



Maira Amanda Vargas Ávila

**Análise de Integridade Estrutural de Dutos
com Mossas Simples**

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. Tito Luiz da Silveira

Rio de Janeiro

Abril de 2007



Maira Amanda Vargas Ávila

**Análise de Integridade Estrutural de Dutos
com Mossas Simples**

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.

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Tito Luiz da Silveira

Co-orientador

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Carlos Alberto de Almeida

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Abril de 2007

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

Maira Amanda Vargas Ávila

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica Universidad Industrial de Santander - Colômbia em 2002.

Ficha Catalográfica

Ávila, Maira Amanda Vargas

Análise de integridade estrutural de dutos com mossas simples / Maira Amanda Vargas Ávila; orientador: José Luiz de França Freire; co-orientador: Tito Luiz da Silveira. – 2007.
196 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Duto. 3. Mossas simples. 4. Amassamentos. 5. Integridade estrutural. 6. Ruptura. 7. Fadiga. 8. Plasticidade. 9. Elementos finitos. I. Freire, José Luiz de França. II. Silveira, Tito Luiz da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A Deus, sem ele nada é possível, à minha família pelo amor, a Carlos, meu
parceiro e minha inspiração, a Luis Eduardo por não me deixar desistir e à família
de TSEC Ltda. pelo apoio constante.

Agradecimentos

Ao professor José Luiz de França Freire e ao professor Tito Luiz da Silveira, pela paciência e orientação durante o desenvolvimento do curso de mestrado.

Ao professor Antônio Miranda e os alunos de graduação: Leonardo Motta, Amauri Lozada e Rafael Albernaz, quem desenvolveram os testes de criação de mossas analisados no presente trabalho.

Aos amigos de Tito Silveira Engenharia e Consultoria Ltda., Tito Fernando, Rogério, Anderson, Suzana e Felipe, pela ajuda, apoio técnico e grande amizade durante à minha estadia no Brasil.

Ao professor Iván Uribe da Universidade Industrial de Santander, pela orientação desde o início dos meus estudos.

A meus amigos e colegas de laboratório, Garcia, Marco, Jesús, Habib, Leo e Jaime, pelos seus conselhos e bons desejos.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino.

A todos os colegas da pós-graduação e em especial a: Angélica, Néstor, Miguel, Red, Gipsy, Martin e Robert.

Aos meus amigos no Rio de Janeiro e na Colômbia, suporte e apoio incondicional em todos os momentos.

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

Vargas Ávila, Maira Amanda; Freire, José Luis de França; Silveira, Tito Luiz. **Análise de Integridade Estrutural de Dutos com Mossas Simples**. Rio de Janeiro, 2007. 196p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho analisa o impacto de uma mossa simples transversal na integridade estrutural de espécimes tubulares de paredes finas com dimensões e características semelhantes aos dutos usados para transporte de óleo e gás. O estudo da mossa simples envolveu as etapas de criação, recuperação elástica e avaliação da sua resistência estática e cíclica. A abordagem do problema fundamentou-se na análise de dados experimentais e na modelagem numérica por elementos finitos. Na análise por elementos finitos foram consideradas: não linearidade por contato, plasticidade, grandes deslocamentos e grandes deformações. Adicionalmente, foram feitas comparações entre os resultados e os procedimentos usados na indústria, de modo a avaliar criticamente eventuais diferenças e semelhanças entre estes. Como resultado, a avaliação da ruptura estática permitiu verificar a pouca influência de mossas, com a geometria estudada, na resistência à ruptura. Entretanto, os códigos de projeto estudados não aceitam mossas com profundidades e deformações menores que as estudadas. A avaliação de resistência cíclica permitiu verificar a influência deste tipo de dano na vida à fadiga. No final foi elaborada uma rotina simples, baseada em fundamentos teóricos, que permite quantificar a vida à fadiga de mossas, com características similares, a partir do seu fator de concentração de tensão.

Palavras – chave

Duto, Mossas Simples, Amassamentos, Integridade Estrutural, Ruptura, Fadiga, Plasticidade, Elementos finitos.

Abstract

Vargas Ávila, Maira Amanda; Freire, José Luis de França; Silveira, Tito Luiz. **Structural Integrity of plain dents in pipelines**. Rio de Janeiro, 2007. 196p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work analyzes the impact of transverse plain dents in the structural integrity of thin-thickness pipe specimens with similar dimensions and properties than typical pipelines. The dent analyzes included the following topics: creation, burst and fatigue evaluation and elastic recuperation. The problem was based in the study of experimental data and numerical modeling by finite elements. The numerical modeling considered: non linearity by contact, plasticity, large displacement and large strain. Finally, comparisons were made between the results and the typical industry procedures, in order to identify eventual differences and similarities. The burst evaluation indicated the low influence of the studied plain dents in the burst resistance. Otherwise, the project standards do not accept dents with the depth and strain levels like those studied. The cyclic analyze verified the influence of this type of damage in the fatigue life. At the end of this study, a simple procedure was developed based in theoric fundamentals to quantify the fatigue life of plain dents, with similar characteristics studied above, using their intensity stress factor.

Keywords

Pipeline, Plain dent, Structural Integrity, Burst, Fatigue, Plasticity, Finite elements.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivo Geral	25
1.2 Objetivos Específicos	25
1.3 Considerações Iniciais	26
1.4 Escopo do Trabalho	27
1.5 Roteiro da Dissertação	29
2 DESCRIÇÃO DOS DANOS OBJETO DE ESTUDO	30
2.1 Generalidades de Danos em Dutos	30
2.2 Comportamento de Mossas em Dutos	32
2.2.1 Criação de Mossas	34
2.2.2 Recuperação Elástica	36
2.2.3 Arredondamento	37
2.3 Caracterização de Mossas	38
2.4 Caracterização da Operação do segmento de Duto Danificado	40
2.5 Análise de Integridade de Dutos	42
2.5.1 Estado de Tensão num Duto Livre de Defeitos	42
2.5.2 Critérios de Resistência no Escoamento	44
2.5.3 Tensões e Deformações Elasto-Plásticas	45
2.5.4 Modelagem Numérica de Plasticidade	46
2.6 Modos de Falha de Dutos Contendo Mossas	48
2.6.1 Ruptura Estática	49
2.6.2 Fadiga	49
2.7 Métodos de Avaliação de Integridade Estrutural de Mossas	59
2.7.1 Avaliação da Resistência à Ruptura de Mossas Simples	60
2.7.2 Método para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Mossas Simples	67

3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CRIAÇÃO DE MOSSAS SIMPLES	71
3.1 Análise Experimental	72
3.1.1 Características dos Espécimes e do Indentador	72
3.1.2 Execução dos Testes de Criação de Mossas	74
3.2 Análise Numérica por Elementos Finitos	77
3.2.1 Introdução à Análise Não Linear	78
3.2.2 Implementação da Análise Não Linear na Modelagem dos Espécimes Tubulares	80
3.2.3 Resultados da Análise Não Linear e Comparação com a Análise Experimental	85
4 AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE RUPTURA DE MOSSAS SIMPLES	89
4.1 Análise Experimental	89
4.1.1 Descrição dos Testes	90
4.1.2 Resultados dos Testes Hidrostáticos	91
4.2 Análise Numérica por Elementos Finitos	94
5 ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES CÍCLICAS PARA AVALIAÇÃO DE FADIGA	99
5.1 Modelagem Numérica	100
5.1.1 Descrição do Modelo Numérico	100
5.1.2 Método de Análise dos Resultados da Modelagem Numérica	101
5.2 Avaliação de Fadiga	115
5.2.1 Ajuste dos dados obtidos da Análise por Elementos Finitos	117
5.2.2 Detalhes do Método SN Implementado	119
5.2.3 Resultados da Avaliação de Fadiga das Tensões de Von Mises	121

6 COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS COM MOSSAS	125
6.1 Características das Mossas Estudadas	126
6.1.1 Curvas Força-deslocamento	126
6.1.2 Recuperação Elástica	128
6.2 Avaliação da Resistência à Ruptura	130
6.2.1 Critérios Baseados na Profundidade da Mossa	130
6.2.2 Critério Baseado nas Deformações, ASME B31.8-2003, Apêndice R	131
6.2.3 Critério da RP API 579-2000, Seção 8, Ovalização Global	133
6.2.4 Arredondamento	135
6.3 Fatores de Concentração de Tensão	136
6.4 Vida à Fadiga	138
6.4.1 Curvas SN Usadas Tipicamente em Dutos	138
6.4.2 Procedimentos de Análise de Integridade Estrutural Aplicados a Mossas Simples	139
6.5 Metodologia Proposta para o Cálculo das Tensões a Partir do Fator de Concentração de Tensão	140
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	143
7.1 Conclusões	143
7.1.1 Criação de Mossas	143
7.1.2 Avaliação da Ruptura Estática	144
7.1.3 Avaliação de Fadiga	145
7.2 Recomendações	147
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

APÊNDICES

A. Terminologia	152
B. Caracterização Geométrica de Mossas	155
C. Curvas Tensão-deformação Monotônica e Cíclica	163
D. Resultados Complementares de Criação de Mossas	166
E. Resultados Complementares da Avaliação de Ruptura Experimental	172
F. Históricos de Tensão das Hipóteses 2 e 3 de Carregamento	173
G. Análise de Fadiga pelo Método SN, Tensões Circunferenciais	182
H. Análise de Fadiga pelo Método ϵN	184
I. Procedimento de Cálculo do Raio de Curvatura da Mossa	192
J. Procedimento Geral para Avaliação de Integridade de Mossas	195

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Causas de falha em linhas de transporte de hidrocarbonetos

Figura 2.1 - Processo de criação uma moessa mediante aplicação de uma força radial num duto sob pressão interna

Figura 2.2 - Idealização do arredondamento da moessa [13]

Figura 2.3 - Exemplo de um espectro de pressão em linha de transporte de hidrocarbonetos [19]

Figura 2.4 - Histograma de pressão obtido a partir da análise de dados da

Figura 2.5 - Estado de tensões no paralelepípedo elementar, e tensões principais.

Figura 2.6 - Estado de tensão num cilindro de parede fina sob pressão interna.

Figura 2.7 - Exemplo de espectro de tensão oscilatória tipo senoidal flutuante

Figura 2.8 - Curva típica SN de aços ao carbono.

Figura 2.9 - Curvas SN de projeto e de trabalhos de fadiga em aços ao carbono usados na construção de dutos.

Figura 2.10 - Diagrama de Gerber e Goodman para considerar o efeito da carga média na vida à fadiga

Figura 2.11 - Correlação entre o diagrama de SN e o de Goodman para a consideração da tensão média na vida à fadiga.

Figura 2.12 - Parâmetros dimensionais, Apêndice R do padrão ASME B31.8-2003.

Figura 2.13 - Ovalização global, diferenças entre os valores máximos e mínimos dos diâmetros.

Figura 2.14 - Parâmetros dimensionais da moessa requeridos para a avaliação do PDAM.

Figura 3.1 - Curvas tensão-deformação medidas no ensaio de tração para corpos de prova longitudinais e transversais.

Figura 3.2 - Sequência seguida na criação da moessa.

Figura 3.3 - Curva “força-deslocamento”, moessa transversal com 15% de profundidade máxima

Figura 3.4 - Aplicação do método de Newton Raphson a um incremento de carga

Figura 3.5 - Convergência no método de Newton-Rapson

Figura 3.6 - Curva tensão-deformação característica do material analisado

Figura 3.7 - Par de contato usado no ANSYS para o processo de indentação

Figura 3.8 - Modelo duto-indentador $\frac{1}{4}$ de simetria

Figura 3.9 - Elemento SHELL43 de quatro e três nós

Figura 3.10 - Análise de compatibilidade da malha

Figura 3.11 - Indentação e recuperação elástica do Modelo 1, deslocamento vertical

Figura 3.13 - Deslocamento vertical (y) e transversal (x), Modelo 1

Figura 3.14 - Curva “força-deslocamento” experimentais e numérica, Modelo 1

Figura 4.1 - Localização dos strain-gages para medição da deformação circunferencial e longitudinal durante o testes de ruptura.

Figura 4.2 - Montagem de equipamentos para a execução dos testes hidrostáticos

Figura 4.3 - Volumen de água Vs. Pressão hidrostática nos espécimes TA1 e TA2

Figura 4.4 - Localização da fratura dos espécimes após o teste de ruptura

Figura 4.5 - Deformação longitudinal e circunferencial durante o teste hidrostático.

Figura 4.6 - Deformação longitudinal obtida da análise numérica para o nó 5266 e comparação com valores experimentais

Figura 4.7 - Deformação circunferencial obtida da análise numérica e comparação com valores experimentais

Figura 4.8 - Variação da profundidade da moessa com a pressão

Figura 4.9 - Distribuição da tensão de Von Mises no instante anterior à ruptura para a condição de restrição axial

Figura 4.10 - Distribuição da tensão de Von Mises no instante anterior à ruptura para a condição de bordo tamponado.

Figura 5.1 - Condições de simetria usadas na avaliação numérica

Figura 5.2 - Tensão de Von Mises na mocha após a recuperação elástica.

Figura 5.3 - Variação da profundidade da mocha ao longo dos ciclos de pressão

Figura 5.4 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 1

Figura 5.5 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 2

Figura 5.6 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 3

Figura 5.7 - Histórico das tensões-deformações de Von Mises nos nós selecionados, hipótese 1

Figura 5.8 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 1

Figura 5.9 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5391 externo, hipótese 1

Figura 5.10 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 1

Figura 5.11 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 1

Figura 5.12 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5282 interno, hipótese 1

Figura 5.13 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5285 externo, hipótese 1

Figura 5.14 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 1

Figura 5.15 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 1

Figura 5.16 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5282 externo, hipótese 1

Figura 5.17 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 externo, hipótese 1

Figura 5.18 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 1

Figura 5.19 - Melhor ajuste do modelo Ramberg-Osgood à curva multilinear do material dos espécimes avaliados.

Figura 6.1 – Comparação das curvas teóricas, experimentais e numéricas para a moessa transversal com 15% de profundidade máxima.

Figura 6.2 - Aplicação do critério proposto para a determinação da largura das moessas modeladas numericamente

Figura 6.3 - Comparação do arredondamento numérico com o ideal [13]

Figura B.1 - Registro típico de uma moessa detectada com pig geométrico.

Figura B.2 - Seção reta no segmento analisado contendo deformação localizada

Figura B.3a) - Registro de uma moessa detectada em inspeção por pig ultra-sônico [17]

Figura B.3b) - Incertezas no registro de uma moessa, promovidas por bolsas de ar no interior do duto analisado.

Figura B.4 - Ferramenta para caracterização manual de moessas

Figura B.5 - Perfil de um amassamento por escavação, duto com diâmetro externo 16", espessura 0.344in, material API 5L X60

Figura B.6 - Perfil de moessas causadas por rocha e que manifestaram vazamento, duto de diâmetro externo de 26", material API 5L X5B. A: Espessura 0.270". B: Espessura 0.281".

Figura B.7 - Perfil de moessas causadas por rochas sem manifestação de vazamento, duto de diâmetro externo 16", espessura 0.675", material API 5L X52

Figura B.8 - Perfil de moessas causadas por carga explosiva, duto de diâmetro externo de 26", espessura 0.406", material API 5L X60

Figura C.1 - Curva tensão-deformação monotônica de um material

Figura C.2 - Curva monotônica e cíclica transiente de endurecimento

Figura C.3 - Laços de histerese no material estabilizado

Figura D.1 - Moessas longitudinais com vincos nos seus extremos.

Figura D.2 - Curva "força-deslocamento", moessa longitudinal com 15% de profundidade máxima

Figura D.3 - Curva "força-deslocamento", moessa transversal com 25% de profundidade máxima

Figura D.4 - Indentação e recuperação elástica do Modelo 2, deslocamento vertical

Figura D.5 - Deslocamento vertical (y) e transversal (x) do Modelo 2

Figura D.6 - Variação da força de indentação com o deslocamento do indentador, Modelo 2 e testes TC1, TC2 e TC3

Figura E.1 - Volume de água Vs. Pressão hidrostática nos espécimes TB1, TB2, TC1, TC2, TC3 e sem defeito

Figura F.1 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 2

Figura F.2 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 2

Figura F.3 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 2

Figura F.4 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 3

Figura F.5 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 3

Figura F.6 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 3

Figura F.7 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5285 externo, hipótese 2

Figura F.8 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 2

Figura F.9 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 2

Figura F.10 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5285 externo, hipótese 3

Figura F.11 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 3

Figura F.12 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 3

Figura F.13 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5285 interno, hipótese 2

Figura F.14 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 interno, hipótese 2

Figura F.15 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 2

Figura F.16 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5285 externo, hipótese 3

Figura F.17 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 externo, hipótese 3

Figura F.18 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 3

Figura H.1 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 1

Figura H.2 - Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 1

Figura H.3 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 1

Figura H.4 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 2

Figura H.5 - Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 2

Figura H.6 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 2

Figura H.7 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 3

Figura H.8 - Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 3

Figura H.9 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 3

Figura H.10 - Dano por evento calculado pelo método ϵ_N para o caso H1-5285-n1*, VIDA 2002

Figura H.11 - Dano acumulado calculado pelo método ϵ_N para o caso H1-5285-n1*, VIDA 2002

Figura H.12 - Laço de histerese calculado para o caso H1-5285-n1*, VIDA 2002

Figura H.13 - Histórico de tensão-deformação circunferencial para o caso H1-5285-n1*, ANSYS10.0

Figura I.1 - Linha de tendência na direção circunferencial da moosa

Figura I.2 - Linha de tendência na direção longitudinal da moosa

Figura J.1 - Diagrama de fluxo do procedimento geral de avaliação de integridade de moosas simples transversais com profundidade de até 15% do diâmetro externo

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Modelos força-deslocamento para criação de mossas em dutos

Tabela 2.2 - Fatores de segurança no projeto de linhas de transporte de gás, reprodução da Tabela 841.114 [23].

Tabela 2.3 - Descrição dos modelos uniaxiais de idealização do comportamento elasto-plástico

Tabela 2.4 - Valores das constantes do fator de acabamento superficial k_a [20]

Tabela 2.5 - Curvas SN de projeto para aços ao carbono usados na construção de dutos

Tabela 2.6 - Critérios de avaliação de ruptura de mossas simples, baseados na profundidade

Tabela 2.7 - Critérios de projeto para avaliação de mossas simples, RP API 579-2000

Tabela 2.8 - Intervalo de aplicabilidade do critério de ruptura estática, PDAM

Tabela 2.9 - Intervalo de aplicabilidade do critério de ruptura estática,

Tabela 3.1 - Dimensões dos corpos de prova e do indentador

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova medidas no ensaio de tração

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do material usado nos testes e os valores mínimos especificados para o aço API 5L Grau A

Tabela 3.4 - Identificação e descrição dos testes de criação de mossas

Tabela 3.5 - Profundidades máxima e remanescente da mossa transversal com profundidade máxima de 15%

Tabela 3.6 - Resumo da recuperação elástica dos testes TB e TC, detalhados no Apêndice D

Tabela 3.7 - Resumo da criação experimental e numérica de mossas

Tabela 3.8 - Dimensões das mossas criadas numericamente, após a recuperação elástica

Tabela 4.1 - Pressões de ruptura dos espécimes ensaiados.

Tabela 4.2 - Comparação das pressões de ruptura numérica e experimental.

Tabela 5.1 - Hipóteses de carregamento avaliadas numericamente, pressões em MPa

Tabela 5.2 - Hipóteses de carregamento avaliadas numericamente, pressões em MPa

Tabela 5.3 - Fatores de concentração de tensão

Tabela 5.4 - Parâmetros do material usados na avaliação de vida à fadiga

Tabela 5.5 - Casos de carregamento avaliados pelo método SN, com tensões de Von Mises corrigidas

Tabela 5.6 - Resultados da vida à fadiga avaliada pelo método SN com tensões de Von Mises corrigidas

Tabela 5.7 - Resumo da avaliação de vida à fadiga, tensões de Von Mises corrigidas

Tabela 5.8 - Resumo da avaliação de vida à fadiga, tensões circunferenciais

Tabela 5.9 - Resumo da avaliação complementar pelo método ϵN

Tabela 6.1 - Comparação das profundidades remanescentes experimentais e numéricas

Tabela 6.2 – Dimensões das mossas modeladas numericamente

Tabela 6.3 - Resultados da aplicação dos critérios de profundidade na mossa transversal com 15% de profundidade máxima

Tabela 6.4 - Deformações calculadas mediante o Apêndice R do ASME B31.8

Tabela 6.5 - Comparação das deformações calculadas pelo ASME B31.8 e obtidas numericamente no nó 5266.

Tabela 6.6 - Critérios de projeto para avaliação de mossas simples, RP API 579-2000

Tabela 6.7 - Parâmetros usados na avaliação pela RP API 579-2000, seção 8, ovalização global

Tabela 6.8 - Resultados da avaliação da mossa com 15% de profundidade, RP API 579-2000

Tabela 6.9 - Comparação dos fatores de concentração de tensão numéricos e disponíveis na literatura

Tabela 6.10 - Comparação das vidas à fadiga obtidas no presente trabalho com modelos usados para dutos e resultados experimentais, nó 5269 externo e 5266 interno

Tabela 6.11 - Resultados da avaliação mediante a aplicação do PDAM, no nó 5269, hipótese 1

Tabela 6.12 - Comparação dos resultados da avaliação de fadiga SN obtidos da análise de elementos finitos e os calculados com o Kt, tensão média igual a zero

Tabela 6.13 - Comparação dos resultados da avaliação de fadiga SN obtidos da análise de elementos finitos e os calculados com o Kt, Goodman

Tabela D.1 - Identificação e descrição dos testes de criação de mossas

Tabela D.2 - Profundidades máxima e remanescente das mossas estudadas

Tabela D.3 - Resumo da criação experimental e numérica de mossas

Tabela D.4 - Dimensões das mossas criadas numericamente, após a recuperação elástica

Tabela E.1 - Pressões de ruptura dos espécimes TB e TC

Tabela G.1 - Casos de carregamento avaliados pelo método SN, tensões circunferenciais

Tabela G.2 - Resultados da vida à fadiga avaliada pelo método SN, usando as tensões circunferenciais

Tabela H.1 - Resultados da avaliação complementar pelo método ϵN .

Lista de Símbolos

F	Força de indentação pontual
\bar{F}	Força de indentação por unidade de comprimento
δ_e	Deslocamento elástico do indentador
δ_r	Deslocamento permanente do indentador
δ_t	Deslocamento total do indentador
R	Raio externo do duto
R_o	Raio interno inicial do duto
t	Espessura nominal do duto
L	Comprimento do duto
D, D_o	Diâmetro externo do duto
D_i	Diâmetro interno do duto
P	Pressão interna atuando sob o duto
ΔP	Gama de pressão
P_d	Pressão de projeto
P_{th}	Pressão de teste hidrostático
MOP	Máxima pressão de operação
$MAOP$	Pressão máxima de operação admissível
M_o	Momento plástico
N_o	Força plástica de membrana
E	Módulo de rigidez
S_y	Limite de escoamento
$SMYS$	Limite de escoamento mínimo especificado para o material
S_u	Limite último de tração
J	Energia de Impacto
S_f'	Resistência ao colapso plástico
w	Largura da massa
L'	Comprimento da massa
d_r	Profundidade remanescente da massa
d_{max}	Profundidade máxima da massa
d_o	Profundidade máxima da massa criada com pressão
d_i	Profundidade da massa com diversos valores de pressão

R_1	Raio de curvatura da mocha na direção circunferencial
R_2	Raio de curvatura da mocha na direção longitudinal
$\%R$	Porcentagem de recuperação elástica
RR	Razão de recuperação elástica
$\Delta\sigma$	Gama de tensão
σ_{\max}	Tensão máxima
σ_{\min}	Tensão mínima
σ_a	Tensão alternada
σ_m	Tensão média
R	Razão de tensões
σ_{ai}	Tensão alternada do ciclo i , onde $i = 1, \dots, n$
σ_{mi}	Tensão média do ciclo i , onde $i = 1, \dots, n$
f	Fator usado no cálculo da vida à fadiga para $1E3$ ciclos
n	Número de ciclos de operação
N, N_f	Número de ciclos para iniciação de uma trinca por fadiga
S_f	Limite à fadiga associado a uma vida N
B, B'	Constante de fadiga, curva SN
C, C'	Expoente de fadiga, curva SN
k_i	Fatores de redução da vida à fadiga
K_t	Fator de concentração de tensão
K_f	Fator de concentração de tensão efetivo
K_σ	Fator de concentração na tensão
K_ϵ	Fator de concentração na deformação
K_s	Fator de concentração de tensão, RP API 579-2000
q	Sensibilidade ao entalhe
σ'	Tensão na região crítica
$\sigma_c, \epsilon_c, b, c$	Constantes de Coffin-Manson
$\Delta\epsilon$	Gama de deformação
σ_o	Tensão no primeiro ciclo usada na avaliação pelo método ϵN
D_{total}	Dano total
D_o	Dano no primeiro ciclo
ϵ_i	Deformação na parede interna, ASME B31.8-2003
ϵ_o	Deformação na parede externa, ASME B31.8-2003

ε_1	Deformação de flexão circunferencial, ASME B31.8-2003
ε_2	Deformação de flexão longitudinal, ASME B31.8-2003
ε_3	Deformação estensional na direção longitudinal, ASME B31.8-2003
D_{\max}	Diâmetro máximo na seção transversal da região danificada
D_{\min}	Diâmetro mínimo na seção transversal da região danificada
ΔD	Ovalização, expressa em percentagem.
RSF	Fator de resistência remanescente (Remaining Stress Factor), RP API 579-2000
P_o	Pressão hidrostática externa
P_i	Pressão interna de operação
[KT]	Matriz de rigidez tangencial
{ Δu }	Incremento de deslocamento
{ F_a }	Vetor de carga aplicada
{ F_n }	Vetor de força interna resultante
[Kinc]	Matriz tangente principal
[Ku]	Matriz de deslocamento inicial
[$K\sigma$]	Matriz inicial de tensão
[Ka]	Matriz de carga inicial
R	Convergência
σ_R	Tensão real
ε	Deformação real
S	Tensão de engenharia
e	Deformação de engenharia
F	Fator de projeto usado no cálculo das hipóteses de carregamento
ε_{el}	Deformação elástica
ε_{pl}	Deformação plástica
P_{dano}	Pressão de ruptura do duto com dano
P_{novo}	Pressão de ruptura do duto novo