

Referências bibliográficas

- 1 FREIRE, José Luiz de França (Org.). **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: ABCM, 2009. 528 p.
- 2 MARTINS, Ricardo R.; NORONHA JR., Dauro B. A comparison of some methods to estimate the fatigue life of plain dents. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2009, Rio de Janeiro. **Trabalhos Técnicos...** Rio de Janeiro: IBP, 2009. p. 1-10.
- 3 ALLOUTI, M. et al. Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline. **Engineering Failure Analysis**, Maryland Heights, MO, v. 21, p. 1-102, Apr, 2012.
- 4 SHIGLEY, Joseph E.; MISCHEKE, Charles, R. **Mechanical engineering design. 6th ed.** Boston: McGraw-Hill, 2001. 1030 p.
- 5 BROOKER, Daniel C. Denting of pressurised pipelines under localised radial loading. **International Journal of Mechanical Sciences**, Maryland Heights, MO, v. 46, n. 12, p. 1783–1805, Dec. 2004.
- 6 COSHAM, Andrew. **Assessment methods for dents and gouges in pipelines**: a report to the pipeline defect assessment manual joint industry project. England: Penspen, 2002. 220 p.
- 7 ÁVILA, Maira Amanda Vargas. **Análise de integridade estrutural de dutos com moedas simples**. 2007. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- 8 CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; MEGGIOLARO, Marco Antonio. **Fadiga**: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. 494 p. Conteúdo: v. 1. Iniciação de Trincas.
- 9 SANTOS JÚNIOR, Auteliano Antunes dos. **Sistemas mecânicos**: apostila 1 – introdução e fadiga. Campinas, SP: UNICAMP/FEM, 2002. 41 p.
- 10 PINHEIRO, Bianca de Carvalho. **Avaliação da fadiga de dutos de transporte de hidrocarbonetos submetidos a danos mecânicos**. 133 f. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica)-Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE/ Rio de Janeiro, 2006.
- 11 ALEXANDER, C. R.; KIEFNER, J. F. **Effects of smooth and rock dents on liquid petroleum pipelines**. Washington, D. C., American Petroleum Institute, 1997. 236 p. API Publication 1156.
- 12 HYDE, T. H.; LUO, R.; BECKER, A. A. Prediction of three-dimensional residual stresses at localized indentations in pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Maryland Heights, MO, v. 93–94, p. 1–11, May/June 2012.

- 13 FOWLER, J.R. Criteria for dent acceptability in offshore pipeline. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1993, Houston, Texas. **Proceedings...** Houston, Texas 1993. p. 481-493. OTC 7311.
- 14 PINHEIRO, Bianca de Carvalho; PASQUALINO, Ilson Paranhos; CUNHA, Sérgio Barros da. Fatigue life analysis of steel pipelines with plain dents under cyclic: internal pressure. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 7., 2008, Canada. **Proceedings...** Canada: ASME, 2008. p. 1-10.
- 15 HYDE, T. H.; LUO, R.; BECKER, A. A. Elastic-plastic response of unpressurised pipes subjected to axially-long radial indentation. **International Journal of Mechanical Sciences**, Maryland Heights, MO, v. 47, n. 12, p. 1949–1971, Dec. 2005.
- 16 HYDE, T. H.; LUO, R.; BECKER, A. A. Force-deflection analysis of offset indentations on pressurized pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Maryland Heights, MO, v. 84, n. 6, p. 368-377, June 2007.
- 17 HYDE, T. H.; LUO, R.; BECKER, A. A. Analysis of stresses in pipes indented by long external indentations and subsequent stress variations due to pressure fluctuations. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Maryland Heights, MO, v. 86, n. 7, p. 428–434, July 2009.
- 18 ROSENFELD, Michael J. Factors to consider when evaluating damage on pipelines. **Oil & Gas Journal**, Houston, p. 1-9, Sept. 2002.
- 19 COSHAM, Andrew; HOPKINS, Phil. **The pipeline defect assessment manual (PDAM):** a report to the PDAM joint industry project. England: Penspen, 2003, 434 p.
- 20 JASKE, Carl E.; RUBAL, Melissa J. Fitness for service document comparison: API 579 vs. PDAM. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 8., 2010, Canada. **Proceedings...** Canada: ASME, 2010. p. 1-7.
- 21 RACE, Julia M.; HASWELL, Jane V.; OWEN, Robert; DALUS, Barry. UKOPA dent assessment algorithms: a strategy for prioritising pipeline dents. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 8., 2010, Canada. **Proceedings...**Canada: ASME, 2010. p. 1-11.
- 22 AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **API 579-1/ASME FFS-1: fitness-for-service**. 2nd. ed. New York, 2007.
- 23 AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section VIII -Division 2: alternative rules: rules for construction of pressure vessels**. New York, 2010.
- 24 SANT'ANNA, Hervandil; LEAL, Murilo Fonseca; JAMBO, Hermano Cezar Medaber. Avaliação da vida à fadiga dos vasos de PSA utilizando ASME VIII-2 (2007) e BS-7910. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 11., 2011, Recife. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2011. p. 1-20. Inclui bibliografia.
- 25 O'DONNELL, W. J. Code design and evaluation for cyclic loading—

- sections III and VIII. In: RAO, K. R. (Ed.). **Companion guide to the ASME boiler & pressure vessel code**. 2nd. ed. New York: ASME, 2006. cap. 39. p. 725-758.
- 26 ALEXANDER, Chris; BROWNLEE, Kirk. Methodology for assessing the effects of plain dents, wrinkle bends, and mechanical damage on pipeline integrity. In: CORROSION 2007, 2007, Tennessee. **Conference & Exposition...**Tennessee: NACE INTERNATIONAL, 2007. p. 1-19.
 - 27 COSHAM, Andrew; KIRKWOOD, Mike. Best practice in pipeline defect assessment. . In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 2000. **Proceedings...** Canada. Proceedings... Canada: ASME, 2000. p. 1-18.
 - 28 BOLTON, Brock; SEMIGA, Vlado; DINOVITZER, Aaron; TIKU, Sanjay; ALEXANDER, Chris. Towards a validated pipeline dent integrity assessment model. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 7., 2008, Canada. **Proceedings...** Canada: ASME, 2008. p. 1-11.
 - 29 PINHEIRO, Bianca de Carvalho; PASQUALINO, Ilson Paranhos. Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure. **International Journal of Fatigue**, v. 31, n. 5, p. 962–973, May 2009.
 - 30 CUNHA, S. B.; PASQUALINO, I. P.; PINHEIRO, B. C. Stress-life fatigue assessment of pipelines with plain dents. **Fatigue Fracture Engineering Materials & Structures**, England, v. 32, n. 12, p. 961–974, Dec. 2009.
 - 31 BOLTON, Brock; SEMIGA, Vlado; TIKU, Sanjay; DINOVITZER, Aaron; ZHOU, Joe. Full scale cyclic fatigue testing of dented pipelines and development of a validated dented pipe finite element model. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 8., 2010, Canada. **Proceedings...**Canada: ASME, 2010. p. 1-10.
 - 32 SILVA, Bruno Felipe; FREIRE, José Luiz de França. Tensões cíclicas causadas por carregamento de pressão em um duto com mocha. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 30., 2012. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2012. p. 420-433. Inclui bibliografia.
 - 33 ABAQUS. **User's and theory manuals: release 6.10**. [Washington?]: Hibbitt, Karlsson, Sorensen, 2010.
 - 34 VARGAS, M. A.; FREIRE, J. L. F. Avaliação do processo de indentação de mochas simples mediante o método dos elementos finitos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 10., 2009, Salvador. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2008. p. 1-17. Inclui bibliografia.
 - 35 SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles, R. **Mechanical engineering design. 5th ed**. Boston: McGraw-Hill, 1989. 779 p.

Apêndice A

Simulação da força de indentação

A simulação do processo de criação da mosca, e a geração de modelos que tratam da previsão da força de indentação versus deslocamento radial do punção são assuntos abordados em diversas referências [5, 7, 10-17].

No capítulo 4 foram observadas diferenças entre valores experimentais publicados na referência [31] e o modelo desenvolvido nesta dissertação. A referência [34] discute diversos fatores no modelo numérico que influenciam as respostas de força de indentação e deslocamento do punção de uma mosca transversal.

O modelo utilizado na referência [34] foi reproduzido e a curva força versus deslocamento foi levantada. Os parâmetros do modelo são apresentados na Tab. (A.1)

Tabela (A.1) – Dimensões dos corpos de prova e do indetador usados no ensaio experimental [34]

Componente	Parâmetro	Valor médio [mm]
Espécime tubular	Diâmetro externo	76
	Espessura	2
	Comprimento	600
Indetador	Diâmetro	25
	Comprimento	70

As propriedades elastoplásticas do material utilizado nos ensaios experimentais são apresentados na Tab. (A.2).

Tabela (A.2) – Propriedade do material do modelo elastoplástica [34]

Elástico		Bilinear isotrópico / cinemático	
Módulo de rigidez - E	200GPa	Limite de escoamento -Sy	384.94MPa
Coefficiente de Poisson -v	0.3	Módulo Tangencial plástico	506.15

Os resultados experimentais de força de reação em função do deslocamento do indentador e profundidade da mocha após o retorno elástico são apresentados na Tab. (A.3). As forças de indentação medidas foram de 13.41 kN e 13.38 kN, e em ambos os teste, a profundidade máxima após o retorno elástico foi de 7.2 mm.

Tabela (A.3) – Resultados do teste de indentação [34]

Teste	Força de reação máxima	Deslocamento máximo do indentador	Profundidade da mocha recuperada elasticamente
M_T1	13.41KN	11.18mm	7.2mm
M_T2	13.38KN	11.08mm	7.2mm

O modelo de Elementos Finitos utilizado no estudo foi composto de uma malha de elementos tetraédricos de 20 nós (interpolação quadrática), com maior refinamento na região de contato do tubo com o indentador.

O refinamento da malha foi estudado a partir da comparação entre quatro modelos com densidades diferentes quanto ao tempo de processamento e a tensão de von Mises residual. Optou-se por uma malha intermediária, e a comparação entre as curvas força x deslocamento apresentaram uma correlação adequada em todas as malhas, e um número intermediário de elementos foi adotado com o objetivo de conciliar o resultado de tensão com o tempo de processamento.

O modelo de plasticidade foi avaliado a partir de quatro aproximações: bilinear isotrópico, bilinear cinemático, multilinear isotrópico e multilinear cinemático.

A comparação dos valores experimentais com modelos numéricos que variam o modelo de plasticidade são mostrados na Fig. (A.1).

Também encontra-se presente na Fig. (A.1) a reprodução do modelo realizada no software Abaqus 6.10 com os mesmos parâmetros descritos na referência [34] no modelo de plasticidade bilinear isotrópico.

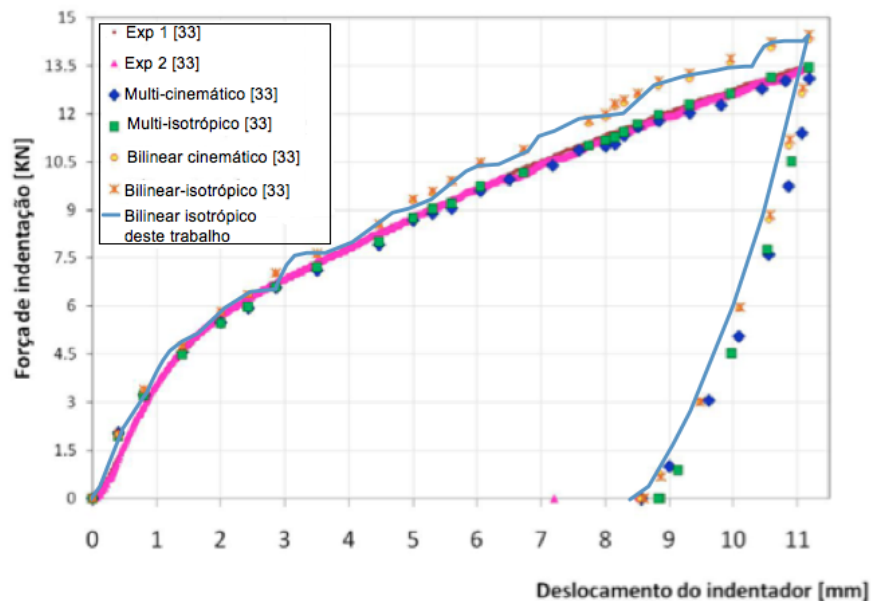


Figura (A.1) – Influência dos modelos de plasticidade na curva de indentação/recuperação elástica

Os resultados mostram que os modelos que consideram a curva multilinear apresentam resultado de força de indentação compatíveis com os resultados experimentais, enquanto os modelos com a curva bilinear calculam força maior que as medidas na referência em torno de 6%. Os valores de força encontrados na reprodução conduzida neste trabalho mostra a força de reação compatível com o caso correspondente publicado na referência. O modelo utilizado na referência nos ensaios seguintes foi o multilinear cinemático.

O contato do tubo com o solo foi avaliado segundo três condições de contato: *No-separation*, *Frictionless*, e *Frictional*. O primeiro restringe o deslocamento vertical do tubo na região de contato, condição correspondente à condição de contorno de deslocamento zero no eixo vertical. O modelo *Frictionless* desconsidera o atrito entre os componentes. A propriedade *Frictional* considera o atrito entre as partes, sendo adotado o valor de 0.15 típico do contato metal-metal.

O modelo de contato *No-separation* apresentou maior resultado de força de reação, enquanto os outros acompanharam os valores experimentais. O modelo adotado na referência nas análises posteriores foi o *Frictionless*.

Apêndice B

Dispersão de parâmetros de fadiga

Os resultados experimentais de fadiga encontrados na referência [31] apresentam uma dispersão que é típica de testes de fadiga, e a previsão de vida apresentada diversas vezes é calculada de forma determinística e não leva em conta variação nos parâmetros de correção.

A influência dessa dispersão pode ser observado de diversas formas, uma delas é verificar na curva de Gerber a dispersão na tensão de resistência à tração e no limite de vida infinita à fadiga. Segundo a referência [35], Os desvios-padrão para S_e e S_u são respectivamente 15% e 6%.

A parábola de Gerber é descrita pela Eq. (B.1)

$$\left[\frac{\sigma_a}{S_e}\right]^1 + \left[\frac{\sigma_m}{S_u}\right]^2 = 1 \quad [B.1]$$

A curva de Gerber pode ser modificada para considerar os limites superior e inferior dos valores de S_e e S_u . A parábola de Gerber com seus limites superior e inferior são ilustrados na Fig. (B.1)

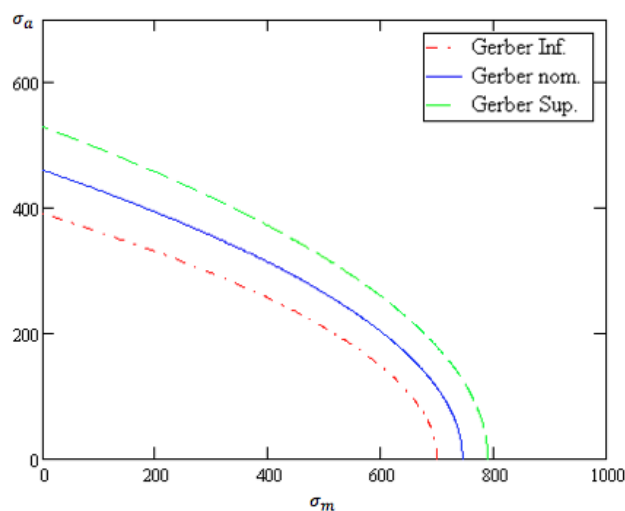


Figura (B.1) – Curva de Gerber com limites superior e inferior

Ao se aplicar os valores de desvio-padrão em S_e e S_u na curva de fadiga, encontram-se as curvas de mais ou menos um desvio-padrão,.

Para se calcular a dispersão de vida, causada pelas incertezas de obtenção das propriedades mecânicas S_e e S_u , e que pode ser encontrada quando da aplicação do método proposto nesta dissertação, usou-se o seguinte procedimento.:

- 1) Cálculo das tensões alternadas e médias nos pontos críticos da moesa via Elementos Finitos.
- 2) Cálculo das tensões equivalentes alternadas segundo Gerber.
- 3) Cálculo das vidas mínima, média e máxima usando a tensão alternada equivalente a partir da sua entrada na Figura B2,

Assim, a influência da tensão média é considerada segundo a parábola de Gerber. As curvas de resistência à fadiga (limite superior e inferior) estão apresentados na Fig. (B.2). O gráfico se refere à curva de fadiga de acordo com o método proposto nos casos 17 e 18, que tem tensões alternada e média equivalente de 405 MPa e 88 MPa, respectivamente.

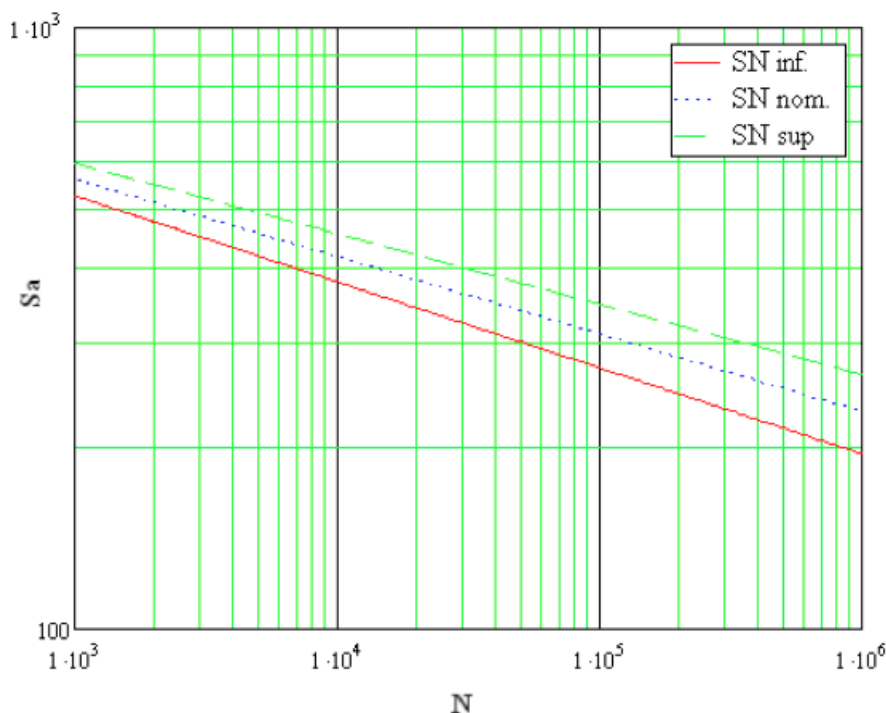


Figura (B.2) – Curva SN considerando dispersão experimental de parâmetros

Para a tensão alternada de 405 MPa as vidas previstas possuem valores mínimo, médio e máximo de são 6.10^3 , $1.2.10^4$ e $2.6.10^4$. As vidas medidas experimentalmente para este caso são da ordem de $1.1.10^4$ e $1.6.10^4$.

Pode-se observar que a dispersão de parâmetros utilizados, no cálculo da vida à fadiga é considerável, e sua variação merece atenção no cálculo de vidas. Sempre que possível devem ser utilizados parâmetros em que se conheça a variação estocástica que podem ser usados em uma análise de confiabilidade. Outra prática útil, é o uso de fatores de segurança para valores de tensão ou de vida.