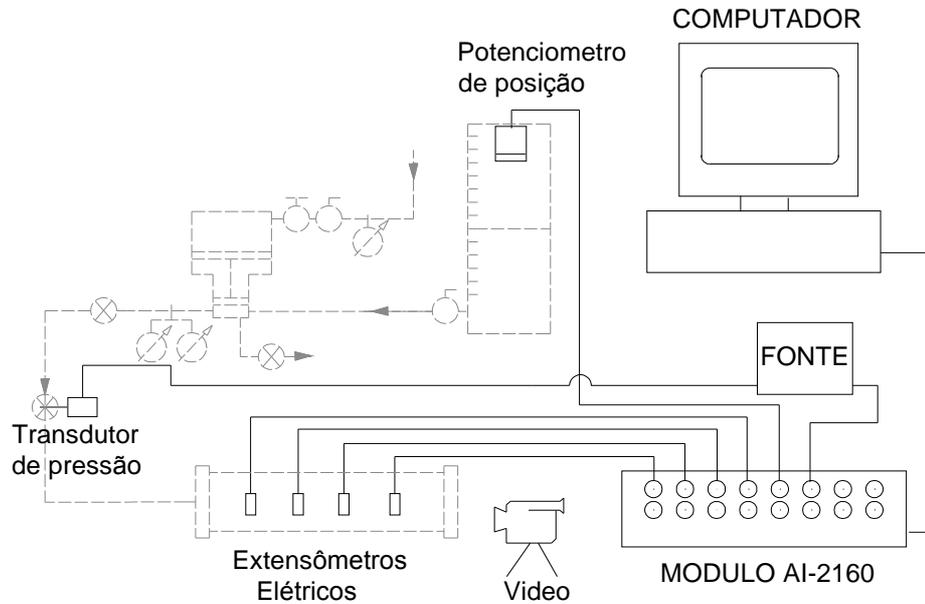
c) Espécime pressurizado.

Figura 5.6 - Sistema de pressão.

5.3.2

Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados permite ler pressões, variações de volume e deformações em função do tempo. O sistema é formado por um módulo condicionador de 16 entradas analógicas, marca Lynx Tecnologia Eletrônica AI-2160. Os sinais digitais são salvos em um computador com plataforma Windows XP. O módulo permite a conexão de sinais provenientes de sensores de ponte para as leituras dos extensômetros elétricos e do transdutor de pressão e sinais de sensores de posição para a leitura do volume. O transdutor trabalha com uma fonte de tensão própria, marca Goldstar DC Power Supply GP-430 3D. Adiciona-se uma câmara de vídeo para reconhecer o tipo de falha que se apresenta no espécime, como se mostra na figura 5.7.



a) Esquema do sistema de aquisição de dados.



b) Modulo condicionador.



c) Câmera de vídeo.

Figura 5.7 - Sistema de aquisição de dados.

A montagem dos extensômetros é de $\frac{1}{4}$ de ponte com três fios e usa-se uma tensão de excitação de 5 volts. A frequência de aquisição de dados foi fixada em 1Hz para cada sinal aquisitado. A taxa de pressurização inicial foi em torno de 10 bar/minuto, de forma que o tempo de duração dos ensaios ficou em torno de 20 minutos por espécime. Assim, podem-se ter curvas de sinais de mais de mil pontos.

5.4

Análise dos Resultados Experimentais

Os espécimes testados são mostrados na figura 5.8.



Figura 5.8 - Espécimes testados.

A seguir, são mostrados e discutidos os resultados obtidos para cada um dos espécimes testados e se faz a interpretação de seu comportamento. Deve-se notar que as deformações captadas pelos extensômetros elétricos não alcançam valores muito grandes de deformação (20000 a 40000 $\mu\text{m}/\text{m}$), já que os extensômetros usados não são próprios para grandes deformações.

- DRC 001 e 002 - Dutos sem defeito

Na figura 5.9 se mostram as deformações apresentadas nos dois espécimes testados sem defeito.

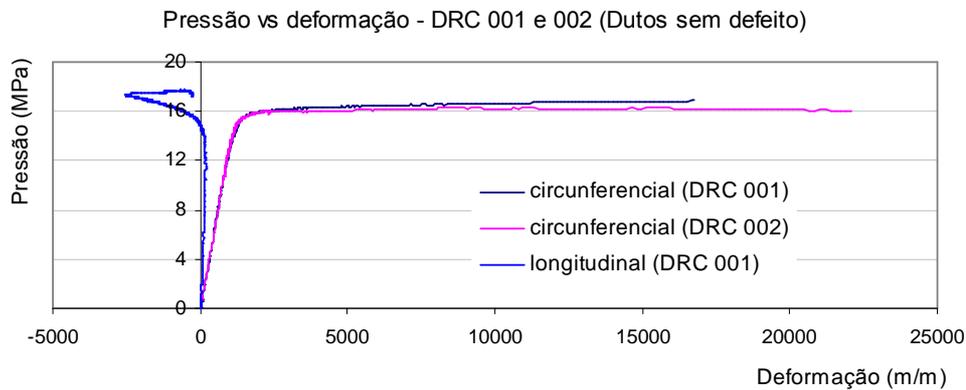


Figura 5.9 - Deformações nos dutos sem defeito.

As pressões de ruptura foram de 17,7 e 16,2 MPa nos espécimes DRC 001 e 002 respectivamente. A pressão de plastificação foi de 16 MPa, nos dois espécimes. Podem-se ver as inflexões na curva das deformações longitudinais devido ao seu comportamento elasto-plástico.

- DRC 007-Duto com defeito e sem reparo

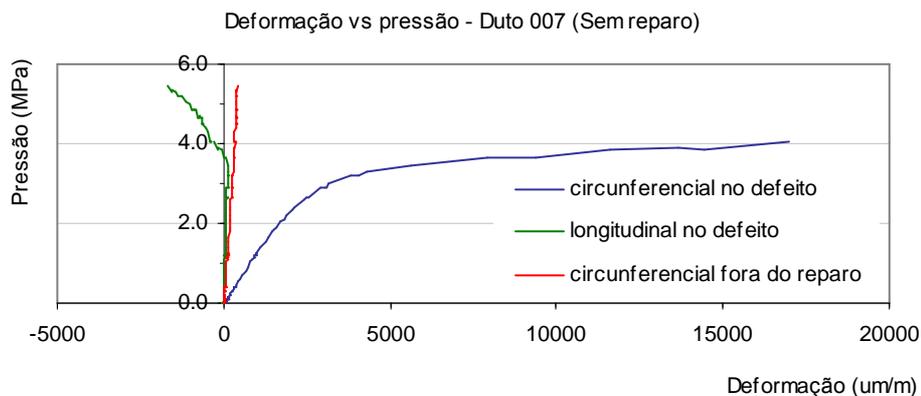


Figura 5.10 - Deformações no duto com defeito não reparado

O espécime rompeu com 5.45 MPa de pressão interna. O defeito plastifica na pressão igual a 3,3 MPa, sendo esta definida quando ocorre uma deformação circunferencial total igual a 0,5% ou 5000 $\mu\text{m/m}$. As partes sem defeito impedem que a deformação longitudinal na região do defeito assuma valores grandes. Quando as deformações circunferenciais tornam-se grandes, as deformações longitudinais tomam valores negativos.

- DRC 003-Duto com uma camada no reparo

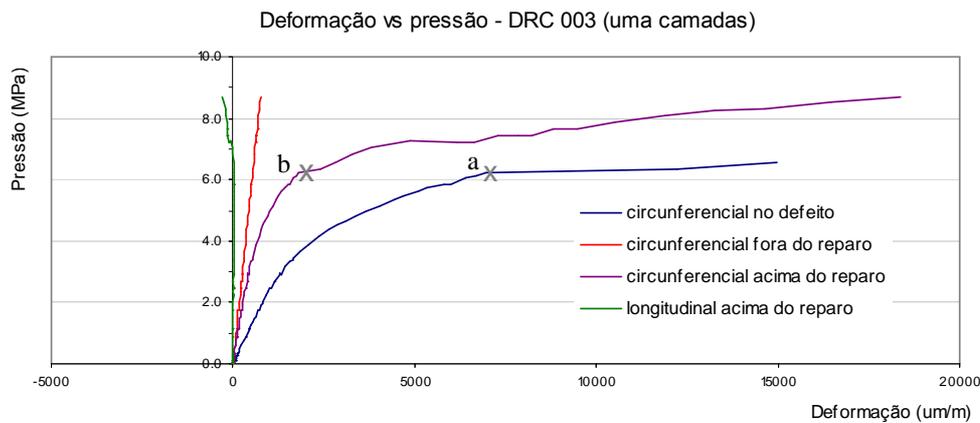


Figura 5.11 - Deformações no duto de uma camada no reparo

O espécime rompe na região do defeito com 8,7MPa de pressão interna. O defeito plastifica a 5,6MPa e a parede externa do reparo plastifica com 7,2 MPa. A parte sem defeito só se deforma 763 μ m/m quando o duto rompe. As deformações longitudinais acima do reparo permanecem próximas a zero. A partir do ponto “a” um pequeno incremento de pressão provoca um grande incremento de deformação plástica na parede do duto. O ponto “b” representa uma inflexão na curva do comportamento do reparo, e os pontos “a” e “b” estão em um mesmo nível de pressão.

Na figura 5.12 se pode ver o instante em que acontece o vazamento na forma de jato de água, o qual é muito fino, dificultando sua visualização.



Figura 5.12 - Vazamento no espécime de uma camada no reparo.

O vazamento acontece porque a parede do duto rompe na região do defeito. O líquido pressurizado sai pela fenda do duto (como se pode ver na figura 5.13)

provocando a falha na interface do adesivo e a chapa metálica (podendo ser também na interface duto-adesivo) até o extremo do reparo por onde se pode ver o vazamento. A falha na interface metal-adesivo é devido à tensão normal que a água pressurizada provoca em todas as direções originando uma tensão trativa na interface, tensão para a qual o adesivo não foi projetado. Então, este tipo de reparo não é bom para dutos que apresentem vazamentos.



Figura 5.13 - Ruptura do espécime de uma camada.

- DCR 004 - Duto com duas camadas de reparo

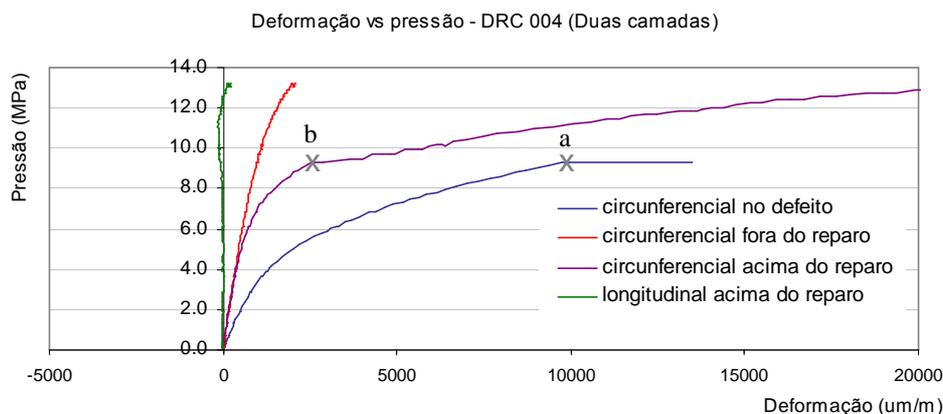


Figura 5.14 - Deformações nos espécimes de duas camadas no reparo.

O espécime rompe na região do defeito com 13,2 MPa de pressão interna. O defeito plastifica a 7,3 MPa e a parede externa do reparo plastifica com 9,8 MPa, com uma deformação da parte sem defeito igual a 2042 $\mu\text{m}/\text{m}$ quando o duto rompe. As deformações longitudinais na região do reparo permanecem próximas a zero. Os comportamentos das tensões circunferenciais indicados para o espécime anterior a través dos pontos “a” e “b” também são identificados neste espécime.

Na figura 5.15 se pode ver o instante no que acontece o vazamento na forma de jato de água, pelos dois extremos do reparo. O mecanismo de falha é o mesmo apresentado no espécime anterior.



Figura 5.15 - Vazamento no espécime de duas camadas no reparo.

- DCR 005 – Duto com três camadas de reparo

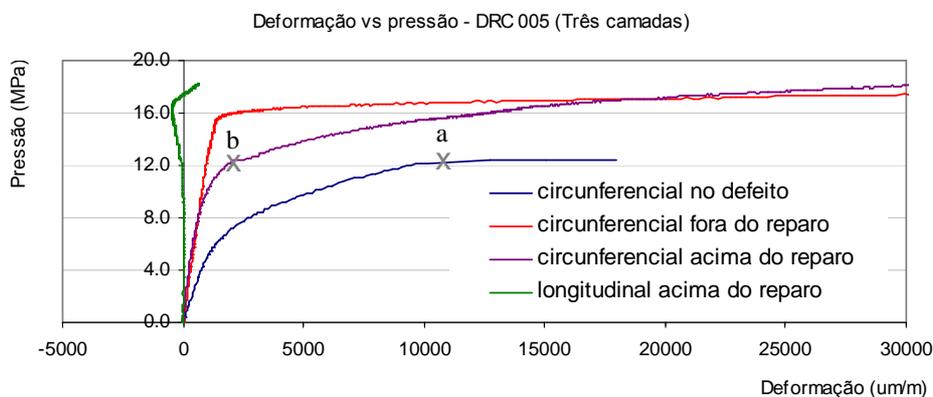


Figura 5.16 - Deformações nos espécimes de três camadas no reparo.

O espécime rompe na região do defeito com 18.3 MPa de pressão. O defeito, o reparo e a parte sem defeito plastificam com 9.9, 13.9 e 16.5 MPa de pressão, respectivamente. Os comportamentos das tensões circunferenciais indicados para os espécimes anteriores através dos pontos “a” e “b” também são identificados neste espécime.

Na figura 5.17 se pode ver o instante no que acontece o vazamento na forma de jato de água, pelos dois extremos do reparo. O mecanismo de falha é mesmo apresentado no espécime anterior.



Figura 5.17 - Vazamento no espécime de três camadas no reparo.

- DCR 006 – Duto com quatro camadas de reparo

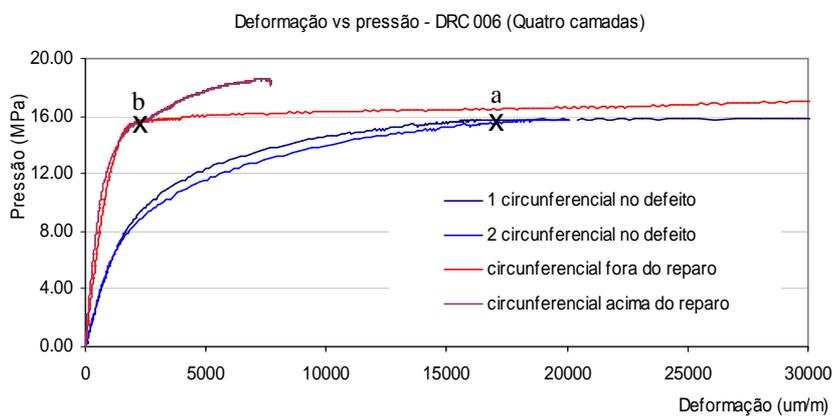


Figura 5.18 - Deformações nos espécimes de quatro camadas no reparo.

O espécime rompe na região fora do reparo com 18.6 MPa de pressão interna. As pressões de plastificação do defeito, reparo e região sem defeito são de 12.4, 17.8, 16.5 MPa respectivamente.

Os pontos “a” e “b” mostram que, quando a região do duto com defeito plastifica, o maior aporte de carga vai para o reparo, apresentando então, uma mudança na tendência na curva de tensão circunferencial indicada pelo ponto “b”. O material do duto no defeito continua escoando e encruando a pressões menores que a região sem defeito, mas não rompe. A ruptura acontece fora do reparo, devido a que a estricção do material é impedida pela rigidez do reparo.



Figura 5.19 - Ruptura no espécime de quatro camadas no reparo.

Na figura 5.20 se faz uma comparação das deformações circunferenciais presentes no defeito para os espécimes reparados.

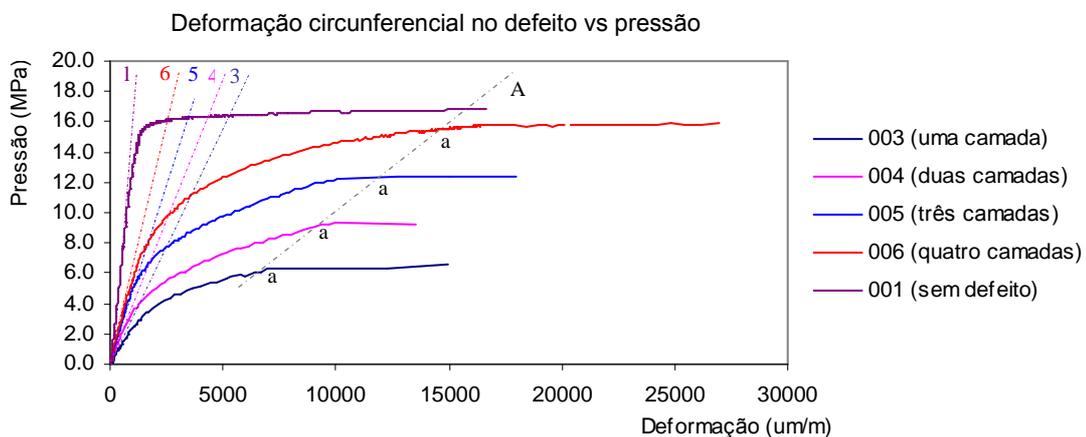


Figura 5.20 - Análise das deformações circunferências na região do defeito.

Pode-se ver que quando se aumenta o número de camadas as inclinações das linhas 3, 4, 5 e 6 vão aumentando e se aproximam da inclinação da reta 1 pertencente a um duto sem defeito. Os pontos “a” (definidos anteriormente como aqueles onde a parede do duto perde quase toda sua resistência) se deslocam para maiores deformações na medida que se aumenta o número de camadas metálicas. Este comportamento é desfavorável em comparação a um duto novo, pois um duto reparado só vai ter os mesmos valores de deformações de um duto novo sob pressões próximas à ruptura. Por exemplo, para se devolver a total integridade a um duto danificado, na região elástica e na região plástica comparado com um duto novo, este tem que ter a quantidade de camadas necessárias para que a sua inclinação na parte elástica seja igual ou maior que a inclinação da reta 1 (duto novo). Então tem-se o reparo de N camadas que devolve a total integridade a um duto danificado, como se mostra na figura 5.21.

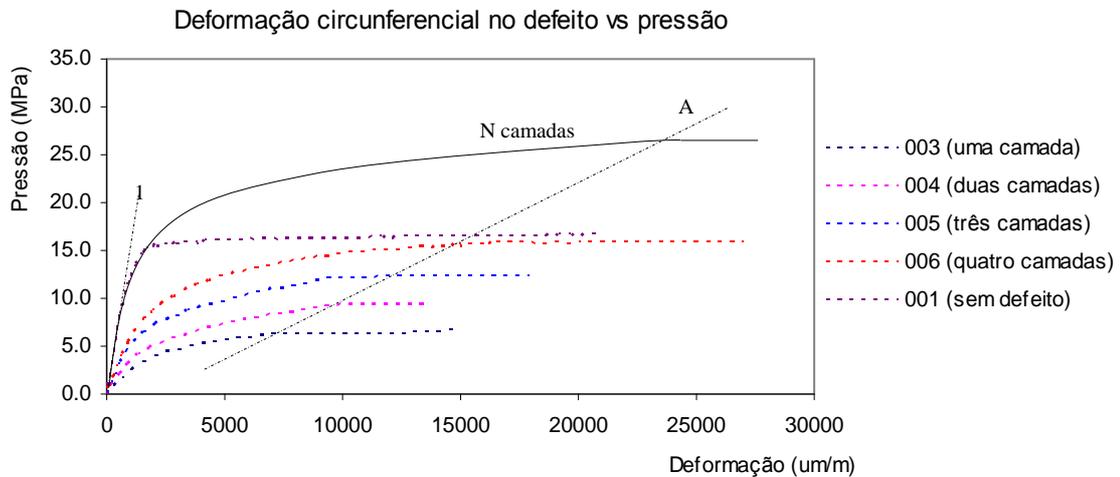


Figura 5.21 - Deformação circunferencial na região do defeito para um espécime de N camadas no reparo.

Este reparo de N camadas trabalharia super dimensionado para a ruptura, e com a quantidade de reparo, talvez, desnecessária para um trabalho comum no campo. Então se pode procurar o reparo de melhor performance variando o número de camadas metálicas.

Na figura 5.22 se mostra a comparação do comportamento das deformações circunferenciais que ocorrem nas superfícies externas dos reparos

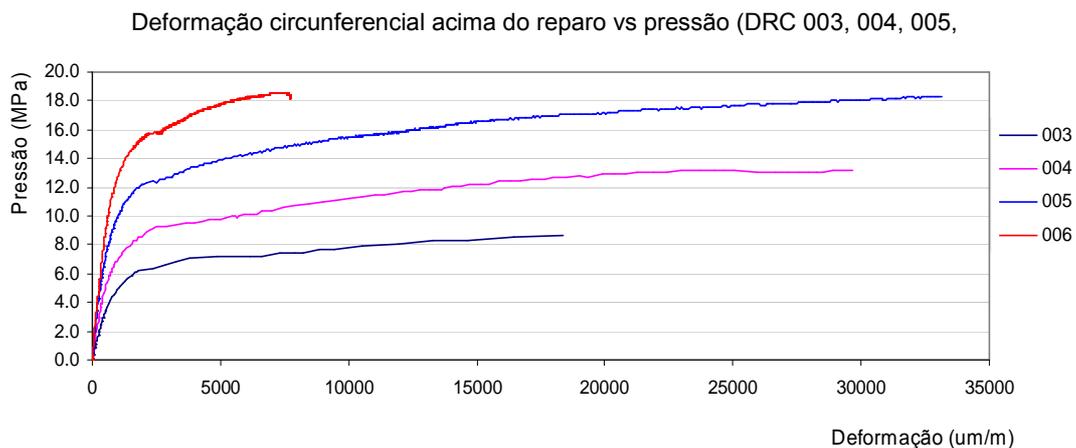


Figura 5.22 - Comparação das deformações circunferenciais na parede externa dos reparos.

As tendências das deformações no defeito e sobre o reparo são as mesmas, sendo sempre proporcionais. As relações entre as pressões que originam a

plastificação no defeito e a plastificação na parte externa do reparo, tem valor próximo a 0.7 para os quatro espécimes reparados.

Na figura 5.23 se mostra o gráfico volume de água injetada vs pressão para os dutos DRC 003 a DCR 007.

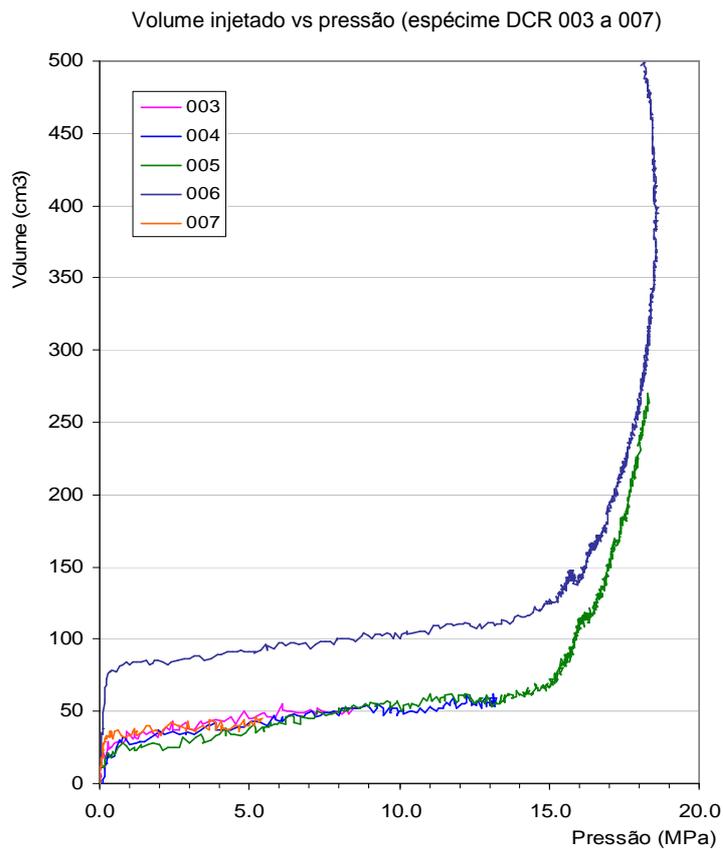


Figura 5.23 - Gráfico volume injetado de água no espécime vs pressão.

No início as curvas experimentam um rápido aumento no volume para um pequeno incremento de pressão. Isto acontece pela quase inevitável pequena quantidade de ar no sistema de pressão. O gráfico volume injetado vs pressão corrigida que é mostrado a seguir, onde é tirado o volume de ar no sistema de pressão. Pode-se ver que no duto 006 (quatro camadas no reparo) tinha maior volume de ar.

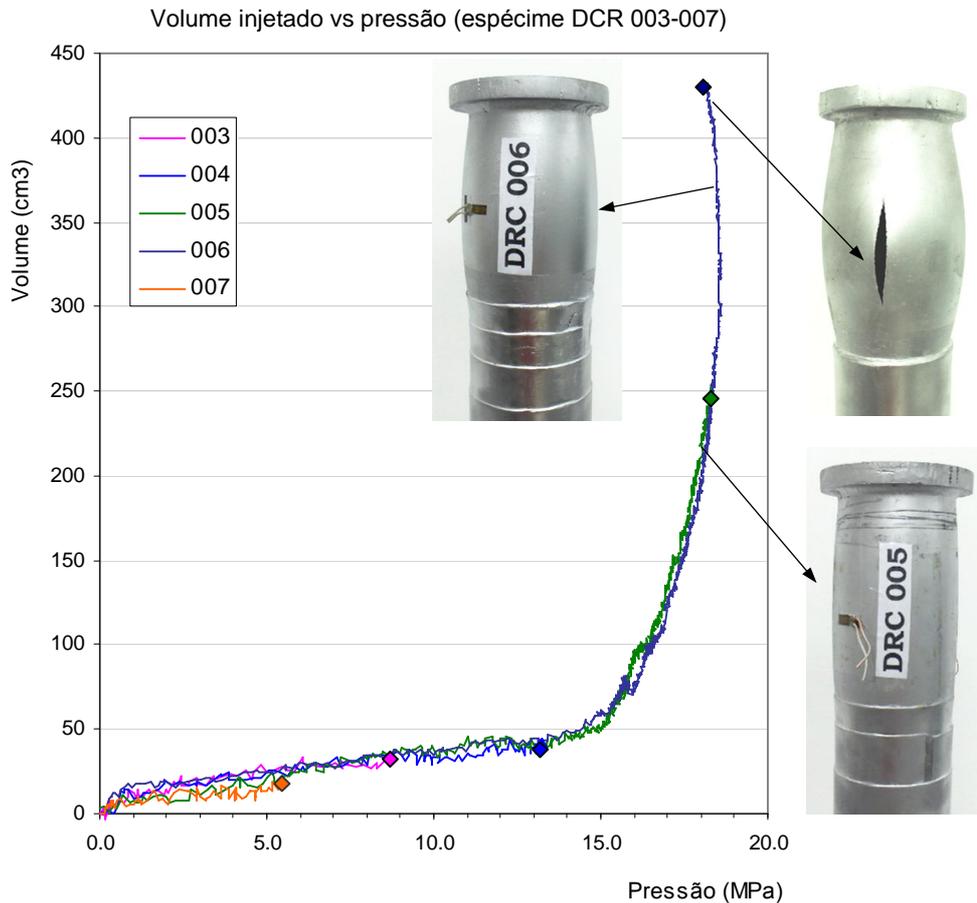


Figura 5.24 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Antes de acontecer a ruptura do espécime, este experimenta a estricção do material, uma diminuição da espessura de sua parede e aumento do seu diâmetro. Nos espécimes DRC 006 e DRC 005 este comportamento se apresenta em toda a região fora do reparo como um embarrigamento do tubo, o que se pode ver na figura 5.24, incrementando assim a quantidade de volume de água injetada. Nos espécimes DRC 003 e DRC 004, a deformação acentuada ocorre unicamente na região do defeito em forma de um abaulamento localizado (figura 5.25.a), que não representa um grande incremento no volume injetado. No espécime DRC 005 se apresenta o embarrigamento na região fora do reparo e do defeito. Na figura 5.25 pode-se ver que o abaulamento é limitado pelo reparo, a diferencia do tudo com defeito e sem reparo, onde o abaulamento acontece em quase toda a largura do defeito.

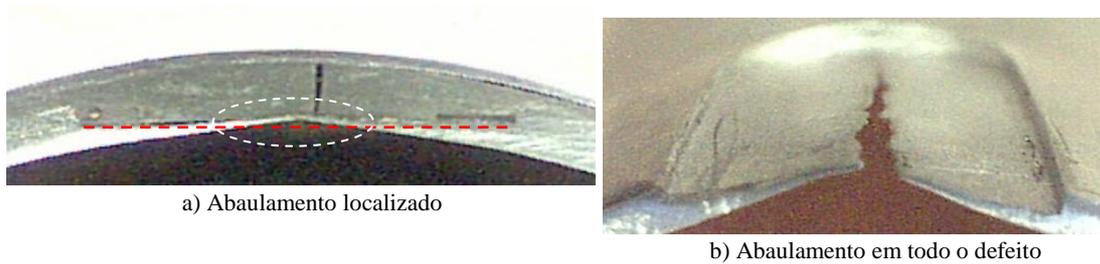


Figura 5.25 – Abaulamento nos defeitos.

A seguir, apresentam-se os resultados para o duto reparado com duas camadas de aço inox (espessura da chapa igual a 0.46mm). Na figura se observa que o comportamento é similar aos obtidos nos espécimes anteriores. Neste espécime incluiu-se um extensômetro elétrico em sentido longitudinal no defeito, mediante o qual se obtém valores de deformação pequenos em comparação com a deformação circunferencial, os quais, para casos práticos se consideram desprezíveis. As deformações são mostradas na figura 5.26.

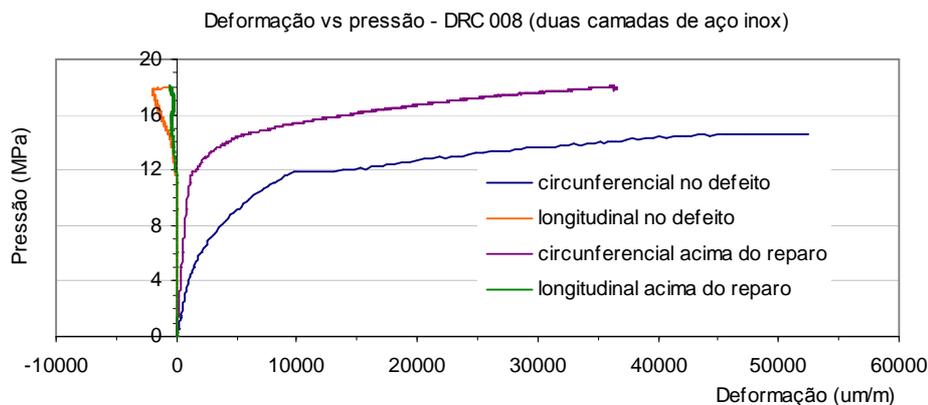


Figura 5.26 - Deformações no espécime duas camadas de aço inox no reparo.

O espécime rompe na região fora do reparo com 18 MPa de pressão interna. As pressões de plastificação do defeito e acima do reparo são de 9.1 e 14.4 MPa respectivamente.

Na figura se comparam os resultados das deformações circunferenciais dos espécimes DRC 006 e DRC 008, os quais não falham no defeito.

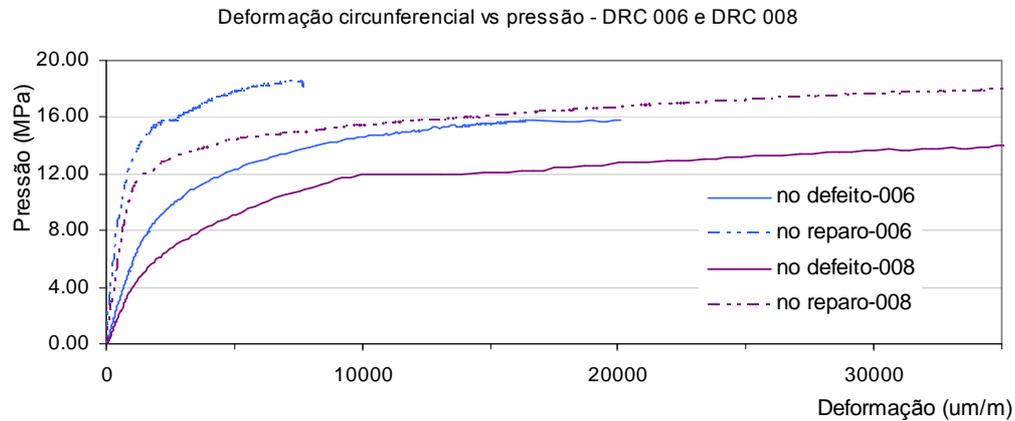


Figura 5.27 - Comparação das deformações circunferências para os espécimes de quatro camadas de aço de baixo carbono e duas camadas de aço inox no reparo.

Através da figura 5.27 pode-se estudar o efeito que tem a utilização de diferentes tipos de aços para os reparos. O espécime DRC 006 tem camadas de aço de baixo carbono com $S_y=167.7\text{MPa}$ e $S_u=295.1$, enquanto que, o espécime DRC 008 tem camadas de aço inox com $S_y=318,12$ e $S_u=814.2\text{MPa}$. Pode-se ver que o espécime DRC 008 entra no regime plástico a pressões menores ($9.1\text{MPa} < 12.4\text{MPa}$). Isto pode ser explicado através de uma das hipóteses feitas para o modelo analítico no capítulo 4, onde se tem um módulo de elasticidade ponderado para o adesivo (no defeito) e para as camadas metálicas. Esta ponderação depende da espessura de cada um e de seu módulo de elasticidade. Como os dois tipos de chapas utilizadas têm módulos de elasticidade semelhantes ($200\pm 7\text{GPa}$), o reparo que tenha maior espessura, vai ter um módulo de elasticidade ponderado maior, ou rigidez maior.

Recomenda-se trabalhar com o reparo de maior rigidez, e com resistência similar ou menor ao material do duto; fato que será corroborado no capítulo 6.

Na figura 5.28 se apresenta a comparação dos espécimes no gráfico volume de água injetada vs pressão, onde se têm comportamentos similares para ambos espécimes.

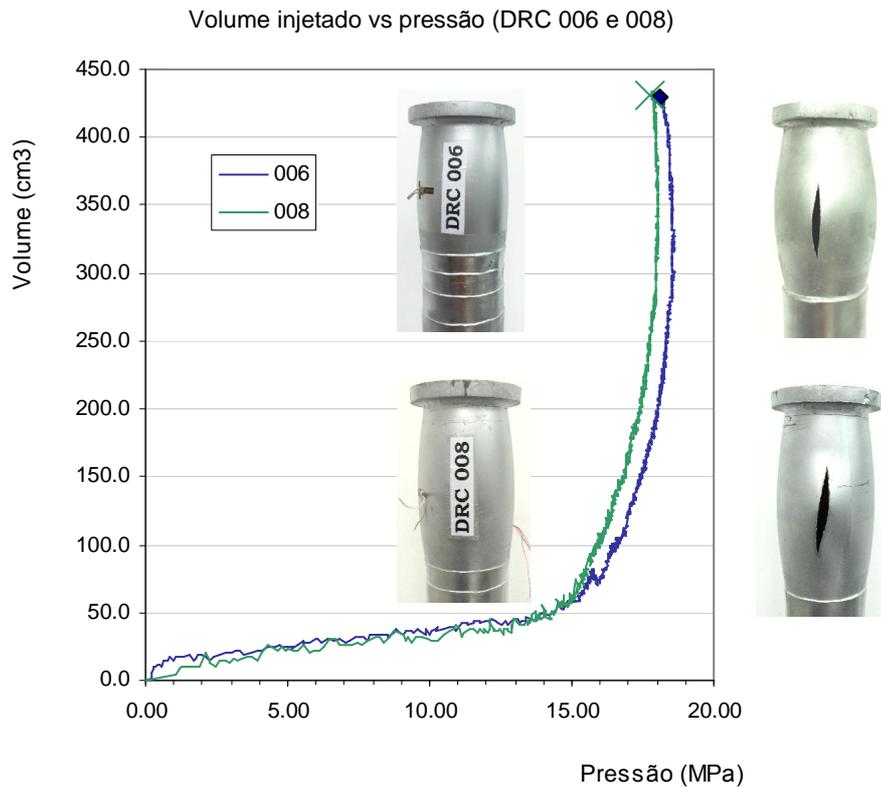


Figura 5.28 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Cabe mencionar que não se apresentam falhas por desprendimento das camadas metálicas. No último espécime testado se apresentam as condições mais desfavoráveis para o adesivo, já que só existem duas camadas no reparo (na seção 3.4.8 mostra-se que as camadas interiores de adesivo apresentam maiores tensões cisalhantes nos seus extremos), sem acontecer desprendimento.

A falha por desprendimento das camadas metálicas causadas por uma possível falha no adesivo é pouco provável em adesivos estruturais, devido à grande área sobreposta. Antes do desprendimento acontecer, o defeito rompe, atingindo seu limite de deformação plástica, ou o duto rompe fora do reparo.

No Apêndice D propôs-se uma metodologia para o cálculo das tensões equivalentes na região do defeito, para um duto reparado, a partir das

deformações circunferenciais medidas experimentalmente. Na figura 2.9 se apresenta o resultado do uso desta metodologia aplicada ao espécime tubular de quatro camadas.

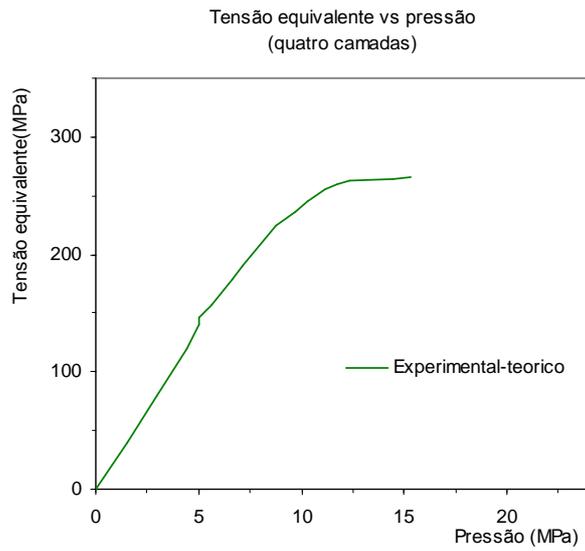


Figura 5.29 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

6 Avaliação e Comparação dos Resultados

Neste capítulo se faz a avaliação dos modelos numérico, analítico e experimental, mediante comparação dos resultados das (i) deformações circunferenciais, (ii) tensões equivalentes e (iii) pressões de escoamento e ruptura. Também se faz comparações adicionais dos resultados analíticos com resultados numéricos onde se mudam parâmetros como a profundidade do defeito e material do reparo. Ao final, se apresenta um exemplo de aplicação.

6.1 Comparações Numéricas, Analíticas e Experimentais.

Para a avaliação dos modelos numéricos, utilizam-se os dados das deformações circunferenciais nos espécimes de quatro e três camadas metálicas, junto aos valores das pressões que originam a ruptura e o escoamento. Nas comparações com as pressões de escoamento se deve ter em conta a observação feita na seção 3.4.10, onde se indica a diferença que se tem ao comparar esta pressão¹. As tensões equivalentes (achadas mediante o procedimento de calculo indicado no Apêndice D) são um bom parâmetro de comparação entre os modelos analíticos e numéricos; já não são tão boas assim, quando são utilizadas para comparar os resultados experimentais, sobre tudo no regime elástico, onde apresenta certa discordância. Recomenda-se um estudo mais aprofundado para o uso deste parâmetro na comparação de resultados.

¹ Observar a figura 3.34

- **Duto de Quatro Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os três parâmetros de comparação (i, ii, iii).

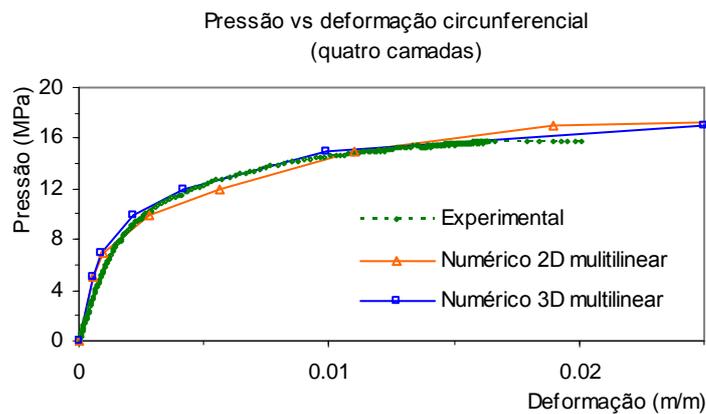


Figura 6.1 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de quatro camadas

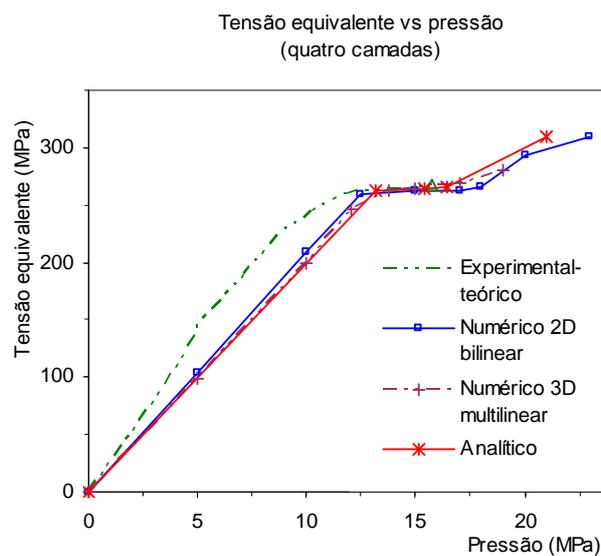


Figura 6.2 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de quatro camadas.

Tabela 6.1 Comparações de pressão no duto de quatro camadas

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica		Experimental
		2D bilinear	3D multilinear	
Pressão de escoamento	12.3	12.7	13.8	12.4
Pressão de ruptura no reparo.	21.7	22.8	--	--
Pressão de ruptura fora do reparo.	--	--	19	18.6

Na figura 6.1 se apresentam as deformações circunferenciais no defeito, onde os modelos numéricos multilíneares 2D e 3D conseguem representar os resultados experimentais, até aproximadamente 2% de deformação onde o extensômetro deixou de trabalhar.

Na figura 6.2 se pode ver a semelhança no comportamento dos modelos, coincidindo nos pontos importantes como a tensão de escoamento e ruptura. O ponto máximo que alcança a curva do modelo numérico 3D representa a tensão no defeito no momento que algum ponto fora do reparo atinge seu limite à ruptura e o programa deixa de admitir maiores pressões. Isto quer dizer que, a falha acontece fora do reparo como mostra o espécime tubular testado. No uso dos modelos 2D (analítico e numérico) o cálculo só é feito na região reparada.

Na tabela 6.1 se mostram as pressões que originam o escoamento e a ruptura no espécime.

- **Duto de Três Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os três parâmetros de comparação (i, ii, iii).



Pressão vs deformação circunferencial
(três camadas)

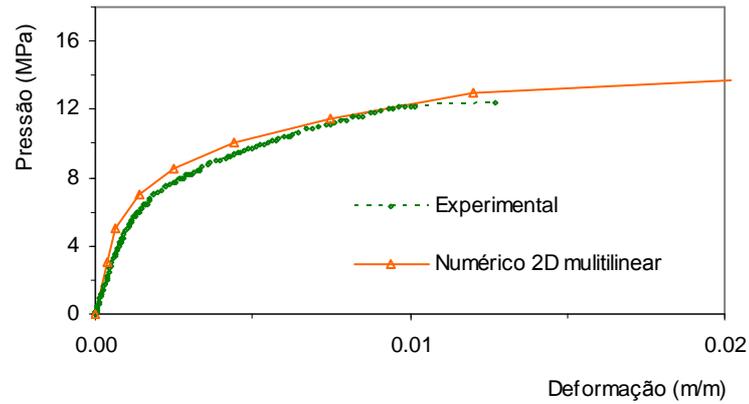


Figura 6.3 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de três camadas

Tensão equivalente vs pressão
(três camadas)

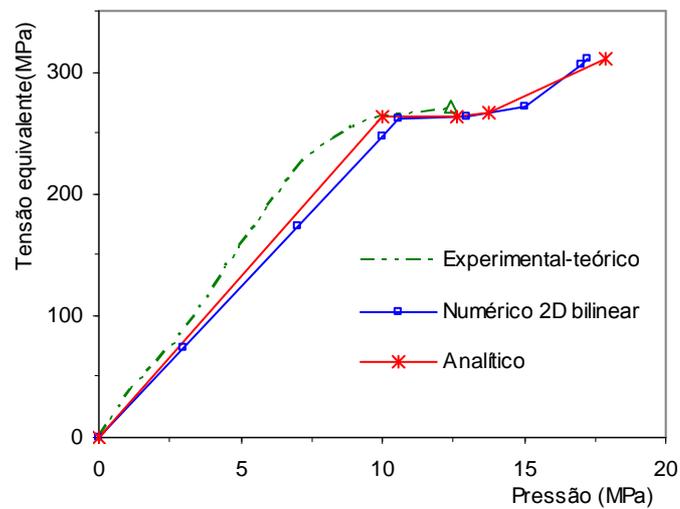


Figura 6.4 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de três camadas.

Tabela 6.2 Comparações de pressão no duto de três camadas.

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	10.1	10.6	11
Pressão de ruptura	17.9	17.2	18.3

- **Duto de Duas Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os parâmetros de comparação (ii) e (iii).

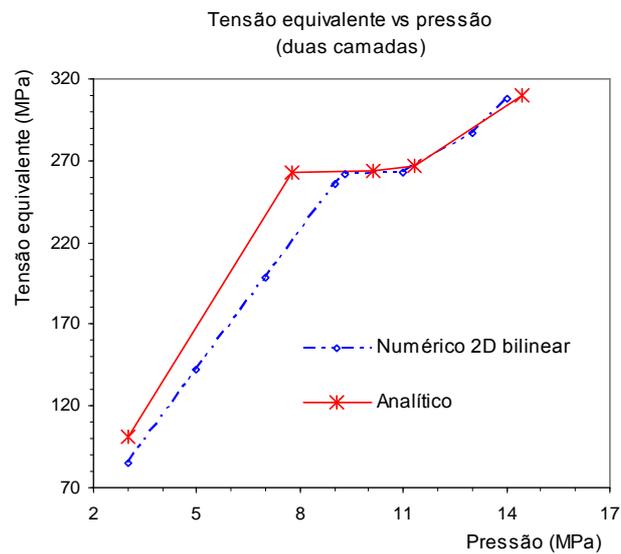


Figura 6.5 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de duas camadas

Tabela 6.3 Comparações de pressão no duto de duas camadas

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	7.78	9.3	8.4
Pressão de ruptura	14.4	14	13.2

- **Duto de Uma Camada no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os parâmetros de comparação (ii) e (iii).

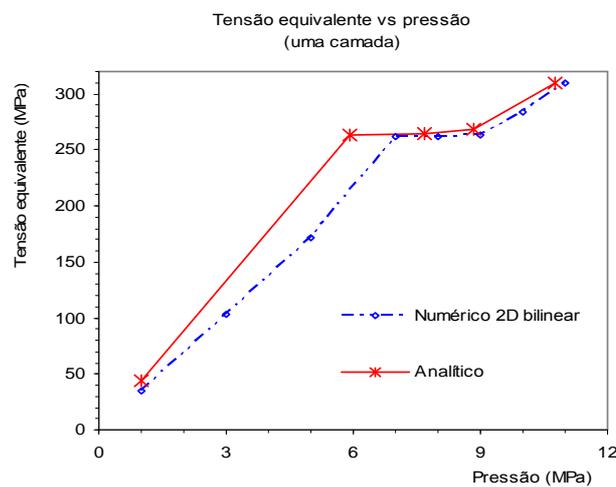


Figura 6.6 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de uma camadas

Tabela 6.4 Comparações de pressão no duto de uma camada

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	5.9	7.26	6.3
Pressão de ruptura	10.7	10.6	8.7

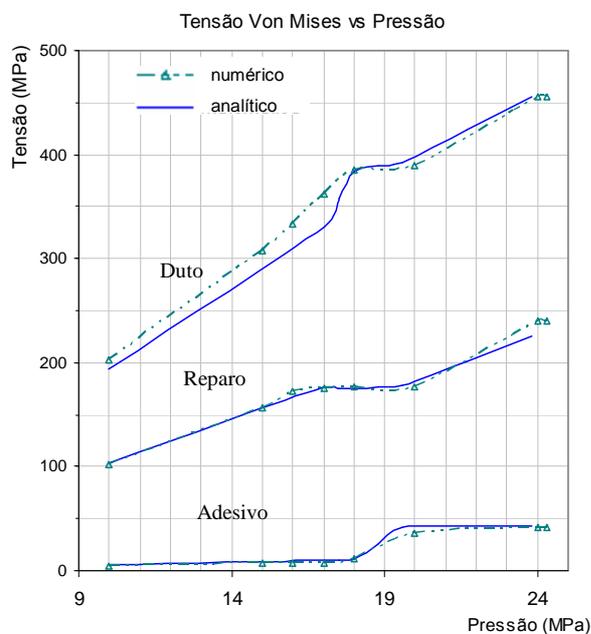
As comparações dos resultados das pressões de escoamento e ruptura são muito similares nos espécimes de quatro, três e duas camadas. Já no espécime de uma camada a diferença é considerável, sobretudo pelos resultados não conservativos dos modelos analítico e numérico. Esta diferença poderia ser atribuída a que o reparo de uma camada não limita suficientemente o abaulamento no defeito (acontecendo a estricção do material), o qual não é previsto pelos modelos analítico ou numérico. As comparações das tensões nos espécimes de duas e uma camada, não é muito boa na região elástica, sendo similares na região plástica.

6.2

Comparações Adicionais dos Modelos Analítico e Numérico

Para avaliar a eficácia da modelagem analítica se faz comparações adicionais com modelos numéricos desenvolvidos no capítulo 3. Todos os resultados foram modelados utilizando propriedades bilineares do material e pequenos deslocamentos, além de ter quatro camadas no reparo, com espessura de camada metálica de 0.5mm e espessura de adesivo de 0.2mm (por camadas), como mostrado na figura 3.7

a. Modelo convencional



Características:

1. Materiais

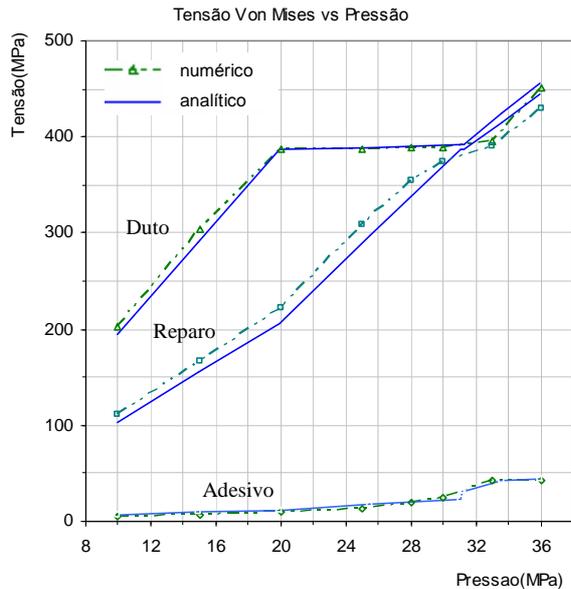
	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
Camada metálica	175.8	279	0.088	36
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. Profundidade do defeito: $h = 1,4 \text{ mm}$ ($C = 0,3$)

Figura 6.7 - Comparação numérica e analítica no modelo convencional

b. Modelo com mesmo material do duto e do reparo



Características:

1. Materiais

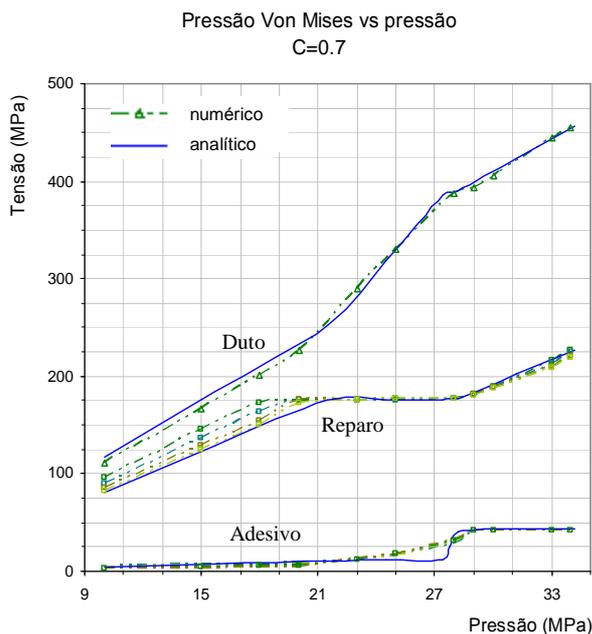
	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
Camada metálica	387	456	0.19	20
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. Profundidade do defeito: $h = 1,4 \text{ mm}$ ($C = 0,3$)

Figura 6.8 Comparação numérica e analítica no modelo com mesmo material no reparo.

c. Modelo com diferente profundidade no defeito



Características:

1. Materiais

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
Camada metálica	175.8	279	0.088	36
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. **Profundidade do defeito: $h = 0.6 \text{ mm}$**
($C = 0.7$)

Figura 6.9 Comparação numérica e analítica no modelo com diferentes profundidades do defeito

6.3

Exemplo de Aplicação

Apresenta-se um exemplo de aplicação para o projeto de um reparo utilizando multicamadas metálicas coladas, mostrando como foi projetado o reparo do espécime DRC 008 (duas camadas de aço inoxidável no reparo).

Tem-se um duto que apresenta um defeito de perda de espessura. Este duto tem as seguintes características:

- Raio médio do duto: 37,1mm
- Espessura do duto: 2,04mm
- Profundidade do defeito: 1,4mm
- Limite de escoamento (a 0,5%): 262,6 MPa
- Limite à ruptura: 310 MPa
- Deformação máxima: 34%

Dispõe-se de uma chapa de aço inox 304 para ser utilizada no reparo, a qual tem as seguintes características:

- Espessura: 0,46mm
- Limite de escoamento: 318,2 MPa
- Limite de ruptura: 814 MPa
- Deformação máxima: 80%

(As propriedades mecânicas da chapa foram achadas através de ensaios de tração, cujos resultados são mostrados no Apêndice B)

Utiliza-se o adesivo formado pela mistura de Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998 com uma relação de 100/40 partes por peso como recomenda o fabricante, que tem limite de escoamento de 42,3 MPa e um módulo de elasticidade de 4700 MPa.

O pré-dimensionamento da espessura necessária na camada metálica é achado com a equação 4.13:

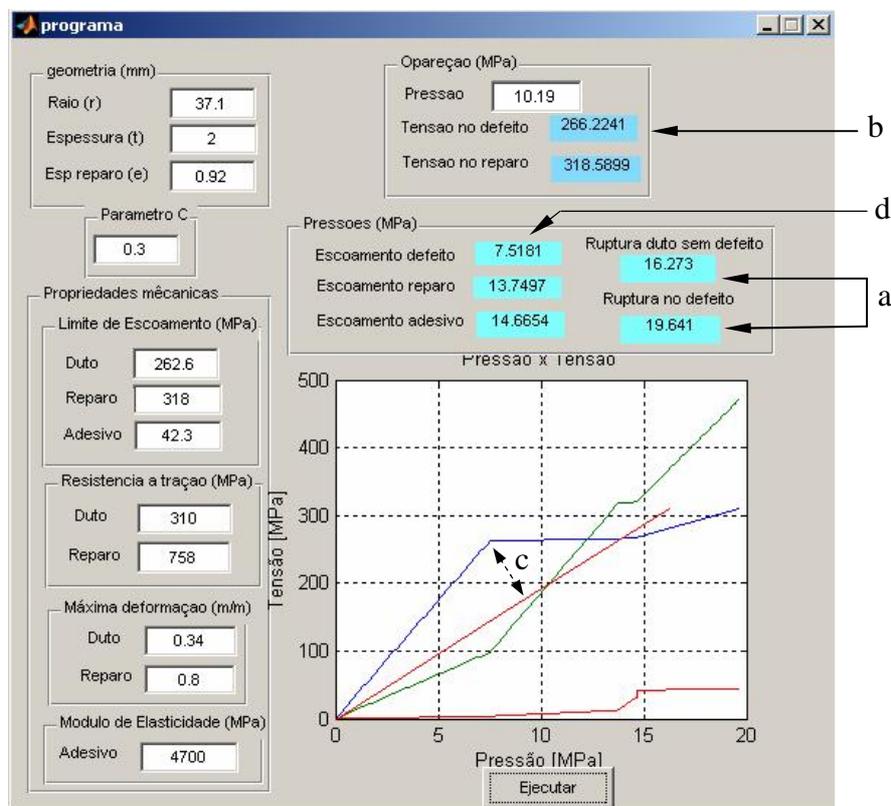
$$e_{aprox} = \frac{S_{ud} \cdot h}{S_{ur}} = \frac{310 \cdot (1,4)}{814} = 0,533 \text{ mm}$$

Dispõe-se de chapas de 0.46mm, então se testa com duas chapas no reparo (e=0.92mm)

Calculo do parâmetro C considerando defeito longo:

$$C = \left(1 - \frac{h}{t}\right) = \left(1 - \frac{1,4}{2}\right) = 0.3$$

Ingressam-se os dados ao modelo analítico para o cálculo das pressões, e assim projeta-se o reparo



*Linhas: azul-duto reparado; vermelho-duto sem defeito; verde-reparo; laranja-adesivo

Figura 6.10 Resultados da modelagem matemática para o duto com reparo de aço inox 304

Pode-se ver que o uso de 2 camadas metálicas é suficiente para que a pressão de ruptura do duto reparado seja maior que a pressão de ruptura de um duto sem defeito, com um RSF - Fator de Resistência Remanescente igual a:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} = \frac{19.64}{16.27} = 1.21 > 0.9$$

onde, obtidos das janelas (a) da figura 6.10:

L_{DC} : Carga limite ao colapso plástico do componente danificado.

L_{UC} : Carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.

(L_{DC} e L_{UC} indicados com a letra “a” na figura 6.10)

Segundo este critério de aceitação o reparo é aceitável, já que é maior do que 0.9.

Da norma B31.4 [7] a pressão máxima de operação para o duto sem defeito é (equação 2.4):

$$P_d = \frac{2.t.SMYS}{D} . F.E.T = \frac{2.(2).(262.6)}{74.2} . (0.72).(1).(1) = 10.19 MPa$$

A pressão na qual o defeito inicia o escoamento é de 7.51 MPa (indicado com a letra “d” na figura 6.10), o que indica que com uma pressão de operação de 10.19 MPa, o defeito reparado trabalha plasticamente. Com 10.19 MPa, o defeito reparado apresenta uma tensão aproximada de 266.22 MPa (“b” na figura 6.10), sendo o limite de escoamento do material igual a 262.6 MPa. Então, fica ao critério do projetista decidir aumentar o número de camadas ou só se basear no RSF para aceitar o reparo.

Na figura 6.10 a separação entre as linhas do comportamento do duto reparado (azul) e o duto novo sem reparo (vermelho), esta relacionada com a rigidez do reparo. Quer dizer, quanto maior for a separação “c”, maior será o trabalho do reparo na região plástica. Então, a maior rigidez do reparo, menor deverá ser a separação “c”.

No caso de se querer reduzir esta separação “c”, pode-se aumentar o número de camadas ou trocar o material do reparo. Escolhe-se a segunda opção e se trabalha com uma chapa de aço de baixo carbono, que tem um custo muito menor que a chapa anterior. Esta chapa apresenta as seguintes propriedades:

- Espessura: 0.46mm
- Limite de escoamento: 177.7 MPa

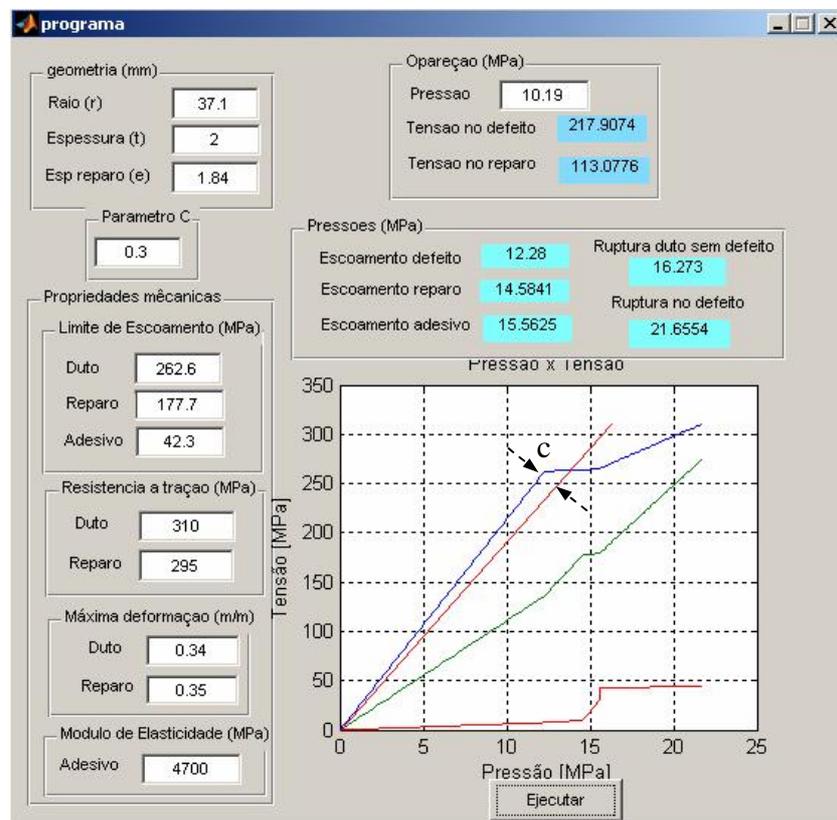
- Limite à ruptura: 295 MPa
- Deformação máxima: 35%

O pré-dimensionamento da espessura necessária na camada metálica é:

$$e_{aprox} = \frac{S_{ud} \cdot h}{S_{ur}} = \frac{310 \cdot (1.4)}{295} = 1.47 \text{ mm}$$

Então se precisa de $1.47 / 0.46 = 3.2 \rightarrow 4$ camadas metálicas no reparo.

Ingressam-se os dados ao modelo analítico para o cálculo das pressões, e projeto do reparo.



*Linhas: azul-duto reparado; vermelho-duto sem defeito; verde-reparo; laranja-adesivo

Figura 6.11 Resultados da modelagem analítica para o duto com reparo de aço de baixo carbono.

O Fator de Resistência Remanescente é $RSF = \frac{22.66}{16.273} = 1.39$; e a pressão a

qual esco o defeito reparado é de 12.28 MPa, maior que a pressão de operação do duto (10.19 MPa). Com 10.19MPa o defeito apresenta tensão de 217.09MPa, menor que seu limite de escoamento. A separação “c” (figura 6.11) é menor que

no reparo anterior. Considera-se que este reparo tem melhor qualidade, com rigidez maior.

A rigidez esta relacionada ao módulo de elasticidade do conjunto camada metálica-adesivo². Considerando-se módulos de elasticidade iguais, uma rigidez maior pode-se obter trabalhando com camadas metálicas de menor S_y e S_u , já que se precisará de maior espessura de reparo para suportar as pressões de ruptura. Então, o projetista tem que fazer um balanço de custo, tempo e qualidade do reparo, considerando que ao utilizar um metal menos resistente nas camadas metálicas, vai ter que trabalhar com mais camadas, utilizar mais adesivo e precisar mais tempo para aplicar as camadas (mas se terá um reparo mas rígido). Outro parâmetro a ser otimizado pelo projetista é a espessura de cada chapa no reparo, segundo sua conveniência, para pré-curvar e aplicar as camadas no duto, já que a maior espessura de chapa, menos quantidade de adesivo é necessário, mas maior dificuldade para sua aplicação.

² Módulo de elasticidade ponderado, estudado no capítulo 4.

7

Conclusões, Limitações e Sugestões

7.1

Conclusões

Neste trabalho comprova-se a eficácia da nova técnica de reparo usando multicamadas metálicas coladas para dutos com perda externa de espessura. Foi mostrado que com um dimensionamento correto, a região reparada consegue suportar pressões superiores às suportadas por um duto sem defeito.

A técnica ainda permite limitar as deformações que se apresentam na região do defeito, mesmo quando se trabalha no regime elástico, devido ao alto módulo de elasticidade das camadas metálicas, que devolvem a integridade estrutural do duto danificado.

Às vantagens apresentadas do novo método somam-se, ainda, uma segura e fácil aplicação pela não necessidade de soldagem e seu menor custo quando comparada aos compostos atualmente utilizados.

Neste trabalho foram realizados: oito testes com espécimes reduzidos; a modelagem analítica do reparo; e a modelagem numérica.

Na *abordagem experimental* foram testados oito espécimes tubulares, cinco dos quais foram reparados utilizando multicamadas metálicas coladas. Nestes foram usinados defeitos para simular perda de espessura. Vale dizer que em todos os espécimes reparados o defeito tem a mesma geometria, mas muda-se o número

de camadas e o material usado nos reparos. Com a instrumentação dos espécimes ensaiados e a determinação experimental de variáveis tais como, deformações, pressões e variações volumétricas, conseguiu-se comparar resultados e otimizar-se o método de reparo.

Dos cinco espécimes reparados, dois romperam fora do reparo. Um utilizou quatro camadas de aço de baixo carbono no reparo, e o outro utilizou duas camadas de aço inoxidável no reparo (devido a sua alta resistência). O espécime com duas camadas apresentou deformações plásticas no defeito sob menores pressões ($9.1\text{MPa} < 12.4\text{MPa}$), devido a sua menor rigidez, resultado de sua menor espessura, considerando-se ambas chapas com módulos de elasticidade similares.

Outros três espécimes reparados romperam na região do defeito, estes tinham uma, duas e três camadas de aço de baixo carbono no reparo e as pressões de ruptura foram de 8.7, 13.2, 18.3 MPa, respectivamente. A ruptura ocorreu quando a região do defeito atingiu seu limite de deformação plástica originando uma fissura por onde sai o fluido pressurizado, o que origina um desprendimento localizado na interface duto-adesivo, que propaga-se até alcançar o extremo por onde acontece o vazamento. No caso do duto de três camadas, a falha poderia ter acontecido no reparo ou fora do reparo, já que a pressão que este suporta é similar às pressões de ruptura de um duto sem defeito.

As falhas por desprendimento das camadas metálicas devido a uma possível falha no adesivo é pouco provável em adesivos estruturais, devido à grande área sobreposta. Antes do desprendimento acontecer, o defeito rompe, atingindo seu limite de deformação plástica, ou, o duto rompe fora do reparo.

Nos espécimes que rompem fora do reparo, a ruptura acontece no extremo com terminação abrupta.

Na *modelagem analítica* apresenta-se uma metodologia simples para obter a tensão atuante no defeito e no reparo, para uma determinada pressão interna, além de determinar as pressões que ocasionaram a ruptura e o escoamento em cada

componente do conjunto tubo-reparo, mediante o qual, pode-se dimensionar apropriadamente a espessura do reparo. Ao conhecer o comportamento das tensões em relação à pressão, pode-se otimizar o projeto de reparo mudando as propriedades dos materiais usados (principalmente das camadas metálicas), ou diminuindo ou aumentando sua espessura. Com este fim apresenta-se um programa simples que automatiza a utilização das equações desenvolvidas.

Esta modelagem possibilitou prever com erro máximo de 9.4% as pressões que originam a ruptura e o escoamento do defeito nos espécimes testados. Também pôde-se observar que, o espécime reparado com quatro camadas de aço de baixo carbono, tem melhor desempenho que o espécime reparado com duas camadas de aço inoxidável. Aplicando-se a ambos uma pressão igual à pressão de operação num duto novo (10.19MPa segundo a norma B31.4), o reparo de quatro camadas de aço de baixo carbono não tinha atingido seu limite de escoamento na região do defeito ($217.1\text{MPa} < 262.2\text{MPa}$), o que não ocorre com o reparo com duas camadas de aço inoxidável que trabalha plasticamente à mesma pressão ($266.2\text{MPa} > 262.2\text{MPa}$). Este comportamento pode ser explicado através de uma das hipóteses feitas nesta modelagem, onde se tem um módulo de elasticidade ponderado para o adesivo (no defeito) e para as camadas metálicas. Esta ponderação depende da espessura de cada um e de seu módulo de elasticidade. Como os dois tipos de chapas utilizadas têm módulos de elasticidade semelhantes, o reparo que tenha maior espessura, vai ter módulo de elasticidade ponderado maior e também rigidez maior.

A *modelagem numérica* teve a finalidade de compreender e otimizar o comportamento do duto reparado e propor modelos numéricos que melhor o representem. Foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação. Foram criados modelos numéricos distintos que agrupam-se em modelos de deformação plana, axissimétricos e modelos 3D.

Na análise dos modelos desenvolvidos se observa que:

- A modelagem que inclui grandes deslocamentos pode trabalhar com a curva real tensão vs deformação do material, enquanto a modelagem que

não considera grandes deslocamentos pode trabalhar com a curva de engenharia do material. No caso de um duto reparado, pode-se trabalhar com uma modelagem que não inclua grandes deslocamentos, já que o reparo limita a estricção que pode acontecer no defeito.

- Os comportamentos nas modelagens de deformação plana e nas modelagens 3D são similares, ambos atingem seu limite de escoamento praticamente sob a mesma pressão.
- A opção pela utilização de curvas bilineares ou multilíneas nas propriedades do material, tem importância quando se quer estudar o que acontece na região de transição elasto-plástica, onde é recomendável trabalhar com curvas multilíneas do material. Na ruptura, não se apresentaram diferenças relevantes.

Principais resultados obtidos numericamente:

- Conseguiu-se obter com erro máximo de 9.6% as pressões que originam a ruptura e o escoamento do defeito nos espécimes testados.
- Determinou-se um comportamento característico num duto reparado com multicamadas metálicas coladas.
- A influência das distintas geometrias transversais do defeito, com uma mesma profundidade é mínima. Os comportamentos apresentam uma pequena discordância no regime elástico, mas os valores das tensões convergem quase a uma mesma pressão no seu limite de escoamento, a partir do qual os modelos têm valores similares da pressão de ruptura.
- Determinou-se que pode-se utilizar um modelo simplificado que considere uma só camada metálica, com espessura equivalente à soma das camadas metálicas realmente usadas, e sem junção, para o estudo das tensões que se apresentam na região do defeito.
- O efeito da espessura de cada chapa metálica no reparo, pode ser considerado desprezível, segundo as tensões apresentadas no defeito.
- O efeito das tensões cisalhantes máximas no adesivo se restringe aos extremos de cada camada, perto das junções, a qual diminui

consideravelmente na direção circunferencial, assim não influenciando na resistência total do adesivo.

- Observou-se que a utilização de terminações escalonadas nos extremos do reparo pode ser mais conveniente que uma terminação abrupta, já que apresenta melhor distribuição das tensões e menor deformação circunferencial máxima.

7.2

Limitações e Sugestões

Uma das principais limitações da técnica de reparo proposta é o tempo de aplicação do reparo, devido ao tempo de cura do adesivo para cada camada utilizada. No apêndice E apresenta-se uma variante desta técnica de reparo que solucionaria esta limitação, reduzindo o tempo total de aplicação ao tempo de cura de uma só camada.

Apresenta-se no Apêndice D uma metodologia para o cálculo das tensões a partir das deformações medidas experimentalmente num estado multiaxial, cuja validade deve ser testada com mais resultados experimentais.

Sugere-se na parte experimental o uso de extensômetros de resistência elétrica que permitam a leitura de grandes deformações plásticas. Assim como obter curvas das propriedades do material com a maior exatidão possível, o que algumas vezes é difícil, devido à precisão requerida dos equipamentos nas leituras das pequenas deformações elásticas, onde um pequeno erro na sua leitura representa um erro considerável na tensão.

Sugere-se um estudo mais amplo das propriedades do adesivo para esta aplicação, sobretudo a temperaturas altas para assim descartar possíveis efeitos de fluência do adesivo.

Referências bibliográficas

- [1] Luiz F. M. Gomes. – **O Mercado Potencial para o Transporte por Dutos no Brasil**. Rio de Janeiro : PUC 1984.
- [2] Revista electrónica.- **Pétroleo e Gás**. Globo Online
<http://oglobo.globo.com/petroleo>, 2005.
- [3] N-2737 Petrobrás.- **Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre Ontec SC-13**, Oleodutos e Gaseodutos, julho, 2005
- [4] José Luiz F. Freire. – **Análise da Integridade de Dutos – Noções Básicas** Engenharia de Dutos 2004.
- [5] Carlos Eduardo Foltran.- **Análise de Problemas Planos em Regime Elastoplástico pelo Método dos Elementos de Contorno**. São Paulo, agosto 1999, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- [6] Fernando Rodriguez, Avial Azcunaga.- **Resistencia de Materiales**. Madrid: Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, 1977
- [7] ASME B31.4, **Pipeline Transportation System for Liquids Hydrocarbons and Other Liquids**, ASME Code dor Pressure Piping, B31, An American National Standard, 1998 Edition.
- [8] API Specification 5L, **Specification for Line Pipe**, Forty-Second Edition, July 1, 2000. American Petroleum Institute
- [9] Ricardo Dias de Souza. – **Avaliação Estrutural de Dutos com defeitos de Corrosão Reais**. Rio de Janeiro, junho 2003, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio
- [10] Jorge Luiz Coutinho Diniz.- **Resistência de Dutos com Defeitos Usinados**. Rio de Janeiro, maio 2002, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio
- [11] API Recommended Practice 579, **Fitness for Service**, American Petroleum Institute, First Edition, jan.2000
- [12] Jaime Tupiassú P.C; Marco A. Meggiolaro.- **Fadiga sob Cargas de Serviço**. Primeira edição 2004.

- [13] Mendelson, Alexander.-**Plasticity: Theory and Application**. Segunda edição 1970
- [14] Nara Guidacci Berry.- **Avaliação de Propriedades Mecânicas e Adesivas de Resinas Epoxídicas com e sem Envelhecimento**. Rio de Janeiro, setembro 2004. Tese de Doutorado, Engenharia de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio.
- [15] Rita de Cásia Oliveira Marcelino Afonso.- **Adhesiveness Study of Polimeryc Matrix Composite Material for Pipelines Repair**. Laboratorio de Mateiais Compósitos, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil
- [16] Hart-Smith, J.L.- **Developments in Adhesives** – 2(ed. A. J. Kinloch) – Appl. Sci. Pub., London, 1981, pp.1.
- [17] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration – **Analitical** modeling od ASTM Lap Shear Adhesive Specimens. February 2003.
- [18] Dres. Juan José del Coz Díaz; D. Fco Jose Suarez Domínguez. E.T.S. Ingenieros Industriales – GIJON. <http://www.construccion.uniovi.es>
- [19] Abel Torres Andrews.- **Análise bidimensional da dinâmica de linhas flexíveis incluindo os efeitos do contato com o fundo marinho**. Rio de Janeiro, junho 2004, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [20] Ansys Release 10.0 Documentation, Ansys Tutorial.s
- [21] Catalogo do produto Araldite® AV 138M with Hardener HV 998, 2005
- [22] ASTM A 370 – 03a.- **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**.
- [23] J.L.F, Diniz, R.D. Vieira, J.L.F. Freire. – Stress and Strain Analysis of Pipelines with localized Metal Loss. Proceedings of the SEM International Congress on Experimental and Applied Mechanics, 2004
- [24] J.N. Reddy.- Mechanics of Laminated Composite Plates, Theory and Analysis. Department of Mechanical Engineering, University College Station, Texas
- [25] Repair of Composite Laminates DOT – Department of Transportation, Federal Aviation Administration, EUA.

Apêndices

A

Fator de eficiência de junta longitudinal soldada

Especificação de aço	Classe do tubo	E
API 5L (a norma fornece outras classificações)	Sem costura	1.00
	ERW (soldagem por resistência elétrica)	1.00
	EFW (soldagem por fusão)	1.00
	Arco submerso	1.00
	Forno-topo	0.60

B

Caracterização do Material Utilizado

Para a caracterização do material utilizado, se fizeram ensaios a tração no laboratório do Ituc da PUC-Rio, de oito corpos de prova, dos quais três são retirados do tubo na direção circunferencial, três da chapa de aço preto e dois da chapa inox 304, no sentido de laminação de chapa. As provetas foram feitas segundo a ASTM A 370-03a [22]. A geometria do corpo de prova para o ensaio a tração é mostrada na figura B.1

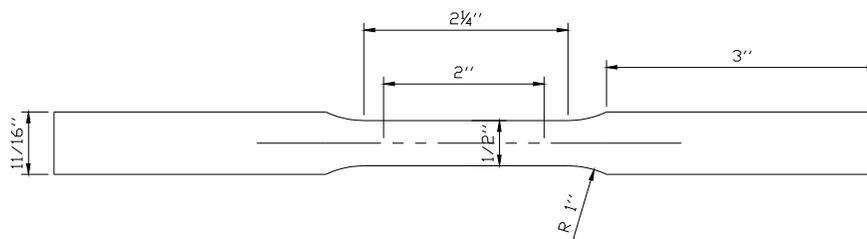


Figura B.1 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio a tração

Os resultados se mostram na tabela B.1 e na figura B.2

Tabela B.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova do ensaio a tração

Corpo de prova	Limite de escoamento MPa(Sy)	Resistência tração MPa (Su)	Alongamento(%)
DUTO CP 1 ⁽ⁱ⁾	256.81	307.52	36.0
DUTO CP2 ⁽ⁱ⁾	262.60	310.18	34.3
DUTO CP3 ⁽ⁱ⁾	260.11	309.81	36.4
CHAPA CP4 ⁽ⁱⁱ⁾	174.26	293.23	30.7
CHAPA CP5 ⁽ⁱⁱ⁾	167.70	295.10	35.0
CHAPA CP6 ⁽ⁱⁱ⁾	177.69	296.92	41,9
CHAPA CP7 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	296.94	818.27	98.9
CHAPA CP8 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	318.12	814.21	80.3

- (i) Tirados do duto no sentido circunferencial
- (ii) Tirados da chapa de aço baixo carbono no sentido de laminação
- (iii) Tirados da chapa de aço inoxidável 304 no sentido de laminação

Utilizam-se os dados dos espécimes DUTO CP2, CHAPA CP5 e CHAPA CP8 por serem os mais confiáveis.

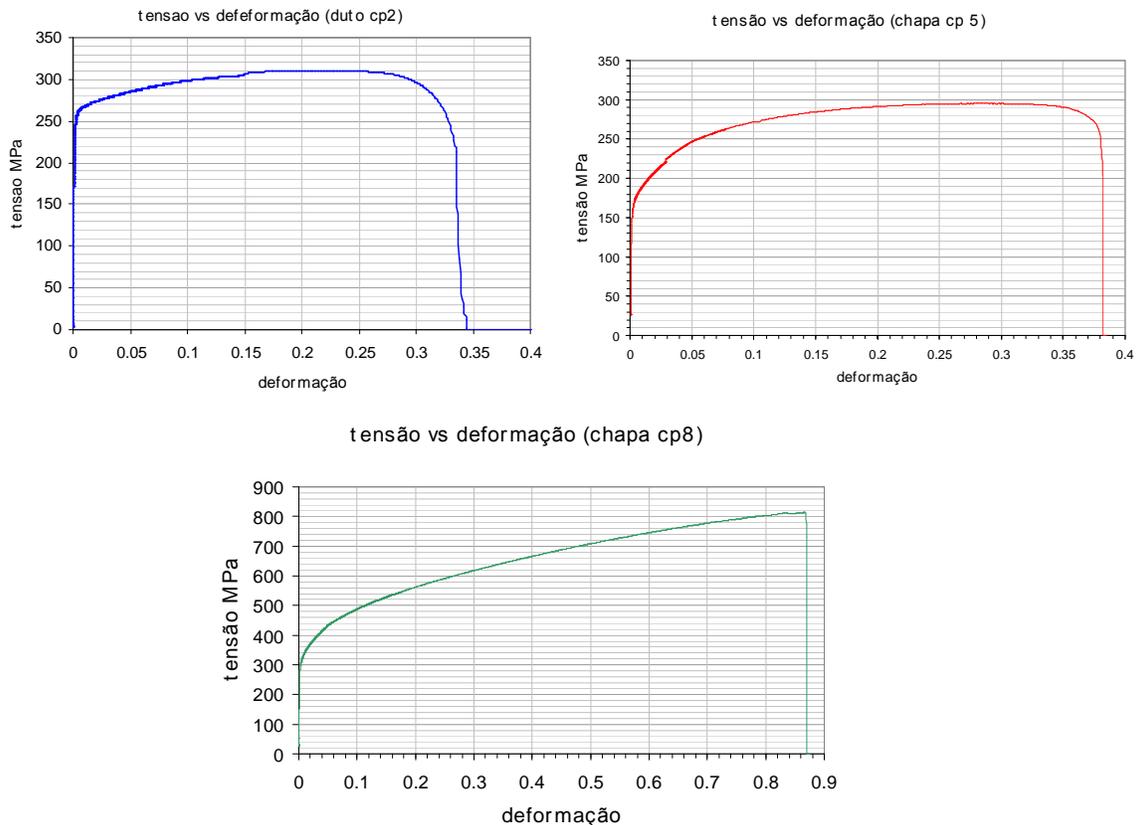


Figura B.2 - Gráficos tensão vs deformação dos corpos de prova de cada material

C

Determinação da Espessura Ideal da Camada Metálica no Reparo

Neste apêndice se continua com o estudo iniciado na seção 3.4.6. Na figura C.1 se mostram os resultados das tensões circunferenciais apresentadas na região do defeito para os modelos de 2, 3, 4, 5 e 6 camadas metálicas com igual espessura equivalente total (figura 3.25).

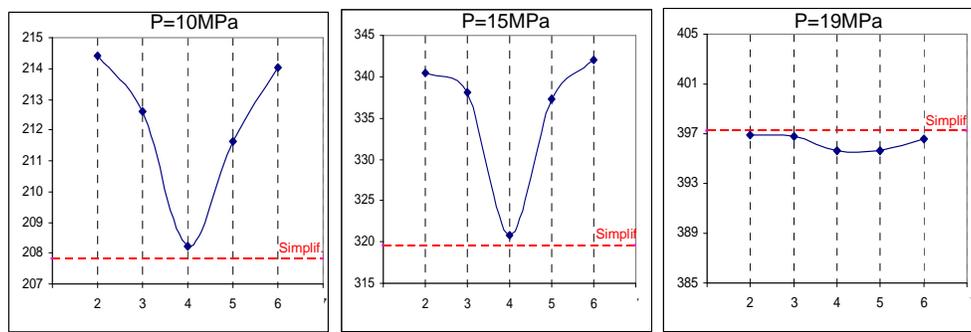


Figura C.1 – Tensões circunferências no defeito

Pode-se observar que o reparo que apresenta tensão circunferencial mais próxima à tensão apresentada no modelo simplificado, é o duto de quatro camadas metálicas. Pela distribuição de tensões circunferenciais nos cilindros de parede espessa pode-se entender que é inconveniente que as camadas metálicas fiquem mais afastadas a parede do duto, já que seu aporte de carga é menor. Isto acontece nos reparos que têm muitas camadas metálicas devido a maior espessura total das camadas de adesivo, como é o caso dos dutos de 6 e 5 camadas, em comparação ao duto de 4 camadas metálicas no reparo, ocasionando assim que a região do defeito trabalhe mais. Isto é válido para todos os reparos, como pode-ser ver na figura C.2.b num reparo de 2 camadas metálicas onde a tensão no defeito diminui na medida que se reduz a camada de adesivo, mas devido a interação de outras forças nos reparos de 2 e 3 camadas, diminuí seu rendimento mais do que acrescenta o fato de ter menos adesivo, já que, para o modelo sem espessura de camada de adesivo, se espera um comportamento igual ao duto de reparo

simplificado, mas não é bem assim, este apresenta uma tensão no defeito de 211,9 MPa maior aos 207,8MPa que apresenta o reparo simplificado.

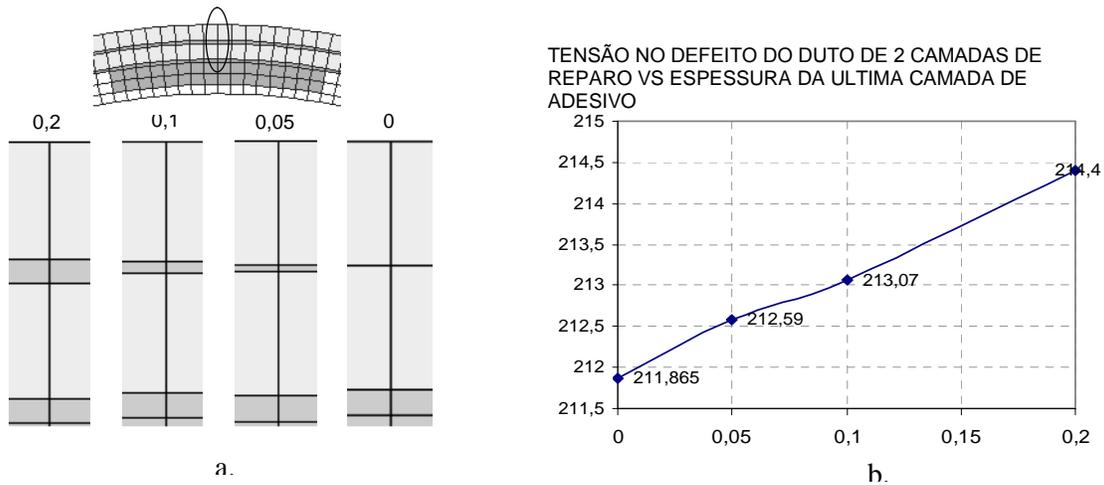


Figura C.2 – Variação da tensão com a variação na espessura da camada de adesivo.

O modelo de 2 camadas metálicas sem adesivo tem junções a 180° e 0°, em quanto que o modelo ideal não tem junção. Então, pode ser que a presença das junções origine uma distribuição irregular das tensões na circunferência do duto, afetando o rendimento do reparo. Isto se pode ver na figura C.3 onde se modelam dutos com reparo de 2, 3 e 4 camadas sem adesivo entre elas, sendo a de melhor desempenho a de 4 camadas, devido às junções das camadas metálicas ficam mais bem repartidas, logrando uma melhor distribuição das tensões na parede do duto.

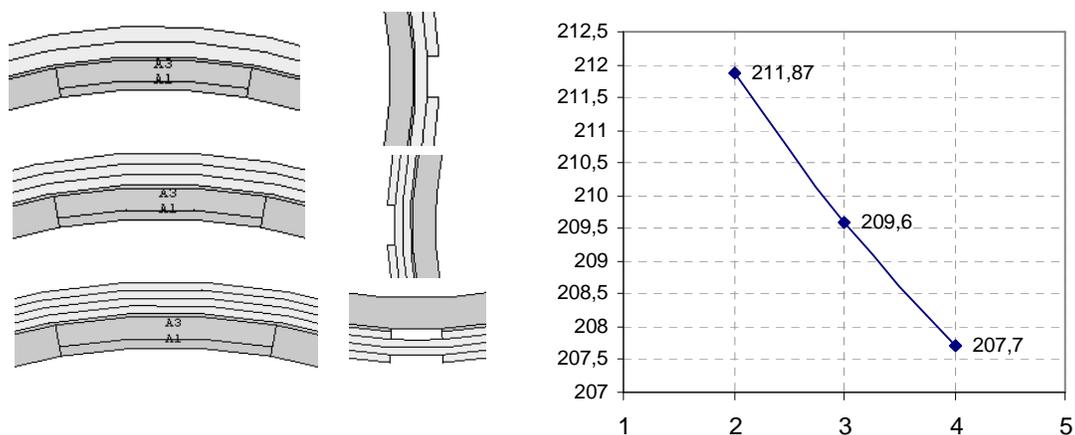


Figura C.3 – Modelos sm espessura de adesivo nas camadas.

A tendência das curvas da figura C.1 pode ser modificada se se resta o efeito das junções. Isto é feito modelando reparos de 2, 3 e 4 camadas convencionais, mas sem junção. A nova tendência destas curvas pode-se ver na figura C.4. Atribui-se a sua não linearidade ao aporte de carga do adesivo e outros fatores considerados irrelevantes no estudo.

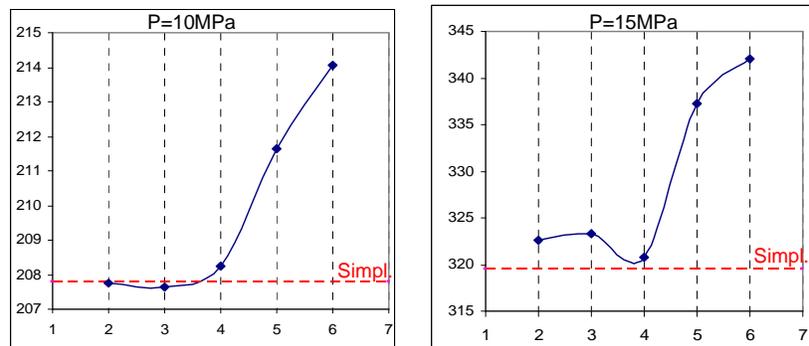


Figura C.4 – Comportamentos nos modelos sem junção.

D

Cálculo das Tensões a partir das Deformações Experimentais

Nesta seção, propõe-se um método para o cálculo das tensões a partir das deformações medidas na região do defeito. Devido à natureza das tensões, estas não podem ser medidas, mas sim calculadas. Este cálculo se complica quando se tem estados multiaxiais de tensões ou deformações.

Para a solução, dividem-se as curvas pressão vs deformação circunferencial dos testes dos espécimes tubulares e de a curva tensão vs deformação dos ensaios de tração, em três regiões. A primeira é a região elástica, que vai desde zero até o limite de proporcionalidade (neste trabalho se considera até 0.07% de deformação equivalente). A segunda é a região de transição, que se estende desde 0.07% a 0.25% de deformação equivalente. A terceira região é a plástica, vai desde 0.25% até 2% de deformação equivalente.

No cálculo das componentes equivalentes se faz as seguintes aproximações:

- $e_l \approx 0$, devido a os pequenos valores numéricos apresentados na região do defeito, já que, as regiões próximas do duto que não tem defeito, e o reparo, controlam e limitam a deformação longitudinal.
- $\delta e_l \ll \delta e_c$, no regime plástico se tem que os incrementos de deformação longitudinal são muito pequenos em comparação com os incrementos circunferenciais, pelo que são depreciáveis [23]
- $\sigma_r \approx 0$, a tensão radial se aproxima de zero por ser um duto de parede fina.

Este método não considera o efeito do encruamento do material, e então, não considera o aporte de deformação elástica em cada incremento de deformação após a ocorrência do limite proporcionalidade do material.

Na região elástica, se utilizam as equações constitutivas 2.10 para achar a tensão circunferencial a partir das deformações circunferenciais experimentais, e então achar a tensão equivalente. Outra forma trabalha diretamente com a curva tensão vs deformação do material, entrando com a deformação equivalente e achando tensão. As equações 2.10 para um cilindro no regime elástico se podem simplificar da seguinte forma:

$$e_l = \frac{1}{E} [\sigma_l - \mu(\sigma_r + \sigma_c)] \quad \text{usando } e_l \approx 0 \text{ e } \sigma_r \approx 0 \text{ se tem } \sigma_l = \mu\sigma_c$$

$$e_c = \frac{1}{E} [\sigma_c - \mu(\sigma_l + \sigma_r)] \quad \text{usando } \sigma_r \approx 0 \text{ e } \sigma_l = \mu\sigma_c \text{ se tem:}$$

$$\sigma_c = \frac{e_c \cdot E}{(1 - \mu^2)} \quad (\text{D.1})$$

$$e_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_c + \sigma_l)] \quad \text{usando } \sigma_r \approx 0, \sigma_l = \mu\sigma_c \text{ e a equação D.1, se tem:}$$

$$e_r = -e_c \frac{(\mu + \mu^2)}{(1 - \mu^2)} \quad (\text{D.2})$$

A tensão equivalente e a deformação equivalentes são:

$$\sigma_{eq-duto} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_c - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_c)^2}$$

$$e_{eq-duto} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_c - e_l)^2 + (e_l - e_r)^2 + (e_r - e_c)^2}$$

Estas equações, no regime elástico, podem ser escritas como funções da deformação circunferencial da seguinte forma:

$$\sigma_{eq-duto}^e = e_c \frac{E \cdot \sqrt{2\mu^2 - 2\mu + 2}}{\sqrt{2} \cdot (1 - \mu^2)} \quad (D.3)$$

$$e_{eq-duto}^e = e_c \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot (\mu + \mu^2)}{(1 - \mu^2)} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{3}{2}} \quad (D.4)$$

Onde se substitui $\mu = 0.29$ e $E = 212\,000$ MPa tem-se:

$$\sigma_{eq-duto}^e = (206264.93) \cdot e_c \quad (D.5)$$

$$e_{eq-duto}^e = (0.807) \cdot e_c \quad (D.6)$$

Com a equação D.5 e os valores de pressão relacionados a e_c , pode-se fazer o gráfico da tensão equivalente em função da pressão no regime elástica, ou, com a equação D.6 entra-se na curva tensão vs deformação do material, para achar-se a tensão equivalente.

Na região de transição as tensões são achadas por relação simples entre as deformações equivalentes dos testes dos espécimes tubulares, e as deformações equivalentes do ensaio de tração do material do duto. Para o cálculo das deformações equivalentes ainda são usadas as equações constitutivas da elasticidade, sem ter erro considerável, já que o único parâmetro presente na equação é o coeficiente de Poisson (por exemplo a equação D.3). No caso do cálculo das tensões equivalentes no corpo de prova do ensaio de tração, tem-se que $\sigma_1 \neq 0$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, então através das equações 2.10 pode-se achar que: $e_1 = -\mu \cdot e_2 = -\mu \cdot e_3$, o qual é aplicado na equação 2.14 para calcular a deformação equivalente.

$$e_{eq-tração} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \text{ na região de transição se reduz}$$

a:

$$e_{eq-tração}^t = \frac{2}{3}(1 + \mu).e_1 \quad (D.7)$$

esta equação também é válida na região elástica. Então, com $\mu = 0.29$, tem-se:

$$e_{eq-tração}^t = (0.86).e_1 \quad (D.8)$$

A deformação equivalente na região do defeito é achada com a equação D.6

$$e_{eq-duto}^t = (0.807).e_c$$

A relação das deformações equivalentes pode ser feita ponto a ponto e assim obter a tensão, ou, se pode achar uma linha de tendência que correlacione as deformações com as tensões facilitando o processo, o qual é muito útil quando se tem uma grande quantidade de dados por correlacionar. Recomenda-se a relação ponto a ponto, já que se obtém resultados mais precisos, sobretudo nos extremos de cada região.

No regime plástico se considera que cada incremento de deformação não tem aporte de deformação elástica. A tensão também é achada por correlação entre as deformações equivalentes do espécime tubular e do corpo do prova do ensaio de tração. Para o cálculo da deformação equivalente, se considera que as deformações plásticas ocorrem a volume constante ($\Delta e_c^p + \Delta e_l^p + \Delta e_r^p = 0$) e se consideram os incrementos de deformação plástica longitudinal desprezíveis ($\Delta e_l^p \approx 0$), já que estes são pequenos em comparação aos incrementos de deformação plástica circunferencial ($\delta e_l^p \ll \delta e_c^p$), então se tem que $\Delta e_c^p = -\Delta e_r^p$. Então, a equação para achar os incrementos de deformação equivalente só depende dos incrementos de deformação circunferencial, da seguinte forma:

$$\Delta e_{eq-duto}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta e_1^p - \Delta e_2^p)^2 + (\Delta e_2^p - \Delta e_3^p)^2 + (\Delta e_3^p - \Delta e_1^p)^2}$$

Então:

$$\Delta e_{eq-duto}^p = \frac{2\sqrt{3}}{3} . \Delta e_c^p$$

Tem-se a deformação equivalente total na região do defeito é igual a:

$$e_{eq-duto} = e_{eq}^e + e_{eq}^t + \sum .\Delta e_{eq-duto}^p$$

ou:

$$e_{eq-duto} = e_{eq-duto}^e + e_{eq-duto}^t + \sum \frac{2\sqrt{3}}{3} .\Delta e_c^p \quad (D.9)$$

No caso de um corpo de prova ensaiado à tração, tem-se:

$$\Delta e_{eq-tração}^p = \Delta e_1^p$$

Então a deformação equivalente total é igual a:

$$e_{eq-tração} = e_{eq-tração}^e + e_{eq-tração}^t + \sum .\Delta e_1^p \quad (D.10)$$

Aplica-se o procedimento ao duto de quatro camadas no reparo (DRC 006) para achar as tensões no defeito. Os resultados são mostrados na figura D.1.

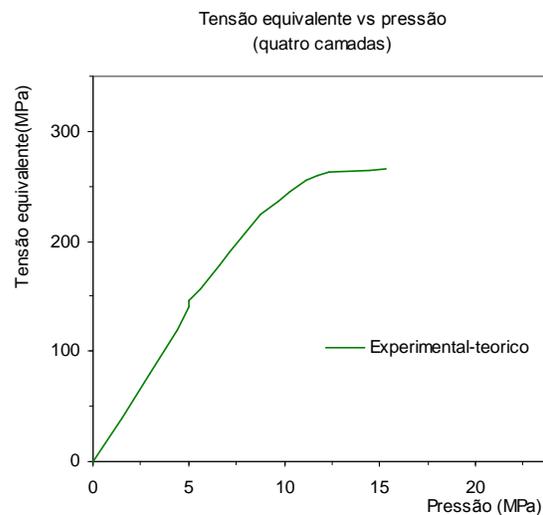


Figura D.1 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Este procedimento precisa ainda um estudo mais aprofundado, e avaliado com resultados experimentais. Recomenda-se obter curvas tensão vs deformação do material com a maior precisão possível, utilizando células de carga apropriadas para cada corpo de prova, assim como o dimensionamento exato do defeito, parâmetro onde pode se introduzir erro considerável pela dificuldade da sua medição. Estes possíveis erros podem ser muito relevantes, já que, no regime elástico, um pequeno incremento de deformação, apresenta um incremento considerável da tensão.

E**Variante da Técnica de Reparo Proposta**

Uma das principais limitações da técnica de reparo proposta é o tempo de aplicação do reparo, devido ao tempo de cura do adesivo para cada camada utilizada. Nesta seção se apresenta uma possível variante da técnica de reparo. Esta consiste em enrolar a chapa metálica ao tubo com adesivo epóxi, (a chapa foi previamente corta em forma de fita, figura E.1.a). Uma das vantagens deste método es que só precisa assegurar a camada metálica nos extremos (figura E.1.b), sem ter que colocar braçadeiras no médio do reparo, assim, pode-se enrolar outra fita metálica sem tirar as braçadeiras que asseguram a primeira fita metálica enrolada, quer dizer, que não precisa de esperar que o adesivo cure parcialmente camada traz camada.



Figura E.1 – Variante do método de reparo

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)