



**Bruno Felipe Silva**

**Fadiga em Dutos com Mossas  
Solicitados por Ciclos de  
Pressão Interna**

**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

Rio de Janeiro  
Setembro de 2012



**Bruno Felipe Silva**

**Fadiga em Dutos com Mossas  
Solicitados por Ciclos de  
Pressão Interna**

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Luiz de França Freire**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Jaime Tupiassú Pinho de astro**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco**

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de setembro de 2012

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

## **Bruno Felipe Silva**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca em 2003, é especialista em processamento de plásticos e borrachas pelo IMA-UFRJ em 2005 e em Gerência de projetos pela FGV em 2007.

### Ficha Catalográfica

Silva, Bruno Felipe

Fadiga em dutos com mossas solicitados por ciclos de pressão interna / Bruno Felipe Silva; orientador: José Luiz de França Freire. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

v., 98 f.: il. ; 29,7 cm.

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Fadiga (Engenharia Mecânica). 3. Mossa. 4. Dutos. 5. Elementos Finitos (Engenharia Mecânica). Freire, José Luiz de França (José Luiz de França Freire). II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

*Ao meu pai João de Deus,  
minha mãe Sueli Regina e  
minha avó Antonietta*

## Agradecimentos

À minha doce esposa Suelen da Silva Lourenço Felipe Silva pelo apoio e exemplo de dedicação em todos os momentos.

Ao meu pai João de Deus, minha mãe Sueli Regina, minha avó Antonietta e meu irmão Fábio pelos incansáveis ouvidos à disposição e pelas sempre sábias palavras.

Aos meus sogros, Luiz Fernando e Thalita por toda a torcida.

Muito obrigado ao meu orientador José Luiz de França Freire por acreditar no meu potencial e por dividir pacientemente seus conhecimentos durante essa jornada.

Aos companheiros do Centro Tecnológico do Exército por proporcionar um ambiente favorável à pesquisa científica.

Ao colegas do Centro de Tecnologia em dutos por me apresentar à área de integridade de dutos e pelo período de convivência em parte do curso.

Ao Eng. Sérgio Cunha da Transpetro pela oportunidade de trabalhar em um ambiente de engenharia de alto nível fazendo pesquisa científica.

Aos colegas da PUC Rio pelo apoio nas horas de dificuldade durante o curso.

Aos professores das disciplinas por compartilhar seus conhecimentos por contribuir para a construção do trabalho.

Aos membros da banca pela atenção da leitura do trabalho e pela disponibilidade de participar do trabalho.

Aos amigos Décio e Claudete pelo grande apoio na reta final de escrita da dissertação.

## Resumo

Silva, Bruno Felipe; Freire, José Luiz de França. **Fadiga em Dutos com Mossas Solicitados por Ciclos de Pressão Interna**. Rio de Janeiro, 2012. 98p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Trata-se de um estudo sobre métodos de previsão de vida à fadiga de dutos com mossas submetidos a carregamento de pressão interna. Um método é proposto e com ele realiza-se previsões utilizando o método SN, sendo a influência das tensões médias calculadas segundo a parábola de Gerber. Adicionalmente são analisados outros métodos disponíveis na literatura, sendo abordados seus embasamentos teóricos, coeficientes de segurança e validações experimentais. A análise de tensões dos diferentes métodos foi realizada utilizando o Método de Elementos Finitos com o pacote computacional Abaqus 6.10, salvo nos casos em que foram fornecidas equações vindas de regressões de resultados numéricos. Todos os resultados avaliados foram comparados com resultados experimentais disponíveis na literatura, sendo um total de oito curvas avaliadas em seis casos em que se alteraram a espessura do tubo, o diâmetro do punção que gerou a mossa, a pressão inicial e o material do tubo. Os resultados indicam que as diferenças conceituais entre os diferentes métodos se refletem nas previsões geradas e que o método proposto faz previsões próximas aos resultados experimentais, sem o uso de fatores de segurança ou de confiabilidade.

## Palavras-chave

Fadiga; mossa em dutos; Método dos Elemento Finitos

## Abstract

Silva, Bruno Felipe; Freire, José Luiz de França (Advisor). **Fatigue in Pipelines with Dents Loaded by Cyclic Internal Pressure**. Rio de Janeiro, 2012. 98p. MSc. Dissertation Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study aims to analyze different methods to predict the fatigue life in pipelines with dents loaded with internal pressure. A new method is proposed which makes previsions based on the SN method; the mean pressure is taken into account according to the parabola of Gerber. Some other methods available in the literature are analyzed in terms of their safety factors and experimental validation. The stress analysis has been performed for the different methods using Abaqus 6.10, a Finite Element analysis software, except in those cases where a regression curve, based on numerical results, are provided. All the results found have been compared against experimental results available in the literature. A total of eight methods have been evaluated in six cases with different linepipe wall thicknesses, indenter diameters, materials and initial pressures. The results indicate that that different methods produce different life predictions, and the new method presented predict lives with a good match to the experimental data without using safety or reliability factors.

## Keywords

Fatigue; pipeline dents; Finite Elements method

## Sumário

1 - Introdução	19
1.1 - Considerações iniciais	20
1.2 - Organização da dissertação	21
2 - Revisão Bibliográfica	23
2.1 – Fenomenologia	23
2.1.1 - Processo de criação da mocha	23
2.1.2 - Efeito do retorno elástico e arredondamento	25
2.1.3 - Efeito da pressão de teste	26
2.1.4 - Efeitos da tensão máxima (e da tensão média)	26
2.1.5 - Efeito da geometria da mocha	29
2.1.6 - Efeito da ovalização	29
2.1.7 - Efeito da restrição da mocha	30
2.1.8 - Efeito da interação entre mochas adjacentes	31
2.1.9 - Efeito da tenacidade (toughness)	31
2.1.10 - Efeito da relação entre o diâmetro e espessura do tubo	31
2.2 - Métodos de previsão de vida à fadiga	32
2.2.1 - EPRG 1995	32
2.2.2 - EPRG 2000	34
2.2.3 - SES 1994	36
2.2.4 - ASME 2010	38
2.2.5 - API 1156	40
2.2.6 - CENPES 2009	41
2.2.7 - Transpetro / Coppe UFRJ	42
2.2.7.1 - Pinheiro, 2006	42
2.2.7.2 - Pinheiro et. al., 2008	42
2.2.7.3 - Pinheiro et. al., 2009	43
2.2.7.4 - Cunha et. al., 2009	44
2.2.8 - Ávila	45
3 – Metodologia	47
3.1 - Dados experimentais da literatura	47

3.2 - Método proposto	49
3.3 - Método de Ávila	53
3.4 - Cunha et. al.	53
3.5 - PDAM	55
3.6 - API 579 NÍVEL 2	56
3.7 - API 579 N3 / ASME Sec VIII div. 2	57
3.8 - API 1156	59
3.9 – CENPES	60
4 - Modelo Numérico	61
4.1 - Descrição do modelo	61
4.2 - Resultados de Elementos Finitos	65
5 -Resultados de Fadiga	70
5.1 - Método Proposto	70
5.2 - Método de Cunha	74
5.3 - Método de Ávila	76
5.4 - PDAM	77
5.5 - API 579 NÍVEL 2	79
5.6 - API 579 N3 / ASME Sec VIII div. 2	80
5.7 - API 1156	82
5.8 - CENPES	84
6 - Conclusões	87
6.1 - Sumário	87
6.2 - Conclusões	87
6.2.1 - Resultados numéricos	87
6.2.2 - Resultados de fadiga	88
6.3 - Sugestões para trabalho futuros	89
7 – Referências bibliográficas	90
Apêndices	93

## Lista de figuras

Figura (1.1) – Mossa em um tubo	20
Figura (2.1) - Histórico típico força-deslocamento radial durante a criação da mossa de um tubo pressurizado	23
Figura (2.2) Processo de indentação	25
Figura (2.3)– Tensão senoidal senoidal flutuante	27
Figura (2.4) – Pares de tensão média x alternada equivalentes	27
Figura (2.5) – Regra elíptica de tensão equivalente com diversos parâmetros	28
Figura (2.6) – Regra de tensão equivalente com as linhas de Goodman, Gerber e Soderberg	29
Figura (2.7) – a) Mossa não contida, b) mossa contida	30
Figura (2.8) – Previsão de vida à fadiga versus resultados experimentais	33
Figura (2.9) Efeito do fator de confiabilidade na previsão de vida à Fadiga	34
Figura (2.10) – Previsão de vida à fadiga versus resultados experimentais	35
Figura (2.11) – Previsão de vida à fadiga versus resultados experimentais Curva X'	37
Figura (2.12) – Previsão de vida à fadiga versus resultados experimentais Curva DOE	37
Figura (2.13) – Curvas de fadiga com base no método ASME	39
Figura (2.14) – Previsão de vida à fadiga versus resultados experimentais	40
Figura (2.15) – Previsão de vida à fadiga versus resultados Experimentais	41
Figura (3.1) – Fator de tamanho $k_b$ em função do diâmetro do corpo de prova	51
Figura (3.2) – Tubo com mossa	52

Figura (4.1) – Modelo do tubo, e punção com regiões de divisão de Malha	61
Figura (4.2) – Malha de elementos Finitos	62
Figura (4.3) – Curva tensão verdadeira x deformação plástica do API 5L X70	63
Figura (4.4) – Resultado de tensões circunferenciais no segundo ciclo de pressão interna	65
Figura (4.5) – Histórico de tensões em função dos passos de carga	66
Figura (4.6) – Curva tensão versus deformação circunferencial no nó 71	66
Figura (4.7) – Gráfico da força de indentação em função do deslocamento do punção	67
Figura (4.8) – Gráfico da força de indentação em função do deslocamento do punção	68
Figura (4.9) – Variação da deformação circunferencial a 50.8 mm (2")	69
Figura (4.10) – Variação da deformação circunferencial a 101.4 mm (4") da linha de centro transversal	69
Figura (5.1) – Tensão alternada de von Mises, casos 7 e 8	70
Figura (5.2) – Tensão média de von Mises, casos 7 e 8	71
Figura (5.3) – Previsão de vida, casos 7 e 8	72
Figura (5.4) – Comparação entre previsão pelo método Silva e resultados experimentais	73
Figura (5.5) – Comparação entre previsão pelo método Cunha e resultados experimentais	75
Figura (5.6) – Comparação entre previsão pelo método Ávila e resultados experimentais	77
Figura (5.7) – Comparação entre previsão pelo método PDAM e resultados experimentais	78
Figura (5.8) – Comparação entre previsão pelo método API 579 e resultados experimentais	80
Figura (5.9) – Tensão alternada de método ASME , casos 7 e 8	81
Figura (5.10) – Comparação entre previsão pelo método ASME 2010 e resultados experimentais	82

Figura (5.11) – Comparação entre previsão pelo relatório API 1156 e resultados experimentais	84
Figura (5.12) – Tensão alternada de método Tresca, casos 7 e 8	85
Figura (5.13) – Comparação entre previsão pelo método CENPES e resultados experimentais	86

## Lista de tabelas

Tabela (1.1) Causas de incidentes e percentuais de ocorrência	19
Tabela (1.2) – Programas de fadiga em dutos submetido a pressão interna	21
Tabela (2.1) – Correlação entre método Cunha, 2009 e testes em escala real	45
Tabela (3.1) – Parâmetro de testes de fadiga	48
Tabela (3.2) Coeficientes para fadiga	57
Tabela (4.1) - Tamanho das arestas dos elementos da malha de elementos finitos	62
Tabela (4.2) – Propriedades elásticas do API 5L X70	62
Tabela (5.1) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo Silva, 2012	72
Tabela (5.2) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo Cunha et. al.	75
Tabela (5.3) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga de acordo com a referência Ávila, 2007	76
Tabela (5.4) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo PDAM	78
Tabela (5.5) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga de acordo com API 579	79
Tabela (5.6) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo ASME, 2010	81
Tabela (5.7) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga segundo API 1156	83
Tabela. (5.8) - Parâmetros de cálculo e a vida à fadiga por CENPES, 2009	85

## Lista de símbolos

API - American Petroleum institute

ASME – America Society of Mechanical Engineers

$b, B$  - Expoente da curva de Woller

BVP – Boiler and Pressure Vesel

$c$  - começo do ciclo

$C$  - Coeficiente da curva de Woller

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello

$C_{us}$  - Fator para adequação de unidades

$C_{ul}$  - Fator para adequação de unidades

$C_s$  - Fator de forma da massa

$d_{ef}$  – Diâmetro efetivo

$d_{a0}$  - Profundidade da massa

$D$  - Diâmetro nominal

DIN - Deutsches Institut für Normung

DOE - Department of Energy - UK

DOT - *U.S. Department of Transportation*

$d$  - Profundidade da massa

$Dist$  – Distância

$\Delta\sigma$  – Variação de tensão

$\Delta p$  – Variação de pressão

$\Delta S_T$  – Variação da tensão de Tresca

$E$  – Módulo de elasticidade

$E_T$  – Módulo de elasticidade na temperatura de trabalho

EPRG - *European Pipeline Research Group*

$\varepsilon_a, \varepsilon_{ij}^a$  – Deformação alternada

$\varepsilon_{eff}$  – Deformação efetiva

$\varepsilon_{EP}$  – Deformação elastoplástica

$\varepsilon_{ii}^c, \varepsilon_{ii}^f$  - componentes de deformação no início e fim de ciclo

$\varepsilon_{peq}$  – Deformação plástica equivalente

$\varepsilon_N$  – Método deformação versus número de ciclos

$f$  - Largura

$f$  – final do ciclo

FCT – Fator de concentração de tensões

$F_f$  - Fator de segurança

$h$  - espessura

$H$  - relação entre a profundidade da mocha

$H_0$  - profundidade remanescente das mochas

$k_a$  - Fator de acabamento

$k_b$  - Fator de tamanho

$k_c$  - Fator de carregamento

$K_d, K_s, K_t$  - Fatores de concentração de tensão

$K_g$  – Parâmetro de geometria da mocha

$l$  – Comprimento da mocha

$L$  – Comprimento do tubo

MAOP – maximum allowable operating pressure

$N, N_{SES94X}, N_{SES94DOE}, N_{API1156}$  – Número de ciclos

$P$  – Pressão

PDAM - PIPELINE DEFECT ASSESSMENT MANUAL

$PR$  – Parâmetro adimensional de distância

PRCI - Pipeline Research Concil International)

$R$  – Parâmetro de fator de concentração de tensões

$r, s$  – Expoentes da regra elíptica

$S_a$  – Tensão alternada

SES – Stress Engineering Services

$S_f$  - Limite de fadiga

$S_L$  - limite de vida infinita à fadiga

SMYS - Limite de escoamento mínimo especificado para o material

$S_R$  - Limite de resistência à fadiga

$S_u$  valor da tensão última

$T$  – Parâmetro de cálculo de tensão equivalente

$t$  - espessura

$\tau_a, \tau_{ij}^a$  - tensão cisalhante alternada

$\tau_{ij}^m$  - tensão cisalhante média

$\tau_{ij}^f, \tau_{ij}^c$  - Componentes tensão cisalhante no início e fim de ciclo

$\sigma_{VM}^a$ - Tensão alternada equivalente

$\sigma_a, \sigma'_a$  - Tensão alternada

$\sigma_{ii}^a$  - Componente de tensão alternada

$\sigma_{ii}^c, \sigma_{ii}^f$  - Componentes tensão no início e fim de ciclo

$\sigma_m$  - Tensão média

$\sigma_{max}$ - Tensão máxima

$\sigma_{min}$ - Tensão mínima

$\sigma_{ii}^m$  – Componente de tensão média

$\sigma_{VM}^m, \sigma'_m - \sigma_{ii}^a$  – tensão média

$\sigma_u$  – Tensão última

$\nu$  – Coeficiente de poisson

X, Y, Z – Eixos cartesianos

XY, YZ, XZ – Planos cartesianos

$w$  – Largura da massa

*Suba o primeiro degrau com  
fé. Não é necessário que você  
veja toda a escada. Apenas  
dê o primeiro passo.*

*Martin Luther King*