



Marco Antonio Pérez Rosas

**Avaliação de Modelos do Comportamento
de Reparos do Tipo Luva em Dutos com
Defeitos de Perda de Espessura**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro
Agosto de 2010



Marco Antonio Pérez Rosas

**Avaliação de Modelos do Comportamento
de Reparos do Tipo Luva em Dutos com
Defeitos de Perda de Espessura**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Luiz de França Freire
Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Alberto de Almeida
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luiz Cláudio de Marco Meniconi
CENPES/PETROBRAS

Profa. Ivani de Souza Bott
Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. Antonio Lopes Gama
Universidade Federal Fluminense

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 2010

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

Marco António Pérez Rosas

Graduou-se em Engenharia Mecânica Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - Perú em 2004. Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2006.

Ficha Catalográfica

Rosas, Marco Antonio Pérez

Avaliação de modelos do comportamento de reparos do tipo luva em dutos com defeitos de perda de espessura / Marco Antonio Pérez Rosas; orientador: José Luiz de França Freire.- 2010

v., 196 f.: il. (color) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Reparo. 3. Duto. 4. Camadas metálicas. 5. Material compósito. 6. Defeitos. 7. Perda de espessura. 8. Teste hidrostático. 9. Elementos finitos. I. Freire, José Luiz de França. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

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

Agradecimentos

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 pais, Nancy e Saúl, irmãos, Saúl, Guillermo e Carlos, avô don Guillermo e doña Isolina, e de mais familiares.

A Fernanda, pelo seu amor, carinho e paciência.

A meus amigos e sócios Léo e Jesús.

A meus amigos e colegas de laboratório, Maira, Luana, Sabrina, Gilmar, Jorge, Guillermo, Cristian, Hugo, Jaime que sem sua ajuda não teria concluído este trabalho, em especial ao sempre solícito Gerardo.

A meus amigos Jean, Adenilson e Clevson, companheiros de apartamento.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino.

Ao grande Sr. Garcia (viga) pela sua lição de vida.

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 Luiz de França. **Avaliação de Modelos do Comportamento de Reparos Tipo Luva em Dutos com Defeitos de Perda de Espessura**. Rio de Janeiro, 2010. 196p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Devido ao seu alto custo e à sua importância estratégica, a busca por soluções que estendam a vida útil das redes dutoviárias é plenamente justificável. Uma vez detectado um defeito, procura-se restabelecer sua capacidade operacional, reparando a seção danificada. A maioria dos estudos está orientada a determinar o comportamento de um duto reparado utilizando técnicas numéricas e/ou experimentais. Outros apresentam equações simples para o cálculo da espessura de reparo tentando garantir a segurança na operação, porém sem demonstrar o comportamento do mesmo. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia analítica para determinação do comportamento de dutos reparados por luvas metálicas coladas ou de material compósito. Esta metodologia permite também conhecer as pressões que ocasionarão o escoamento e falha, seja no duto ou no reparo. Acredita-se que com a utilização desta metodologia o projeto de um reparo será mais eficiente, permitindo escolher melhor o material e a espessura de reparo, segundo as exigências de cada projeto. São apresentados resultados de simulações numéricas com o propósito de conhecer o comportamento, otimizar o dimensionamento e avaliar os resultados obtidos analiticamente para estes tipos de reparos. Por fim, é apresentado um estudo de caso, resultados de testes experimentais e um exemplo de aplicação para a determinação da espessura de reparo. Com isto foi possível conhecer os comportamentos não estudados numericamente, e mostrou-se que, o controle das deformações no defeito dependerá do módulo de elasticidade e da espessura do reparo, como era esperado.

Palavras – chave

Reparo; duto; camadas metálicas; material compósito; defeitos; perda de espessura; teste hidrostático; elementos finitos

Abstract

Pérez Rosas, Marco Antonio; Freire, José Luis de França (Advisor). **Evaluation of Sleeve Type Repair Models for Pipelines with Thickness Loss Defects**. Rio De Janeiro, 2010. 196p. Doctoral Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

Due to their high cost and strategic importance, the search for solutions to extend the life cycle of pipeline networks is fully justifiable. Once a defect is detected, an attempt is made to restore operational capacity, repairing the defective section. Most studies are aimed at determining the behavior of a repaired pipe by using numerical and/or experimental techniques. Others present simple equations for the calculation of repair thickness trying to ensure a safe operation, yet without demonstrating the behavior of the pipe. In this study, an analytical methodology has been developed to determine the behavior of pipes repaired by attached metal sleeves or sleeves of composite material. This methodology also enables to know the stresses which may cause leakage and failure, be it on the pipe or on the repair area. It is believed that by using this methodology the project of a repair would be more efficient, enabling a better choice of repair material and thickness, according to the requirements of each project. Numerical simulation results are presented with the purpose of knowing the behavior, optimizing the sizing and assessing the results obtained analytically for this kind of repairs. Finally, a case study is presented, with the results of experimental tests and an example of application for determining repair thickness. This way it was possible to know behaviors that had not been studied numerically, and it was demonstrated that the control of defect deformations will depend on the elastic modulus and thickness of the repair, as was expected.

Keywords

Repair; pipeline; pipe; multilayers; epoxy resin; loss of thickness; corrosion; adhesive; hydrostatic test; extensiometria; finite elements.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Objetivo	21
1.2. Considerações Iniciais	21
1.3. Trabalhos Anteriores	22
1.4. Motivação	27
1.5. Roteiro da Dissertação	28
2. Fundamentação Teórica	29
2.1. Reparos para Dutos	29
2.1.1. Tipos de Reparos	30
2.2. Normas para Projeto de Reparos de Material Compósito	45
2.2.1. Norma ISO/TS 24817	46
2.2.2. Norma ASTM PCC-2	49
2.2.3. Outras Referências	50
2.3. Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos	51
2.3.1. Junta Colada	51
2.3.2. Projeto de Junta	52
2.3.4. Tratamento Superficial	53
2.3.5. Adesivos Estruturais	55
2.3.6. Seleção de Adesivos	56
2.4 Resistência de Materiais	57
2.4.1. Elasticidade em Cilindros	57
2.4.2. Noções Básicas da Plasticidade	59
2.4.3. Tensões em Dutos sem Defeitos	62
2.4.4. Equações Semi-Empíricas para Duto com Defeitos de Corrosão	63
2.5. Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando o Critério RSF da API 579	65

2.6. Regra das Misturas	66
3. Modelagem Numérica	67
3.1. Introdução	67
3.2. Detalhes dos Modelos Desenvolvidos	68
3.3. Variação da Espessura de reparo	74
3.3.1. Comparação de resultados	75
3.4. Variação do Comprimento do Defeito	80
3.5. Variação do Comprimento do Reparo	83
3.5.1. Reparo de Defeitos Longos com Reparos Adjacentes	89
3.6. Simulação de um Duto Reparado com Material Compósito	90
4. Modelagem Analítica	92
4.1. Descrição do Problema	92
4.2. Modelagem Analítica do Reparo de um Duto com Defeito	92
4.2.1 Determinação das equações que governam o comportamento de um duto reparado	92
4.2.2 Aplicação das equações nas regiões de comportamento elasto-plástico de um duto reparado	98
4.2.3 Comparação dos Resultados	111
4.3. Reparo para Defeitos com Comprimento não Infinito	113
4.4. Formulação para Reparos Aplicados em Dutos Ativos	124
4.5. Formulação para Reparo de Material Compósito	131
4.5.1 Comparação dos Resultados	140
4.5.2 Recomendações para Projeto de Reparos de Material Compósito	141
5. Estudos de Caso e Aplicação	142
5.1. Estudo de Caso : Testes Experimentais em Dutos em Escala Real	142
5.1.1 Comparação Numérica - Experimental	149
5.1.2 Comparação Numérica – Analítica	151
5.2. Testes Experimentais em Dutos em Escala Reduzida	152

5.3. Caso de Aplicação: Determinação da Espessura de Reparo	163
6. Conclusões	168
Bibliografia	171
Anexos	179
A. Adesivos	179
B. Formulações do Modelo Analítico	179
C. Dispositivo Experimental	194
D. Comparações Adicionais	196

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Processos na instalação de um novo trecho de duto	31
Figura 2.2 – Defeito interno reparado com deposição de solda externa	32
Figura 2.3 – Preenchimento da perda do material na superfície do duto a ser reparado	34
Figura 2.4 – Reparo de dupla calha soldada tipo A	35
Figura 2.5 – Reparo de mangas enchidas de epóxi	36
Figura 2.6 – Reparo de dupla manga soldada tipo B	37
Figura 2.7 – Variantes do reparo de dupla calha soldada tipo B	38
Figura 2.8 – Comparação entre as resistências mecânicas de fibras comerciais	39
Figura 2.9 – Tipos de material compósito formado por fibra de vidro	40
Figura 2.10 – Curva de resistência vs tempo nos materiais compósitos	42
Figura 2.11 – Reparos utilizando a marca comercial Armor Plate Pipe Wrap	43
Figura 2.12 – Abraçadeiras mecânicas	44
Figura 2.13 – Hot tapping	45
Figura 2.14 – Tipos de falhas nas juntas coladas	52
Figura 2.15 – Tipos de carregamentos	52
Figura 2.16 – (i) Equilíbrio de forças num ponto. (ii) Deslocamentos e deformações num ponto	58
Figura 2.17 – Estudo incremental	60
Figura 3.1 – Elementos 3D	69
Figura 3.2 – Curvas bilineares tensão vs deformação	69

Figura 3.3 – Comparação entre modelos de material BE e ME	71
Figura 3.4 – Curvas de material BE e ME	71
Figura 3.5 – Dimensões dos modelos numéricos	72
Figura 3.6 – Dimensões dos modelos numéricos	73
Figura 3.7 – Condições de contorno	73
Figura 3.8 – Relação quando os nós da espessura da parede alcança o S_u	74
Figura 3.9 – Modelo analisado no ANSYS v.11.0	74
Figura 3.10 – Comprimento e distribuição das camadas metálicas	75
Figura 3.11 – Comparação entre dutos reparados com defeitos de 40 e 120 mm de comprimento, utilizando reparo de 2mm de espessura em ambos os casos:	81
Figura 3.12 – Comparação entre modelos com defeitos de 40 e 80 mm de comprimento, utilizando o reparo de 1mm de espessura em ambos os casos	82
Figura 3.13 – Comprimento e distribuição das camadas metálicas. À direita mostra-se o reparo com extremos escalonados	83
Figura 3.14 – Distribuição das tensões normalizadas v_M para uma pressão de 10MPa (defeito de 40mm)	85
Figura 3.15 – Distribuição das tensões normalizadas v_M a uma pressão de 10MPa (defeito de 40mm).	86
Figura 3.16 – Modelo de duto com defeito e sem reparo	87
Figura 3.17 – Distribuição das tensões circunferenciais normalizadas	87
Figura 3.18 – Tensões cisalhantes máximas no adesivo	88
Figura 3.19 – Modelos com e sem reforço entre as mangas adjacentes	89
Figura 3.20 – Comprimento e distribuição das camadas metálicas	89
Figura 3.21 – Tensão von Mises variando com a pressão interna no duto reparado com material compósito	91

Figura 4.1 – Distribuição das tensões na parede do duto reparado (*calculada utilizando os elementos finitos)	93
Figura 4.2 – Modelos de materiais. Reparos fabricados com material compósito serão considerados na seção 4.5	98
Figura 4.3 – Regiões do comportamento	99
Figura 4.4 – Possíveis comportamentos de um duto com reparo metálico	101
Figura 4.5 – Estado de tensões e deformações num ponto do defeito de um duto	102
Figura 4.6 – Erro nas aproximações das tensões von Mises	104
Figura 4.7 – Aplicação geral de incrementos de carga	105
Figura 4.8 – Aplicação geral de incrementos de carga 2	106
Figura 4.9 – Aplicação de incrementos num duto reparado	107
Figura 4.10 – Efeito da variação da espessura do reparo e pressões que originam o escoamento e a falha dos espécimes calculadas analiticamente	111
Figura 4.11 – Comparação dos comportamentos dos modelos numéricos e analíticos	113
Figura 4.12 – Modelo com defeito de 40mm de comprimento	116
Figura 4.13 – Modelo numérico de um duto com defeito e sem reparo	120
Figura 4.14 – Comparação dos resultados numérico-analíticos de um duto com defeito e sem reparo	121
Figura 4.15 – Esquema do comportamento de um duto com defeito e sem reparo	122
Figura 4.16 – Comparação entre as simulações numéricas e as equações desenvolvidas para um duto com defeito e sem reparo	123
Figura 4.17 – Efeito da variação do comprimento do defeito para um duto reparado com 1.5mm de espessura de reparo	124
Figura 4.18 – Comportamento de um duto reparado a uma pressão interna P_i	125

Figura 4.19 – Aplicação de incrementos num duto reparado com pressão interna	127
Figura 4.20 – Possíveis comportamentos de um duto com reparo metálico e com pressão interna na instalação diferente de zero	128
Figura 4.21 – Comparação entre um duto reparado a uma pressão interna de 4MPa e outro reparado sem pressão interna. O sinal “\” significa paralelismo para as retas	130
Figura 4.22 – Efeito da variação na pressão de instalação do reparo	131
Figura 4.23 – Interferência de cilindros	133
Figura 4.24 – Modelos de materiais para duto reparado com material compósito	136
Figura 4.25 – Regiões do comportamento de um duto reparado com material compósito	137
Figura 4.26 – Possíveis comportamentos de um duto com reparo de material compósito e com pressão interna na instalação que pode ser diferente de zero	139
Figura 4.27 – Comparação dos resultados das simulações numéricas com o modelo analítico proposto	140
Figura 5.1 – Dimensões dos espécimes tubulares	143
Figura 5.2 – Localização dos extensômetros	143
Figura 5.3 – Deformações na região do defeito para o reparo de fibra de carbono	144
Figura 5.4 – Deformações corrigidas na região do defeito para o reparo da fibra de carbono	145
Figura 5.5 – Comparação das deformações no defeito para os espécimes reparados com fibra de carbono e fibra de vidro	146
Figura 5.6 – Comparação das deformações na janela e no defeito fora da janela nas diferentes camadas de reparo	146
Figura 5.7 – Comparação das deformações na parede do duto	147
Figura 5.8 – Comparação das deformações na 9ª camada de reparo	147

Figura 5.9 – Deformações nas diferentes camadas do reparo localizadas na janela do defeito	148
Figura 5.10 – Junção da figura 5 na figura 1	148
Figura 5.11 – Curva discretizada do material do duto utilizado	149
Figura 5.12 – Comparação Numérico –experimental	150
Figura 5.13 – Comparação Numérica – analítica	152
Figura 5.14 – Aplicação do reparo de chapa metálica	153
Figura 5.15 – Dimensões dos espécimes tubulares reparados com chapa metálica: método A e B	154
Figura 5.16 – Gráfico volume de água injetado vs pressão interna	155
Figura 5.17 – Instrumentação do espécime tubular	159
Figura 5.18 – Deformações vs pressão interna no espécime reparado com material compósito	159
Figura 5.19 – Comparação das deformações no reparo de chapa metálica e material compósito	160
Figura 5.20 – Gráfico pressões vs deformações adimensionais	160
Figura 5.21 – Comportamento do duto reparado com o material compósito, fibra de vidro e de carbono	164
Figura 5.22 - Comportamento do duto reparado com chapas metálicas coladas: chapa de baixo carbono, de material igual ao duto e de alta resistência	166
Figura C.1 - Esquema do sistema de pressão	194
Figura C.2 - Sistema de aquisição de dados	195
Figura D.1 - Comparação das deformações no defeito e fora do reparo	196
Figura D.2 - Comparação Numérico -experimental considerando a 3° e 9° camada do reparo localizadas a 90° da janela do defeito	196

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classes para reparos de material compósito	46
Tabela 2.2 – Documentação requerida por norma para cada classe de reparo	46
Tabela 2.3 – Propriedades de testes requeridos segundo norma	48
Tabela 2.4 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo	57
Tabela 2.5 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito	64
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do duto e chapa – bilinear	70
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do duto e chapa – multilinear	70
Tabela 3.3 – Pressões que originam o escoamento e a falha dos modelos	75
Tabela 3.4 – Comparação entre as pressões de escoamento e de ruptura obtidas numérica e experimentalmente	79
Tabela 3.5 – Pressões que originam o escoamento e a falha dos modelos	81
Tabela 3.6 – Pressões que originam o escoamento e a falha nos modelos numéricos	82
Tabela 3.7 – Tensões e deformações no centro dos defeitos a $P=18\text{MPa}$	85
Tabela 3.8 – Tensões e deformações no centro dos defeitos a $P=18\text{MPa}$ (2)	86
Tabela 3.9 – Propriedades do material compósito	90
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo analítico	110
Tabela 4.2 – Propriedades geométricas utilizadas no modelo	

analítico	110
Tabela 4.3 – Comparação entre as pressões de escoamento e de ruptura obtidas analiticamente, numérica e experimentalmente	112
Tabela 4.4 – Métodos para o cálculo de M	115
Tabela 4.5 – Comparações entre modelos analíticos e numéricos (L= 40mm, e=1mm)	117
Tabela 4.6 – Efeito do parâmetro $1-d/tM$ nos resultados analíticos (L=40mm, e=1mm)	117
Tabela 4.7 – Comparações entre modelos analíticos e numéricos (L= 120mm, e=1.5mm)	117
Tabela 4.8 – Efeito do parâmetro $1-d/tM$ nos resultados analíticos (L=120mm, e=1.5)	118
Tabela 4.9 – Comparações entre modelos analíticos e numéricos (L= 80mm, e=1.5mm)	118
Tabela 4.10 – Efeito do parâmetro $1-d/tM$ nos resultados analíticos (L=80mm, e=1.5)	118
Tabela 5.1 – Propriedades do material compósito	149
Tabela 5.2 – Propriedades do material do duto utilizado	149
Tabela 5.3 – Propriedades geométricas e dos materiais	151
Tabela 5.4 – Resultados dos testes nos dutos reparados com chapa metálica	154
Tabela 5.5 – Propriedades das resinas epóxi utilizadas segundo fornecedores	155
Tabela 5.6 – Propriedades da fibra de carbono segundo fornecedor	156
Tabela 5.7 – Características dos espécimes tubulares	156
Tabela 5.8 – Resultados dos testes nos dutos reparados com material compósito.	157
Tabela 5.9 – Características do espécime tubular	158
Tabela 5.10 – Características dos espécimes tubulares	161
Tabela 5.11 – Comparação dos resultados: reparo de chapa metálica e reparo de material compósito	162

Tabela 5.12 – Propriedades da fibra de vidro e carbono	164
Tabela 5.13 – Propriedades das chapas metálicas	165
Tabela A.1 - Adesivos epóxis encontrados na indústria	179
Tabela A.2 - Adesivos epóxis híbridos	180
Tabela A.3 - Adesivos anaeróbicos, acrílicos modificados e poliuretanos.	180
Tabela A.4 – Propriedades de adesivos estruturais utilizados na colagem de metais	181

Lista de Símbolos

- P_{eq} : pressão de projeto (no caso de não existir outros carregamentos adicionais)
- P_s : pressão de defeito (máxima pressão de defeito admissível).
- σ_{eq}^e : tensão equivalente no regime elástico
- σ_i : tensão na direção principal “i”
- e_i : deformação na direção principal “i”
- Δe_i^p : incremento de deformação plástica na direção “i”
- S_y : limite de escoamento do material
- S_u : limite de ruptura do material
- S_{flow} : resistência ao colapso plástico
- A : área longitudinal de material perdido
- A_0 : área longitudinal da seção com defeito
- M : fator de Folias
- 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.
- $MAWP_r$: máxima pressão de operação admissível do componente com defeito.
- ρ_c : densidade do compósito
- ρ_m : densidade da resina o matriz
- ρ_f : densidade da fibra
- f_f : fração volumétrica de fibra
- f_m : fração volumétrica de resina o matriz
- E_d : módulo de elasticidade do duto
- E_r : módulo de elasticidade do reparo
- E_c : módulo de elasticidade do adesivo
- E_m : módulo de elasticidade da mescla (reparo-adesivo)
- E_{mt} : módulo de elasticidade tangencial da mescla reparo-adesivo
- E_{mr} : módulo de elasticidade radial da mescla reparo-adesivo
- E_t : módulo de elasticidade tangencial do reparo
- μ_d : coeficiente de Poisson do duto

μ_r : coeficiente de Poisson do reparo

μ_c : coeficiente de Poisson do adesivo

μ_{mr} : coeficiente de Poisson tangencial radial da mescla reparo-adesivo

$\sigma_{circ\ d}$: tensão circunferencial no duto

$\sigma_{circ\ r}$: tensão circunferencial no reparo

$\sigma_{circ\ c}$: tensão circunferencial no adesivo

P_1 : pressão interna inicial

P_o : pressão de interferência entre o duto e o adesivo

P_a : pressão de interferência entre o adesivo e o reparo

t : espessura da parede do duto

$t.C$: profundidade do defeito

h : profundidade do defeito

r : raio interno do duto

L : comprimento do defeito

σ_c : tensão circunferencial

σ_{vM} : tensão de von Mises