

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Ricardo Dias de Souza

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE DUTOS COM DEFEITOS DE CORROSÃO REAIS

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 Ciências de Engenharia Mecânica.

Orientador: José Luiz de França Freire

Co-orientador: Adilson Carvalho Benjamin

Rio de Janeiro, junho de 2003

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Ricardo Dias de Souza

**Avaliação Estrutural de Dutos
com Defeitos de Corrosão Reais**

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

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Eng. Adilson Carvalho Benjamin

Co-orientador
Petrobras/Cenpes

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Eng. Luiz Cláudio de Marco Meniconi

Petrobras/Cenpes

Prof. Ronaldo Domingues Vieira

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de junho de 2003

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

Ricardo Dias de Souza

Graduou-se em Engenharia Civil na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 1986. Coursou Engenharia de Petróleo na Petrobras em 1987 e Engenharia de Dutos na PUC-Rio em 1999. Atuou nas áreas de complementação de poços de petróleo, análise de viabilidade técnica-econômica de projetos de produção de petróleo e análise de projetos de engenharia civil. Participou de cursos e congressos, no Brasil e no exterior, na área de engenharia de dutos. É responsável pela análise de integridade estrutural de dutos na Transpetro/DT/Suporte/SE/ Conf.

Ficha Catalográfica

Souza, Ricardo Dias de

Avaliação estrutural de dutos com defeitos de corrosão reais / Ricardo Dias de Souza; orientador: José Luiz de França; co-orientador: Adilson Carvalho Benjamin. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

[17], 112 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dutos. 3. Defeitos de corrosão. 4. Avaliação estrutural. 5. Métodos de avaliação. I. França, José Luiz de. II. Benjamin, Adilson Carvalho. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico esta tese aos meus pais Iran e Jeanette que são os principais responsáveis pela minha formação profissional e que sempre me apoiaram e me deixaram completamente à vontade para seguir os caminhos que considereei serem os melhores para mim. Considero esta tese um pequeno fruto de toda a dedicação despendida por eles durante a minha vida.

Sou eternamente grato.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor José Luiz da França Freire, pela orientação, aprendizado e atenção durante o curso de Engenharia de Dutos, a realização das cadeiras de mestrado e na elaboração da tese.

Ao meu Co-orientador Adilson Carvalho Benjamin, pelo aprendizado, orientação e oportunidade de desenvolver este trabalho ao seu lado.

À minha esposa Heloisa, pelo apoio e referência profissional que são um estímulo para a vida.

À minha filha Vivian que com seus rabiscos em meus livros e apontamentos pedindo atenção, sempre me alegrou e promoveu uma descontração agradável.

Aos meus sogros Cléa e Décio pelo suporte durante o período de tese.

Aos meus colegas de trabalho Richard Ward, José Gabriel Tinoco, Antônio Geraldo de Sousa e Minoru Matsuura, que como gerentes da Petrobras, aprovaram o meu pedido para cursar o mestrado e sempre me incentivaram e apoiaram.

Ao professor Ronaldo Domingues Vieira, pela atenção durante a realização dos ensaios e discussão dos resultados.

Ao colega de trabalho André Reyes, por conferir os resultados e tabelas e na elaboração de desenhos, tornando o trabalho confiável.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, em especial à Roseli Marins.

Aos meus amigos Mario Pezzi, José Alberto Chouin, Sueli Tolmasquim pelos trabalhos realizados juntos e pelos momentos agradáveis durante o período em que cursamos as cadeiras do mestrado.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

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

Resumo

Souza, Ricardo Dias de. **Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Reais**. Rio de Janeiro, 2003, 110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A avaliação estrutural de dutos com defeitos de corrosão vem sendo estudada desde o final da década de 60. A partir dos conceitos da Mecânica da Fratura, foram elaboradas expressões semi-empíricas que permitiram estimar a pressão de ruptura de defeitos de corrosão. Desde então, essas expressões foram sendo ajustadas e aprimoradas por testes de ensaios destrutivos e análise de elementos finitos. Os principais métodos desenvolvidos são o ASME B31G, 085dL, “Effective Area”, DNV RP F-101 (defeitos isolados) e DNV RP F-101 (defeitos complexos). Esta tese foi elaborada utilizando alguns dos ensaios programados para o projeto Produz 600536, e parte dos seus resultados foi aproveitada neste projeto. Para o trabalho de tese, foram utilizados cinco espécimes tubulares de aço API 5L X46, com 3,0 m de comprimento aproximado, diâmetro nominal de 457,2 mm e espessura nominal de 6,35 mm. Estes espécimes continham defeitos reais de corrosão interna, do tipo longo, localizados na geratriz inferior, e foram retirados do oleoduto Orbel I, pertencente à Petrobras, durante a sua obra de reabilitação, em 2001. Os defeitos de corrosão foram mapeados com medições manuais por ultra-som espaçadas em 20 mm e com medições mecanizadas CSCAN espaçadas em 5mm. Para cada espécime, foram realizados ensaios de tração em 4 corpos de prova, sendo 2 corpos retirados transversalmente e 2 longitudinalmente. Estes espécimes foram instrumentados com extensômetros de resistência elétrica e pressurizados até a ruptura. Para cada espécime, foram levantados diversos perfis de corrosão em função do comprimento estabelecido para o defeito e do tipo de medição (manual ou mecanizada). A pressão de ruptura foi estimada pelas equações dos métodos ASME B31G, 085dL, “Effective Area”, DNV RP F-101 (defeitos isolados) e DNV RP F-101 (defeitos complexos), utilizando planilha Excel e/ou os programas computacionais RSTRENG e DNV

RP F-101. Os valores de pressão de ruptura estimados para os espécimes, utilizando os métodos acima relacionados, foram comparados com as pressões de ruptura reais, obtidas nos ensaios de pressão. Os resultados confirmaram o conservadorismo embutido no método ASME B31G e comprovaram que os métodos “Effective Area” e DNV RP-F101 (complexo), que utilizam o perfil de corrosão, apresentam resultados melhores que os métodos ASME B31G e 085dL e podem ser considerados uma boa ferramenta para avaliar defeitos de corrosão, considerando somente carregamento de pressão interna.

Palavras-chave

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

Abstract

Souza, Ricardo Dias de. **Structural Assessment of Pipelines with Real Corrosion Defects**. Rio de Janeiro, 2003, 110p. MSc. Dissertation – Departamento de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Structural assessment of pipelines with corrosion defects has been studied since the late 1960s. From the principles of fracture mechanics, semi-empirical mathematical expressions have been developed for predicting burst pressure of corroded pipes. Subsequently, these expressions have been modified and calibrated based on the results from finite element analyses and laboratory burst tests. The main methods are ASME B31G, Modified B31G (version 0.85 dL), Effective Area and DNV RP-F101 for single and complex shaped defects. This thesis was done utilizing some laboratory tests from Product 600536 Project. For this study, five specimens with 3.0 meters each were removed from Petrobras pipeline (Orbel I), during its rehabilitation. The pipe material was API 5L X46, 18” diameter and 0.25” wall thickness. These specimens had real internal corrosion with very long defect length, at the 6:00 o’clock position. The corrosion defects were mapped by manual ultrasound, at 20 mm intervals, and mechanized ultrasonic measurements CSCAN at 5 mm intervals. For each pipe, the yield strength and ultimate strength were determined by tension tests of 4 specimens, 2 removed from transverse and 2 longitudinal. Every pipe specimen was monitored by strain gages and pressurized up to the point of rupture. For each specimen different profiles were determined depending on the length defined for the defect and for the intervals of measurements. The burst pressure was predicted by the following methods: ASME B31G, Modified B31G (version 0.85 dL), Effective Area and DNV RP-F101 for single and complex defects. These predicted rupture pressures were compared with the real burst pressures. The results confirmed the conservatism of the ASME B31G method and demonstrated that the Effective Area and DNV RP-F101 for complex shaped defects methods can be considered

good for evaluating longitudinal corrosion defects, considering only internal pressure load.

Keywords:

Pipelines; corrosion defects; structural assessment; assessment methods.

Sumário

1- Introdução	1
1.1 - Motivação do tema de tese	3
1.2 - Intenção de tese e seu encaminhamento	5
1.3 - Apresentação dos capítulos da tese	8
2 - Integridade estrutural de dutos com defeitos de corrosão	10
2.1 - Inspeção em dutos	10
2.1.1 - Histórico dos “pigs” instrumentados	11
2.1.2 - Especificação e exigências para a inspeção com “pig” instrumentado	11
2.1.3 - Inspeção com “pig” instrumentado de corrosão	12
2.1.4 - Mapeamento dos defeitos de corrosão	13
2.1.5 - Periodicidade de inspeção com “pig” de corrosão	14
2.2 - Avaliação de defeitos por níveis de complexidade	16
2.3 - Métodos de análise de defeitos de corrosão	22
2.3.1 - Método ASME B31G	25
2.3.2 - Método 0.85 dL	27
2.3.3 - Método “Effective Area”	28
2.3.4 - Método DNV RP-F101	30
2.3.4.1 - Avaliação para defeito isolado	32
2.3.4.2 - Avaliação para defeito de geometria complexa	33
2.3.5 - Outros cálculos realizados	36
3 - Procedimento experimental	39
3.1 - Características dos espécimes tubulares	39
3.2 - Mapeamento manual de espessura de parede por ultra-som	39
3.3 - Mapeamento mecanizado da espessura de parede do tipo CSCAN	41
3.4 - Ensaio de tração do material dos espécimes	43
3.5 - Confeção dos espécimes tubulares	44

3.6 - Teste de pressão dos espécimes tubulares	45
4 - Determinação das pressões de ruptura	51
4.1 - Espessura de parede	51
4.2 - Diâmetro	51
4.3 - Resistência ao escoamento e à tração	52
4.4 - Perfil de Corrosão	52
4.5 - Cálculo da pressão de ruptura	60
5 - Análise dos resultados	69
5.1 - Análise quanto à resistência ao escoamento e à tração dos materiais	69
5.2 - Análise do volume injetado e da deformação plástica dos espécimes	70
5.3 - Análise das parcelas que compõem as equações que estimam a pressão de ruptura	71
5.4 - Análise dos resultados das pressões de ruptura estimadas	72
5.4.1 - Análise individual por espécime	73
5.4.2 - Análise geral quanto aos métodos de cálculo	76
5.4.3 - Análise geral quanto aos perfis de corrosão	78
5.5 - Análise comparativa utilizando t e D nominais por t e D medidos	79
5.6 - Análise adicionais com o espécime T02	81
5.7 - Comparação entre perfil River Bottom e Perfil Geratriz de Ruptura	82
6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	83
7 - Referências bibliográficas	90
Apêndice A – Gráfico taxa de corrosão x probabilidade acumulativa	94
Apêndice B - Telas dos programas Rstreng e DNVRP-F101	95

Apêndice C - Mapeamento Manual e CSCAN dos Espécimes T04, T05, T06 e T10	98
Apêndice D - Valores de $Prup$ e $Prup'$, perfis river bottom e geratriz de ruptura	106
Apêndice E – Análise das pressões de ruptura	111

Lista de Figuras

Figura 1 – Avaliação de defeitos por níveis de complexidade	21
Figura 2 - Área longitudinal do material perdido	23
Figura 3 - Representação da área longitudinal perdida por meio de uma área parabólica e retangular	26
Figura 4 - Detalhe dos comprimentos para o cálculo pelo método “Effective Area”	29
Figura 5 - Definição da área de patch(A_{patch}) e de pit (A_{pit})	33
Figura 6 - Exemplo de agrupamento de defeitos adjacentes para interação	34
Figura 7 - Medição manual por ultra-som	40
Figura 8 - Medição mecanizada por ultra-som	42
Figura 9 – Espécime T04 instrumentado e sendo pressurizado	47
Figura 10 – Espécime T04 no instante da ruptura	48
Figura 11 – Espécime T04 após a ruptura	48
Figura 12 – Gráfico Volume Injetado x Pressão espécime T02	49
Figura 13 - Mapeamento manual por ultra-som do espécime T02 com L=1980 mm	57
Figura 14 – Mapeamento manual por ultra-som do espécime T02 com L=980 mm	58
Figura 15 – Mapeamento mecanizado CSCAN ímpar por ultra-som do espécime T02 com L=990 mm	59
Figura 16 – Mapeamento mecanizado CSCAN par por ultra-som do espécime T02 com L=990 mm	59
Figura 17 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 02	64
Figura 18 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 04	64
Figura 19 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 05	65
Figura 20 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 06	65
Figura 21 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 10	66

Figura 22 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 02 – Todos perfis	66
Figura 23 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo do Espécime T 02 – Medição manual	67
Figura 24 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo - Espécime T 02 - CSCAN - L ~ 500 mm	67
Figura 25 - Gráfico de P_{rup} x método de cálculo-Espécime T 02– CSCAN - L ~ 1000 mm	68
Figura 26 – Gráfico taxa de corrosão x probabilidade acumulativa	94
Figura 27 - Tela do programa Rstreng	95
Figura 28 - Tela do programa DNVRP-F101 para defeitos isolados	96
Figura 29 - Tela do programa DNVRP-F101 para defeitos de geometria complexa	97
Figura 30 – Mapeamento manual por ultra-som - Espécime T04 – L=1980 mm	98
Figura 31 – Mapeamento CSCAN ímpar - Espécime T04 – L=990 mm	99
Figura 32 – Mapeamento CSCAN par - Espécime T04 – L=990 mm	99
Figura 33 – Mapeamento manual por ultra-som - Espécime T05 – L=1980 mm	100
Figura 34 – Mapeamento CSCAN ímpar - Espécime T05 – L=990 mm	101
Figura 35 – Mapeamento CSCAN par - Espécime T05 – L=990 mm	101
Figura 36 – Mapeamento manual por ultra-som - Espécime T06 – L=1980 mm	102
Figura 37 – Mapeamento CSCAN ímpar - Espécime T06 – L=990 mm	103
Figura 38 – Mapeamento CSCAN par - Espécime T06 – L=990 mm	103
Figura 39 – Mapeamento manual por ultra-som - Espécime T10 – L=1980 mm	104
Figura 40 – Mapeamento CSCAN ímpar - Espécime T10 – L=990 mm	105
Figura 41 – Mapeamento CSCAN par - Espécime T10 – L=990 mm	105

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo das equações dos métodos estudados	38
Tabela 2 – Valores dos ensaios de tração	44
Tabela 3 – Localização dos extensômetros em cada espécime	46
Tabela 4 – Pressão de ruptura e volume injetado	48
Tabela 5 – Pressão e volume injetado no início da deformação plástica	49
Tabela 6 – Valores de espessura na região compreendida entre 8, 12 e 4 h	51
Tabela 7 – Diâmetro dos espécimes	52
Tabela 8 – Valores médios das resistências ao escoamento e à tração	52
Tabela 9 – Comprimento dos espécimes sem tampo	53
Tabela 10 - Perfis com espessuras e diâmetros medidos	56
Tabela 11 - Perfis com espessuras e diâmetros nominais	56
Tabela 12 - Pressão de ruptura estimada para cada método de cálculo, pressão de ruptura real e pressão de ruptura estimada para tubo novo, em kgf/cm^2	62
Tabela 13 - Valores de P_{rup} para cada método de cálculo	63
Tabela 14 – Razão entre valores de resistência ao escoamento e à tração	70
Tabela 15 - Volume dos espécimes e volume injetado até a ruptura	70
Tabela 16 - Razão entre os σ_{flow} 's dos métodos estudados	71
Tabela 17 - Variação e média da P_{rup} para cada método de cálculo	76
Tabela 18 - Razão pressão estimada de ruptura com valores de t e D nominais por t e D medidos, Métodos ASME B31G, 0,85 dL e "Effective Area".	80
Tabela 19 - Razão pressão estimada de ruptura com valores de t e D nominais por t e D medidos, Métodos DNV RP-F101(complexo) e DNV RP-F101(isolado)	80

Tabela 20 – P_{rup} (kgf/cm ²) para Espécime T02, perfis river bottom e geratriz de ruptura	106
Tabela 21 – P_{rup} (kgf/cm ²) para Espécime T04, perfis river bottom e geratriz de ruptura	106
Tabela 22 – P_{rup} (kgf/cm ²) para Espécime T05, perfis river bottom e geratriz de ruptura	107
Tabela 23– P_{rup} (kgf/cm ²) para Espécime T06, perfis river bottom e geratriz de ruptura	107
Tabela 24 – P_{rup} (kgf/cm ²) para Espécime T10, perfis river bottom e geratriz de ruptura	108
Tabela 25– $P_{rup'}$ para Espécime T02, perfis river bottom e geratriz de ruptura	108
Tabela 26– $P_{rup'}$ para Espécime T04, perfis river bottom e geratriz de ruptura	109
Tabela 27– $P_{rup'}$ para Espécime T05, perfis river bottom e geratriz de ruptura	109
Tabela 28– $P_{rup'}$ para Espécime T06, perfis river bottom e geratriz de ruptura	110
Tabela 29– $P_{rup'}$ para Espécime T10, perfis river bottom e geratriz de ruptura	110