



João Luis Batista da Silva

**Considerações sobre a Modelagem de
Conexões para Reparo de Dutos**

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: José Luiz de França Freire

Co-orientador: Teresinha do Menino Jesus Alves

Rio de Janeiro
Julho de 2008



João Luis Batista da Silva

Considerações sobre a Modelagem de Conexões para Reparo de Dutos

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

Prof. José Luiz de França Freire
Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dra. Teresinha do Menino Jesus Alves
Co-orientador
PETROBRAS

Prof. Carlos Alberto Almeida
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Alexandre Santos Hansen
PETROBRAS

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

Rio de Janeiro, 24 de Julho de 2008.

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

João Luis Batista da Silva

Graduou-se em Engenharia Mecânica na FTESM (Fundação Técnica-Educacional Souza Marques) em 1992. Cursou Engenharia de Dutos na PUC-Rio em 2001. Atuou nas áreas de projeto de instalação de estruturas submarinas e no grupo multi-cliente de avaliação de integridade de dutos e equipamentos submarinos. Participou de cursos e congressos, no Brasil, na área de engenharia de dutos. Trabalha com suporte técnico em projetos de instalação de estruturas submarinas (dutos rígidos, plataformas e manifolds) e análise de integridade estrutural de dutos e equipamentos submarinos na Petrobras/Engenharia.

Ficha Catalográfica

Silva, João Luis Batista da

Considerações sobre a modelagem de conexões para reparo de dutos / João Luis Batista da Silva ; orientador: José Luiz de França Freire ; co-orientadora: Teresinha do Menino Jesus Alves. – 2008.

168 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dutos. 3. Defeitos de corrosão. 4. Reparo. 5. Avaliação estrutural. 6. Métodos de avaliação. I. Freire, José Luiz de França. II. Alves, Teresinha do Menino Jesus. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Ao meu querido Pai João Batista da Silva.

Falecido em 06 de Junho de 2008

*“Jamais permita que tudo aquilo que possa tirar o brilho dos seus olhos,
o diminuam, fazendo arrefecer a força que existe dentro de você!”*

Às minhas amadas, esposa Maria Verônica e filhas Mariana e Maria Clara
que em um dia difícil me enviaram essa mensagem

Para a glória do Grande Arquiteto do Universo

Agradecimentos

Ao Professor José Luiz da França Freire, pela orientação e aprendizado durante o curso de Engenharia de Dutos e na elaboração da tese.

À minha Co-orientadora Teresinha do Menino Jesus Alves, pela paciência, generosidade em transferir conhecimentos adquiridos em vários anos de pesquisa, pela orientação e oportunidade de desenvolver este trabalho ao seu lado.

Ao professor Carlos Almeida, pela atenção durante as explicações em Elementos Finitos.

Ao amigo Alexandre Santos Hansen pela orientação nos aspectos relacionados a Elementos Finitos, bem como pelo incentivo, apoio e disposição, mesmo durante o final da gestação e o nascimento dos seus filhos.

Ao amigo Ricardo Martins pela paciência durante a orientação em programação, bem como pelo incentivo, apoio e disposição apesar dos seus diversos afazeres e viagens.

À minha mulher Maria Verônica que com sua firmeza, paciência e compreensão soube incentivar nos momentos difíceis e tornar este período o mais leve possível, mesmo fazendo sacrifícios pessoais.

Às minhas filhas Mariana Batista e Maria Clara Batista, pela compreensão das minhas faltas e falhas e por me ensinarem que a vida deve ser uma eterna alegria.

Aos meus pais que sempre me incentivaram em meus estudos, me deixando a vontade para traçar meu caminho. Em especial à minha mãe que, mesmo com a ausência do meu Pai, continuou a me incentivar.

Aos meus Gerentes na Petrobras, Aristóteles Bassin, Roberto Gonçalves e Jansem Ferreira pelo incentivo à obtenção do mestrado e autorização para realização do curso.

Aos meus Gerentes Setoriais na Petrobrás, Marcelo Teixeira, Pedro Perez e Sérgio do Nascimento, que souberam compreender a necessidade de imersão e dedicação para cursar as disciplinas e elaborar a dissertação.

Aos amigos do CENTRO de PESQUISAS da PETROBRAS, Almir Cardoso, Carlos Cheapim e Daniel Adolpho, Aline de Azevedo, Kleber de Carvalho, Luis Meniconi, Válber Perrut, Divino José, Dauro Braga que me ajudaram durante a realização dos ensaios e discussão dos resultados. Agradeço principalmente ao engenheiro Ricardo Beltrão (Gerente de P&D), pela liberação para uso das instalações do Centro de Pesquisa.

Aos amigos da ENGENHARIA da PETROBRAS, Luís Gustavo Nogueira, Bruno Cunha, Cláudia Peri, Mauro Thomaz, Julho César Simas e Manuel Henrique pela ajuda com dados de materiais citados nesta dissertação e incentivo.

Aos amigos da PUC-RIO Marco Antonio Pérez Rosas, Maria Maira, Sérgio Ibajé, José de Jesús Leal Carvajalino, Sully e Leonardo Dantas Rodrigues, pela acolhida e pelos bons momentos vividos.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela presteza e atendimento.

A todos que não foram citados acima, porém que tiveram participação na elaboração da minha dissertação.

Resumo

Silva, João Luis Batista da; Freire, José Luiz de França. **Considerações sobre a Modelagem de Conexões para Reparo de Dutos**. Rio de Janeiro, 2008, 168p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A redução de espessura de parede de dutos, causada por corrosão, é um dos defeitos que mais afetam a integridade dos mesmos. Este defeito pode ocorrer no metal base, nas soldas longitudinais e circunferenciais. Com a expansão do número de dutos rígidos instalados no fundo do mar e o avançado tempo de uso, a indústria de petróleo tem desenvolvido diversas ferramentas de reparo desses dutos, sem comprometer a segurança e a perda da produção. O objetivo preliminar desse trabalho foi o estudo e a geração de modelos computacionais, os quais uma vez parametrizados, possam servir como ferramenta para análise de conexões de reparo de dutos submarinos. No decorrer desse estudo, sobre dois tipos de conexões de reparo, foi percebido que o comportamento na falha, descrito pelos modelos numéricos das mesmas, possui detalhes que precisavam ser esclarecidos em complementação ao programa experimental adotado (Alves,1995). Uma fase dessa pesquisa constou o trabalho de laboratório no qual repetiu-se a confecção da mistura de resina epóxi e cimento, segundo as referencias adotadas no programa experimental de Alves e realizaram-se ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos moldados com essa mistura visando o levantamento de curva tensão *versus* deformação e determinação do coeficiente de Poisson. Outra fase dessa pesquisa foi a consulta de diversos outros trabalhos que indicassem o comportamento dessa mistura, quando submetida à compressão. Por fim, foram gerados modelos analíticos e numéricos da conexão de reparo. Seus resultados foram comparados com os resultados obtidos no programa experimental de Alves. Com base nessa comparação foram levantadas as discrepâncias dos resultados, bem como as possíveis causas dessas discrepâncias e suas possíveis razões e sugestões para se alcançar o objetivo inicial foram indicadas.

Palavras-chave

Dutos; defeitos de corrosão; reparo; avaliação estrutural; métodos de avaliação.

Abstract

Silva, João Luis Batista da; Freire, José Luiz de França (Advisor).
Considerations on the Modeling of Connections for Repair of Pipelines.
Rio de Janeiro, 2008, 168p. MSc. Dissertation – Departamento de
Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The reduction of pipeline wall thickness caused by corrosion is one of the defects that more affect pipeline structural integrity. These defects can take place in the metal base, in the longitudinal and circumferential welding. With the expansion of the rigid submarine pipelines mesh already installed and considering the advanced time of using, the oil industry has been developing several tools for pipeline repair without compromising the safety and avoiding production stops. The preliminary objective of this work was the study and the generation of computer models, which once parameter, they could be a tool for analyze the repair connection of submarine pipeline. During this study, about two types of repair connection, it was realized that the behaviour at failure described by the connection numerical models has details which needed to be explained in addition to the considered experimental program (Alves). One phase of this research was the laboratory works in which it was possible to repeat the mixture of epoxi resin and cement, according to the references adopted in the experimental program (Alves). Compression test were conducted on cylindrical specimens made of this mixture for determining the stress-strain curve and the Poisson coefficient. Another phase of this research was the consulting of other works which could indicate the expected behaviour of the mixture subjected to the compression load. Finally, analytical and numerical models of repair connection were generated the results were compared with those obtained on experimental program (Alves) Based on comparison, discrepancies were detected as well as they possible causes. Suggestions to obtain the initial objective were indicated.

Keywords

Pipelines; corrosion defects; long-seam welds; structural assessment; assessment methods.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Histórico do crescimento da produção de petróleo no Brasil	13
1.2. Sistemas de reparo estrutural de dutos submarinos	14
1.3. Objetivo da dissertação	17
2. Revisão bibliográfica	18
2.1. Reparos de dutos	18
2.2. Estudos preliminares sobre conexões de reparo	19
2.2.1. Análise das tensões principais em dutos	19
2.3. Correlação de tensões entre dutos e conexões de reparo	22
2.4. Estudo do comportamento de juntas sobrepostas	25
2.4.1. Mecanismo de adesão	25
2.4.2. Análise de tensões de juntas sobrepostas	28
2.4.3. Comportamento mecânico de juntas sobrepostas	29
2.4.4. Modos de falhas em juntas unidas por adesão	32
3. Conexões de reparo injetadas com mistura de resina epóxi e cimento	34
3.1. Introdução	34
3.2. Materiais	34
3.3. Ensaio de compressão axial	40
3.3.1. Definição de equipamentos e execução do ensaio	40
3.3.2. Metodologia para encontrar os resultados dos ensaios	45
3.3.3. Diagrama tensão versus deformação	49
4. Resultados experimentais considerados	51
4.1. Introdução	51
4.2. Resultados do programa experimental	53
4.2.1. Deslocamento relativo	53

4.2.2. Deformações longitudinais e circunferenciais	54
4.3. Análise dos resultados do programa experimental de Alves	56
5. Modelagem analítica da conexão de reparo sem shear keys – A1	60
5.1. Introdução	60
5.2. Construção do modelo analítico	61
5.2.1. Modelagem analítica para ZONA-1 e ZONA-3	62
5.2.2. Modelagem analítica para ZONA-2	63
a. Análise do deslocamento na mistura	63
b. Análise do deslocamento do conjunto tubo-mistura-luva	67
c. Ajuste do modelo analítico com os resultados experimentais	72
d. Resultado do modelo analítico	76
6. Modelagem numérica da conexão de reparo sem shear keys – A1	77
6.1. Introdução	77
6.2. Conexão Sem Elemento de Contato (A1-SEC)	78
6.2.1. Características da modelagem	78
6.2.2. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais	80
a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo	81
b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial	82
c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformação	84
6.2.3. Análise das tensões no modelo numérico	87
a. Diagrama de Tensões Cisalhantes	87
b. Diagrama de Tensões Radiais	89
6.3. Conexão Com Elemento de Contato (A1-CEC)	90
6.3.1. Características da modelagem	94
6.3.2. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais	98
a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo	98
b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial	99
c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformação	100

6.3.3. Análise das tensões no modelo numérico	103
a. Diagrama de Tensões Cisalhantes	103
b. Diagrama de Tensões Radiais	105
6.4. Ajuste do modelo numérico com Elemento de Contato (A1-CEC-fkn56)	107
6.4.1. Características da modelagem	107
6.4.2. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais	108
a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo	108
b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial	110
c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformação	111
6.4.3. Análise das tensões no modelo numérico	115
a. Diagrama de Tensões Cisalhantes	115
b. Diagrama de Tensões Radiais	117
c. Comparação entre tensões cisalhantes dos modelos ajustados e não-ajustados	118
6.5. Mecanismo de redistribuição de tensões	119
6.5.1. Comparação das deformações do modelo	125
a. Simulação de Perda de Aderência	125
b. Simulação da redução da tensão de ruptura da mistura	128
c. Simulação da variação do Coeficiente de Poisson da mistura	130
7. Modelagem numérica da conexão de reparo com shear keys – A2	132
7.1. Introdução	132
7.2. Conexão Com Elemento de Contato (A2-CEC)	132
7.2.1. Características da modelagem	133
7.2.2. Comparação dos resultados numéricos com os Experimentais	134
a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo	134
b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial	135
c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformação	136
7.2.3. Análise das tensões no modelo numérico	139
a. Diagrama de Tensões Cisalhantes	139

b. Diagrama de Tensões Radiais	142
7.3. Ajuste do modelo numérico Com Elemento de Contato (A1-CEC-fkn56)	143
7.3.1. Características da modelagem	144
7.3.2. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais	145
a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo	145
b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial	146
c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformação	147
7.3.3. Análise das tensões no modelo numérico	150
a. Diagrama de Tensões Cisalhantes	150
b. Diagrama de Tensões Radiais	152
7.3.4. Avaliação dos resultados segundo o critério de falha	154
7.4. Análise do comportamento dos shear keys	155
7.4.1. Mecanismo de funcionamento dos shear keys	162
8. Comentários sobre as limitações do modelo numérico	164
9. Conclusões	166
10. Referências bibliográficas	167