

## 8

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] José Luiz F. Freire. **Análise da Integridade de Dutos. Noções Básicas.** Engenharia de Dutos 2004.
- [2] National Transportation Safety Board. PB96-917002 NTSB/SIR-96/02. **Pipeline Special Investigation Report, Evaluation of Accident Data and Federal Oversight of Petroleum Product Pipelines.** Washington, D.C. 20594, 1996.
- [3] Eiber B. **Overview of Integrity Assessment Methods for Pipelines.** Washington Cities and Countries Pipeline Safety Consortium. Columbus. Ohio. 2003.
- [4] Rosenfeld M.J. **Factors to Consider when Evaluating Damage on Pipelines.** Oil & Gas Journal article. September 9. 2002.
- [5] Cosham A. & Hopkins P. Pespem Limited. **NR00018/4238.1.10/R1.01 Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM).** 2003.
- [6] Cosham A. & Hopkins P. **The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual.** International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol 81. 2004. pp. 127 – 139.
- [7] Brooker, D. **Denting of pressurised pipelines under localised radial loading.** International Journal of Mechanical Sciences. Vol 46. pp. 1783-1805, 2004.
- [8] Simões G. **Desenvolvimento de Dispositivo para a Recuperação da Geometria de Dutos Danificados por Amassamento.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. PUC-Rio. 2005.
- [9] Brooker D. **A Numerical Study on the Lateral Indentation of Continuously Supported Tubes.** Journal of Construction Steel Research Vol 60. pp. 1177-1192. 2004.
- [10] Liu J.H. & Francis A. **Theoretical Analysis of Local Indentation on Pressured Pipes.** International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol 81. pp. 931-939. 2004.
- [11] International Organization for Standardization. ISO 16708 – **Petroleum e natural gas industries-Pipeline transportation systems-Reliability Based Limit States Methods.** 2006.

[12] Rosenfeld M.J. Et. Al. **Basis of the New Criteria in ASME B31.8 for Prioritization and Repair of Mechanical Damage**. IPC2002-27122. Proceedings of IPC.02. 4th International Pipeline Conference. Calgary. Canada. 2002.

[13] Rosenfeld, M.J. PR 218-9405. **Development of a Model for Fatigue Rating Shallow Unrestrained Dents**. Pipeline Research Council International Inc. Whortington. 1996.

[14] Dinovitzer A. **Geometric Dent Characterization**. IPC2002-27076. Proceedings of IPC.02. 4th International Pipeline Conference. Calgary. Canada. 2002.

[15] Rinehart A. J. & Keating P.B. **Length Effects on Fatigue Behavior of Longitudinal Pipeline Dents**. IPC2002-27244. Proceedings of IPC.02. 4th International Pipeline Conference. Calgary. Canada. 2002.

[16] Olson M. **Mechanical Damage Detection with MFL Technology**. Rio Pipeline 2003. IBP. 2003.

[17] Tito Silveira Engenharia e Consultoria Ltda. **Documentação Técnica de Inspeção e Avaliação de Danos Tipo Mossa**. 2001.

[18] Documentos técnicos da empresa Michael Baker Corporation Projects.  
<http://www.bakerprojects.com/phmsa/pdf/Dent%20Study-Final%20Report.pdf>.

[19] Rosenfeld M.J etl. al.. **Deterministic Assessment of Minor Mechanical Damage on Pipelines**. IPC2006-10513. Proceedings of IPC.06; 4th International Pipeline Conference. Calgary. Canada. 2006.

[20] Jaime Tuppiasú Pinho de Castro. **Mecânica de Fratura e Fadiga**. Engenharia Mecânica. Notas de aula. 2005.

[21] API Specification 5L. **Specification for Line Pipe**. Forty Second Edition. 2000. Americam Petroleum Institute

[22] ASME B31.4. **Pipeline Transportation System for liquid Hydrocarbons and Others Liquids**. ASME Code for Pressure Piping. 2002 Edition.

[23] ASME B31.8. **Gas Transmission and Distribution Piping System (Revision of ASME B31.8-1999)**. ASME Code for Pressure Piping. 2003 Edition.

[24] Cervera M. & Blanco E. **Mecánica de estructuras Libro 1 - Resistencia de materiales**. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. SL. 2001.

[25] Lee Y. L. **Fatigue Testing and Analysis –Theory and Practice**. Elsevier Inc.. United States of America. 2005.

- [26] Carvalho P.B. **Avaliação da Fadiga de Dutos de Transporte de hidrocarbonetos Submetidos a Danos Mecânicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Engenharia Oceânica. 2006.
- [27] Dias da Silva V. **Mechanics and Strength of Materials**. Springer. Netherlands. 2006.
- [28] Bjornoy. O.H. & Bruce P. **Residual Strength of Dented Pipelines. DNV Test Results**. Proceedings of the Tenth (2000) International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle. USA. 2000.
- [30] Olson M. **Mechanical Damage Detection with MFL Technology**. Rio Pipeline 2003. IBP. 2003.
- [31] Francis A. et. al., **Life Extension of a High Pressure Transmission Pipeline Using Structural Reliability Analysis**, IPC2002-27159, Proceedings of IPC.02; 4th International Pipeline Conference. Calgary. Canada. 2002.
- [32] McCoy J. & Ironside S. **Dent Management Program**. IPC04- 0393. IPC 2004. International Pipeline Conference 2004. Calgary. Alberta. 2002.
- [33] Adam J. Rinehart A.J. & Keating P.B. **Length Effects on Fatigue Behavior of Longitudinal Pipeline Dents**. IPC2002-27244. Proceedings of IPC.02. 4th International Pipeline Conference. Canada. 2002.
- [34] Fowler.J.R. et. al. **Fatigue Life of Pipelines with Dents and Gouges Subjected to Cyclic Internal Pressure**. PD Vol. 69. Pipeline Engineering. ASME 1995.
- [35] Choi H.S. & Bomba J.G. **Acceptance criteria of defects in undersea pipeline using internal inspection**. Ocean Engineering No. 30. 2003.
- [36] McCoy J. & Ironside S. **Dent Management Program**. IPC04- 0393. IPC 2004. International Pipeline Conference. Calgary. Alberta. 2004.
- [37] API Publication 1156. **Effects of Smooth and Rock Dents on Liquid Petroleum Pipelines (Phase I e Phase II)**. American Petroleum Institute. 1999.
- [38] Rosenfeld. PE et. al.. **Development of Acceptance Criteria for Mild Ripples in Pipeline Field Bends**. IPC2002- 27124. Proceedings of IPC.02. 4th International Pipeline Conference. Canada. 2002.
- [39] Fowler et. Al.. PR 201-927/ PR 201-9324. **Cyclic Pressure Fatigue Life of Pipelines with Plain Dents, Dents with Gouges and Dent with Welds**. Stress Engineering Services. Inc.. 1994.
- [40] Macdonald K.A.; Cosham A. **Best practice for the assessment of defects in pipelines – gouges and dents**. Engineering Failure Analysis. 2004.

- [41] Bastos A. & Carneiro L. **Análise da Influência de Defeitos na Tensão de Ruptura em Tubos e uma Proposta de Reparo**. Projeto de Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica. PUC-Rio. 2006.
- [42] Albernaz R. **Análise de Reparo Metálico Colado em Dutos com Mossas**. Projeto de Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica. PUC-Rio. 2006.
- [43] API Recommended Practice 579. **Fitness for Service**. Section 8. Assesment of Weld Misalignment and Shell Distortions. American Petroleum Institute, First Edition. 2000
- [44] Braga D. et al. **Use of B-Splines in the Assessment of Strain Levels Associated with Plain Dents**; Rio Pipeline Conference & Exposition 2005. Rio de Janeiro. 2005.
- [45] Del Coz D & Suárez J. **Introducción al Programa ANSYS**. <http://www.construccion.uniovi.es>
- [46] Monaevi S. **Theory and Application with Ansys**. Prentice Hall. United States of America. 1999.
- [47] Martins R. et. al. **Alguns Comentários Sobre a Avaliação de Amassamentos em Dutos Baseada nos Níveis de Deformação Usando o Critério da Norma ASME B31.8**; COTEQ 151; 9º Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos. 2007.
- [48] Rosenfeld. M.J.. Porter. P.C.. Cox. J.A. **Strain Estimation Using Vetco Deformation Tool Data**. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Pipeline Conference; ASME; Vol.1. p. 389-397; Calgary. Alberta. Canada. 1998.
- [49] Tuppiasú J. e Megglioaro M. **Software VIDA 2002**. PUC-Rio.
- [50] Shigley E. & Mischke C. **Mechanical Engineering Design**. Mc. Graw Hill. United States of America. 6º edição. 2001.

## Apêndices

### A

#### Terminologia

Não existe um critério aceito universalmente para a classificação de mossas. A terminologia usada no presente trabalho foi baseada nos conceitos estabelecidos no Pipeline Defect Assessment Manual [5,6] e apresentada a seguir:

##### A.1

#### Mossa (“*dent*”)

É uma alteração de forma na seção transversal de um segmento de duto resultante da deformação plástica do material. Tal alteração é promovida por uma solicitação mecânica externa imprevista, oriunda de carregamento concentrado gradual ou do impacto de um corpo estranho. As mossas podem ser causadas por saliências de rocha na região onde o duto é apoiado, deslizamento de solo ou pelo choque provocado por alguma ferramenta de escavação, por exemplo.

As mossas podem ser classificadas segundo a sua geometria como: mossas simples, lisas e com vincos, e segundo a sua relação com o elemento indentador, em contidas e não contidas. A Figura A.1 resume as classes de mossas. Posteriormente, são detalhadas as características que definem cada categoria de mocha.

##### A.2

#### Mossa simples (“*Plain dent*”)

É uma alteração leve na curvatura da parede do segmento de duto, sem redução significativa da espessura e sem estar associada a uma junta soldada ou a quaisquer defeitos ou imperfeições.

### A.3

#### Mossa lisa (“Smooth dent”)

Mossa caracterizada por uma variação suave na curvatura de parede do segmento de duto, mas que está associada a outros defeitos ou discontinuidades tais como: sulcos, ranhuras, trincas e soldas.

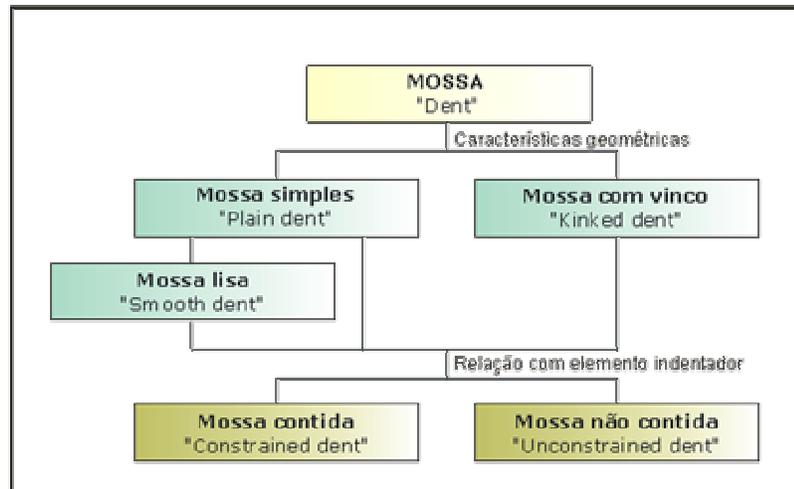


Figura A.1 - Tipos de mossa segundo as característica geométricas e segundo a sua relação com o elemento indentador.

### A.4

#### Mossa com vinco (“Kinked dent”)

Define-se como mudança abrupta na seção transversal de um segmento de duto que na região mais afiada possui um vinco com raio de curvatura menor ou igual a até cinco vezes a espessura de parede.

### A.5

#### Mossa não contida (“Unconstrained dent”)

Mossa na qual o indentador que a promoveu se afasta do segmento de duto afetado, permitindo que este recupere a fração elástica da profundidade máxima. A região recuperada encontra-se livre para se adequar a uma nova geometria por força da variação da pressão.

**A.6****Mossa contida (“Constrained dent”)**

Mossa que, por permanecer em contato contínuo com o indentador não se encontra livre para permitir um retorno elástico ou para se readaptar geometricamente por força da variação da pressão.

**A.7****Retorno elástico (“Spring Back / Rebounding”)**

É a redução que ocorre na profundidade da mocha, causada pelo efeito da recuperação elástica do segmento de duto decorrente do afastamento do indentador.

**A.8****Arredondamento (“Rerounding”)**

É a alteração apresentada na profundidade da mocha por efeito de variação na pressão interna do segmento de duto.

## B

### CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE MOSSAS

Mossas podem ser caracterizadas por duas vias: a primeira, através de ferramentas de inspeção em linha e a segunda, mediante inspeção manual. A inspeção manual pode ser efetuada quando o duto não for pigável ou quando sejam requeridas informações complementares para a caracterização do dano.

#### B.1

##### Caracterização geométrica de mossas através de ferramentas de inspeção em linha (ILI)

Existem diversos tipos de ferramentas em linha usadas em dutos, sendo os pigs geométrico, magnético e ultra-sônico os mais usados para a detecção de danos por deformação.

Olson M [16] apresentou um estudo, desenvolvido entre o 2002 e 2003, do uso de ferramentas de inspeção em linha - ILI em dutos com mossas. O estudo foi efetuado em treze linhas de transporte de hidrocarbonetos com diversos diâmetros. Os resultados da inspeção com as ferramentas foram validados com escavações, tendo por resultado que 83% dos danos verificados correspondiam a mossas associadas a perdas de espessura e 12% a mossas lisas. De tais defeitos um 5% não foram detectados na inspeção com ILI. Maiores detalhes dos tipos de pigs usados para a detecção de mossas são apresentados a seguir:

a) *PIG geométrico*: estas ferramentas são eficientes para o dimensionamento de desvios de forma suaves, tais como mossas simples.

A ferramenta apresenta a sua eficiência comprometida quando a mocha estiver associada à perda de espessura, seja por corrosão ou por dano mecânico, quando a mocha estiver associada a um vinco, e quando a profundidade da mocha for menor que o limite de detecção. No caso de mossas com vincos recomenda-se incrementar em 0,5mm a profundidade do vinco fornecida pela ferramenta [5].

O pig geométrico fornece parâmetros geométricos, tais como: diâmetro interno do duto, localização e dimensionamento de mossas, assim como a medição da curvatura e da posição da linha com respeito a um ponto de referência. Um registro típico de uma moossa detectada com um pig geométrico é apresentado nas figuras B.1 e B.2.

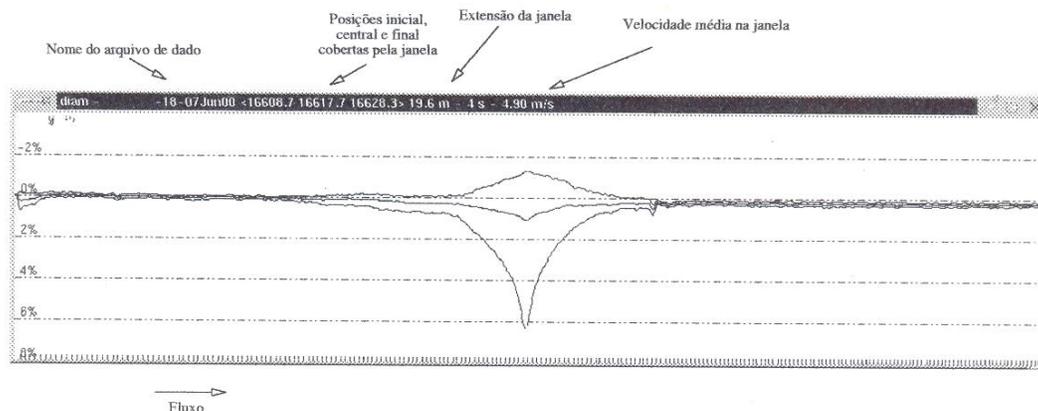


Figura B.1 - Registro típico de uma moossa detectada com pig geométrico.

A Figura B.1 apresenta três perfis de variação de profundidade ao longo da extensão do segmento avaliado, o perfil superior corresponde ao diâmetro máximo da seção transversal, o segundo ao diâmetro médio e o inferior o diâmetro mínimo. A escala vertical é dada em porcentagem (%) do diâmetro nominal, e trata-se de uma escala relativa, isto é que o zero não corresponde ao diâmetro interno nominal. A escala horizontal mostra o deslocamento do pig. Os traços verticais no extremo inferior correspondem a pulsos do hodômetro (a distância ente as linhas é de aproximadamente 0.082m).

A Figura B.2 indica-se a variação do perfil da profundidade na direção circunferencial numa seção transversal do duto. É apresentado o perfil do diâmetro externo e do diâmetro original em linha tracejada, ambos os dois, em função da posição horária. A posição 12:00h localiza-se no extremo superior, 3:00h na parte direita na parte superior, e assim conseqüentemente.

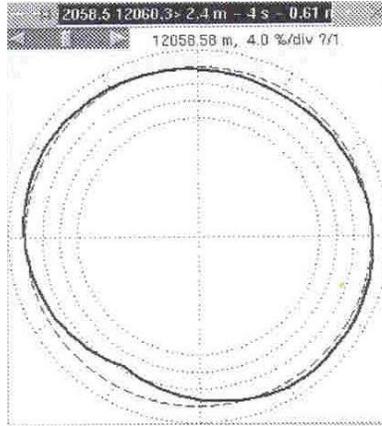


Figura B.2 - Seção reta no segmento analisado contendo deformação localizada

*b) PIG ultra-sônico:* esta ferramenta também pode ser usada para a detecção e dimensionamento de mostras, com vantagem na melhor detecção de outros defeitos associados à deformação, tais como corrosão ou redução mecânica de espessura.

Na Figura B.3a) é apresentado o registro de uma mostra detectada por um pig ultra-sônico. Nesta figura são mostradas três janelas. Nas duas primeiras janelas tem-se uma grade de cores do azul, passando pelo rosa, ao vermelho segundo à variação das características que representam. A primeira corresponde à variação de espessura, a segunda à variação de diâmetro. Já a terceira é um perfil do diâmetro ao longo da extensão do duto. Cada pixel nas janelas 1 e 2 corresponde a um sinal do sensor de ultra-som. A região escura com uma caixa amarela corresponde à localização de uma mostra. Na parte inferior da figura indicam-se informações sobre: localização do defeito detectado e suas dimensões. De tais informações tem-se que a mostra detectada encontra-se no segmento de duto disposto entre 1291,54m e 1291,72m da extremidade de saída do pig e a região deformada se distribui no registro angular entre 0h22 e 2h38. A análise do registro digital na janela três não permite conhecer flecha externa ou profundidade da mostra [17].

Uma desvantagem de este método é a limpeza exaustiva requerida na linha de transporte a ser inspecionada. As bolsas de ar retidas dificultam o registro de defeitos, tal como se registra na Figura B.3b) [17].

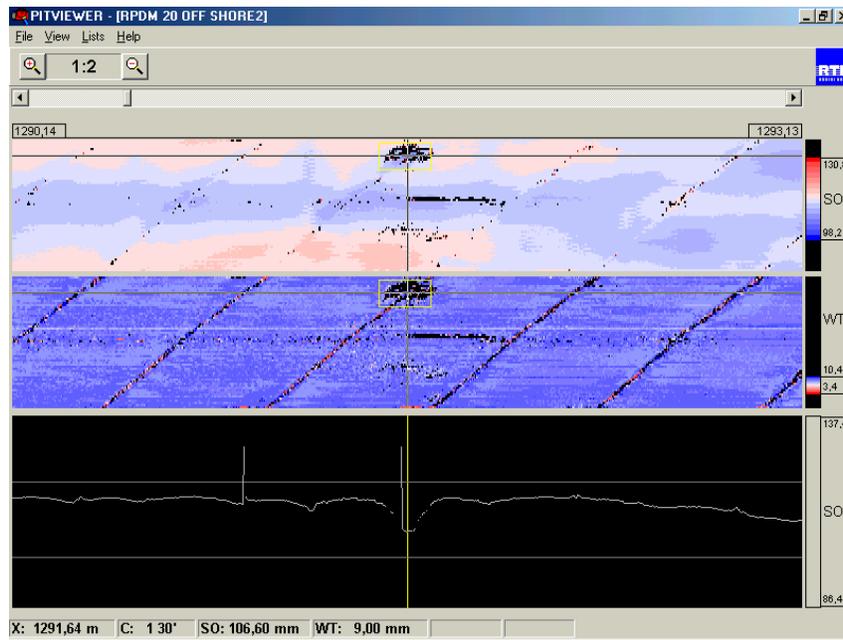


Figura B.3a) – Registro de uma moossa detectada em inspeção por pig ultra-sônico [17]

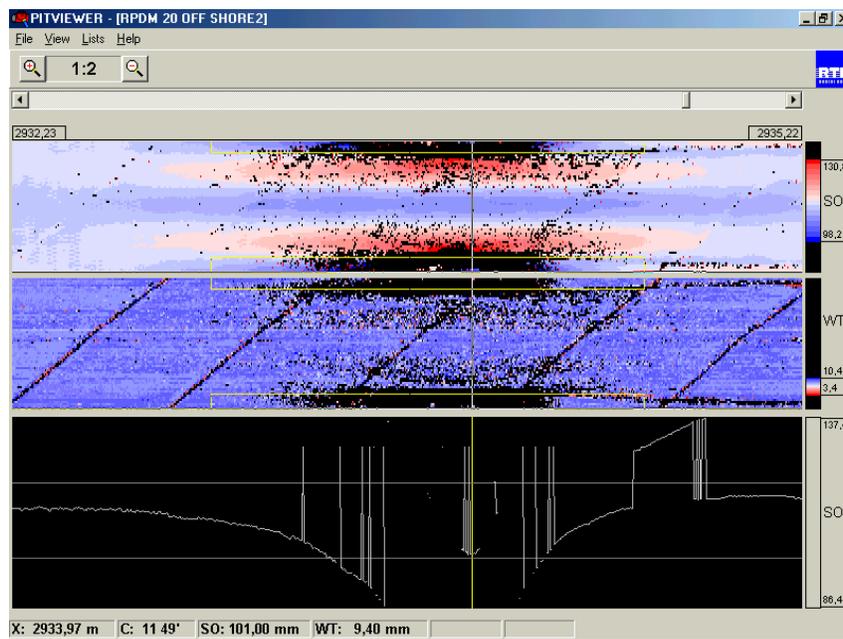


Figura B.3b) - Incertezas no registro de uma moossa, promovidas por bolsas de ar no interior do duto analisado.

c) *PIG magnético*: estes pigs também podem ser usados para a inspeção de mossas, baseiam-se na detecção de deformação e de encruamento associado a tais danos. Mossas simples com profundidades leves e com pouca deformação associada apresentam maior dificuldade na detecção por esta ferramenta.

## B.2

### Caracterização manual de mossas

Quando as características do duto impedem que este seja inspecionado mediante ferramentas em linha ou se necessárias informações complementares, a inspeção manual deveria ser executada. Para o desenvolvimento desta inspeção, e para prever a não ocorrência de uma ruptura durante as atividades, sugere-se a redução na pressão de operação a níveis menores do que o maior dos seguintes valores:

- a) 5% da pressão de operação no momento do acidente ou;
- b) 85% da pressão máxima do tempo do incidente.

Em certas circunstâncias, particularmente quando o dano é muito severo ou se existe probabilidade de falha por ruptura, medidas adicionais devem ser consideradas na redução da pressão, levando-as ao menor valor do a), b) e do nível correspondente a 30% do  $S_y$  [5].

A caracterização manual da mossa é efetuada mediante uma galga de profundidade, o esquema de um dispositivo usado tipicamente na indústria é apresentado na Figura B.4. O instrumento de medição deveria estar normal à superfície do duto quando a medição for adquirida [5].

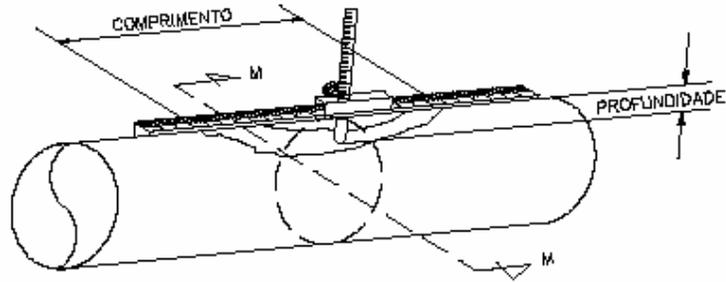


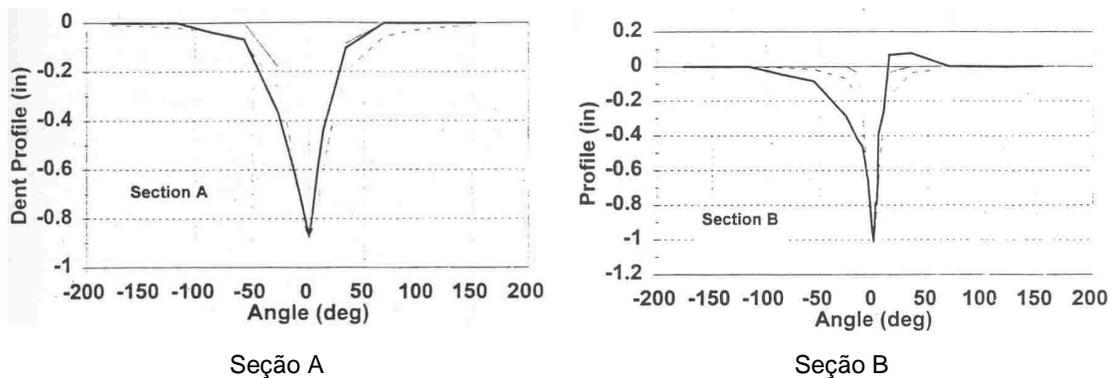
Figura B.4 - Ferramenta para caracterização manual de mossa

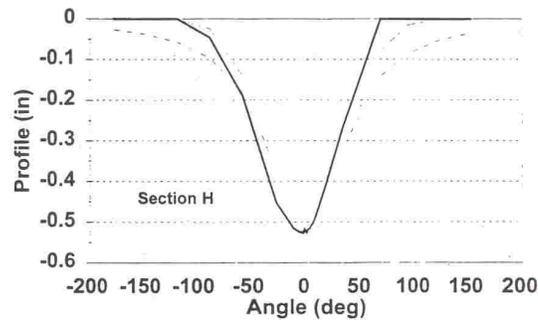
A caracterização dimensional tem como finalidade a localização da indentação e a quantificação da profundidade máxima, da largura e da ovalização associada à área afetada. A determinação da profundidade máxima é efetuada mediante uma malha de pontos de medição cobrindo a região deformada. Verificam-se, também, evidências de perda de espessura, de vincos, trincas ou soldas, associados à deformação.

### B.3

#### Perfis de mossa e sua relação com o elemento indentador

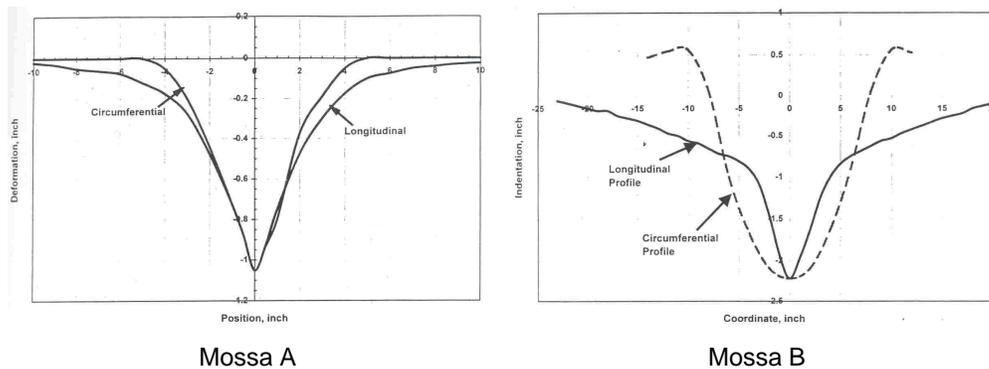
A seguir são apresentados diversos perfis de mossa criadas em dutos com diferentes propriedades geométricas e do material. Nas Figuras B.5 e B.6 são registradas mossa promovidas por: ferramentas de escavação, rochas e cargas explosivas.





Seção H

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



Mossa A

Mossa B

Figura B.6 - Perfil de moças 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".

A Figura B.5 apresenta três seções transversais, A, B e H, de uma moça criada por impacto com ferramenta de escavação, num duto com 16" de diâmetro externo e espessura 0.344in, material API 5L X60. Todas as seções apresentam variação abrupta do perfil de profundidade e, nas seções A e B é claramente observada a presença de um vinco na região mais profunda do defeito.

A Figura B.6 apresenta os perfis longitudinal e transversal máximo de duas moças, causadas por rochas, em dutos diferentes. A moça A apresenta mudança abrupta de geometria tanto na direção circunferencial como na longitudinal. A moça B apresenta um perfil longitudinal bastante acentuado com perfil circunferencial. Nos dois casos a variação de profundidade é mais suave, porém,

menos severo do que em mossas causadas por ferramentas de escavação já apresentadas na Figura B.5.

Na Figura B.7 são apresentados perfis transversais de mossas causadas por rochas, mas que não conduziram a vazamentos. Estas mossas apresentam perfis mais suaves do que as mossas já mostradas na Figura B.6. Os perfis apresentam salientes e entrantes de acordo com a morfologia da rocha.

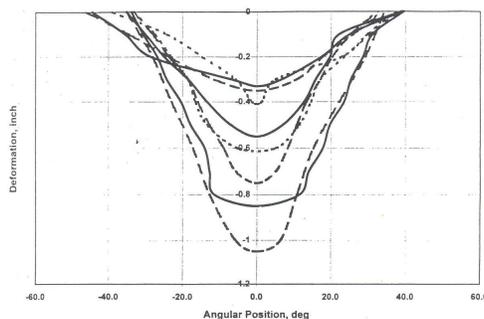


Figura B.7 - Perfil de mossas causadas por rochas sem manifestação de vazamento, duto de diâmetro externo 16", espessura 0.675", material API 5L X52

Para finalizar, a Figura B.8 corresponde a uma mocha causada por uma carga explosiva, neste caso a geometria é diferente, a extensão da mocha é maior do que as anteriores e os perfis são mais suaves, porém, este tipo de mossas estão associadas a uma deformação plástica alta, consequência da onda explosiva, o que confere uma maior severidade e maior probabilidade de falha.

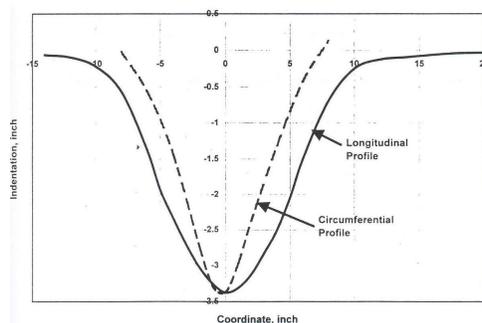


Figura B.8 - Perfil de mossas causadas por carga explosiva, duto de diâmetro externo de 26", espessura 0.406", material API 5L X60

## C

## CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO MONOTÔNICA E CÍCLICA

A curva monotônica do material, obtida de um teste de tração, possui uma região elástica e uma região plástica. Na região elástica, ( $S < SMYS$ ), as tensões e deformações elásticas relacionam-se pela lei de Hooke. Quando as tensões superarem o limite de escoamento, o material começa a evidenciar comportamento elasto-plástico que pode ser reproduzido mediante o modelo de Ramberg-Osgood, ver equação (C.1).

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{H} \right)^{\frac{1}{h}} \quad \text{eq. (C.1)}$$

O modelo Ramberg-Osgood considera a componente elástica da curva tensão-deformação como uma reta e a plástica como uma parábola. As constantes  $H$  e  $h$  da região plástica são calculadas mediante interpolação linear dos logaritmos da deformação real plástica e tensão real plástica. A constante  $H$  corresponde ao maior valor de deformação plástica que um material poderia suportar e  $h$  é interpretado como o coeficiente de encruamento do material. A Figura C.1 ilustra o modelo de Ramberg-Osgood.

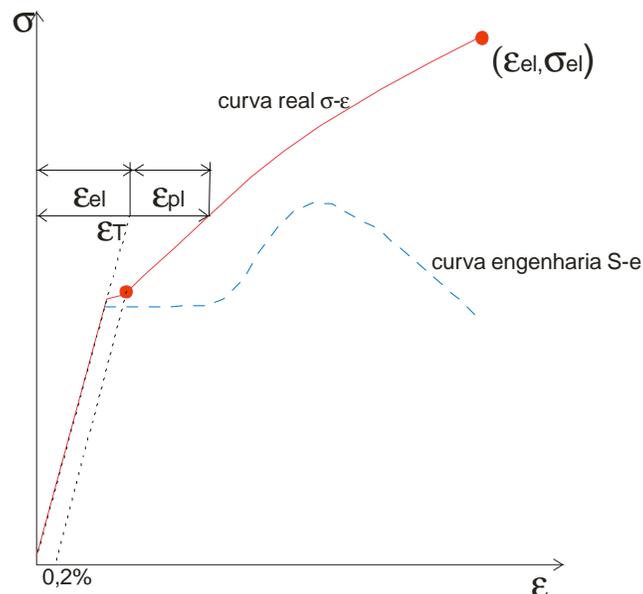


Figura C.1 – Curva tensão-deformação monotônica de um material

Já na condição de carregamento cíclico as tensões e deformações também seguem a equação (C.1) sendo  $h$  e  $H$  substituídas por  $h_c$  e  $H_c$ , parâmetros característicos do comportamento cíclico do material. O ajuste das constantes permite considerar a possibilidade de amolecimento, endurecimento ou de comportamento combinado nos primeiros ciclos. A Figura (C.2) ilustra a curva tensão-deformação cíclica de um material que experimenta encruamento nos primeiros ciclos.

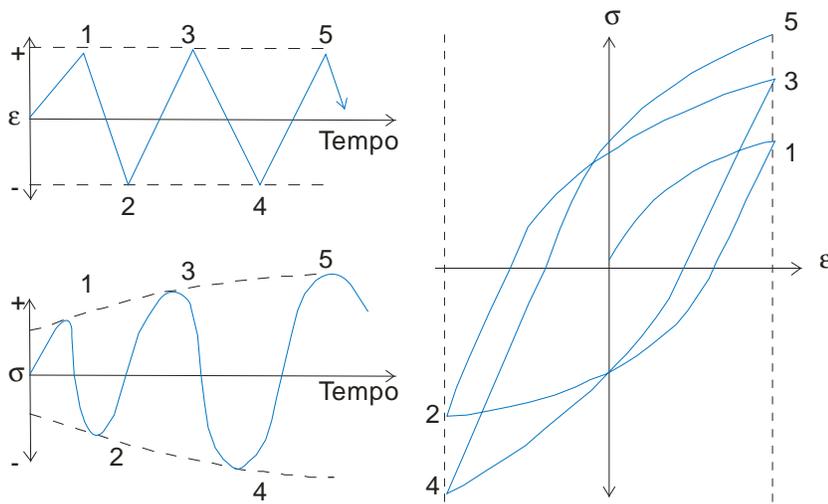


Figura C.2 – Curva monotônica e cíclica transiente de endurecimento

Os laços de histerese descrevem a resposta tensão-deformação de um material submetido a carregamento e descarregamento sucessivos e representam a soma dos comportamentos elástico e o plástico, Ver Figura C.3.

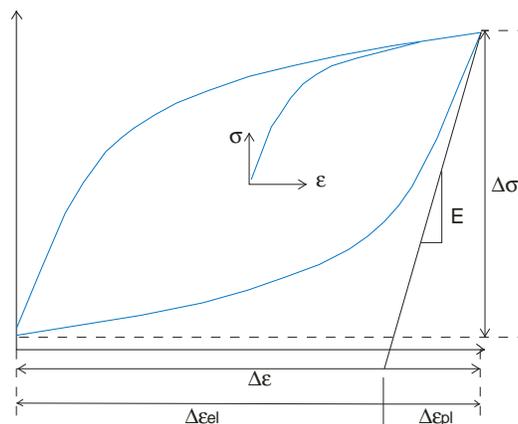


Figura C.3 – Laços de histerese no material estabilizado

O comportamento estável dos laços de histerese, apresentados na Figura C.3, também pode ser modelado pela equação de Ramberg-Osgood, usando amplitudes de tensão e de deformação, mas, sem a consideração de transientes de amolecimento ou endurecimento cíclico. Já que estes ciclos são poucos quando comparados com os ciclos estáveis, o uso generalizado da equação é apropriado, ver equação (C.2)

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \Delta\varepsilon_{el} + \Delta\varepsilon_{pl} = \frac{\Delta\sigma}{2.E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{2.H_c} \right)^{\frac{1}{n_c}} \quad \text{eq. (C.2)}$$

**D****RESULTADOS COMPLEMENTARES DE CRIAÇÃO DE MOSSAS**

Os testes experimentais usados no presente trabalho são parte dos estudos de “Análise de Reparo Metálico Colado em Dutos com Mossas” [41], [42]. Nesses estudos foram executados testes de criação de mossas transversais e longitudinais com profundidade máxima de 15%, e de mossas transversais com profundidade máxima de 25%. Os resultados para a moossa transversal com profundidade máxima de 15% já foram apresentados e analisados no Capítulo 3 do presente trabalho. Neste Apêndice são resumidos os resultados para as outras geometrias de mossas avaliadas. Também, são apresentados os resultados da análise numérica implementada para a moossa transversal com 25% de profundidade máxima.

**D.1****Resultados Complementares dos Testes de Criação de Mossas**

A Tabela D.1 resume os testes de criação desenvolvidos por [41], [42]. Os testes TA apresentados na cor cinza já foram apresentados no Capítulo 3. Os espécimes TB e TC seguem as mesmas características dos testes TA, registradas nas Tabelas 3.1 a 3.3.

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

<b>Descrição</b>	<b>Testes A</b>		<b>Testes B</b>		<b>Testes C</b>		
Orientação do punção	Transversal		Longitudinal		Transversal		
$d_{\max}/D$ (%)	15		15		25		
D/t	38		38		38		
Comprimento do duto (mm)	600		600		600		
Número de testes	3		2		3		
Identificação	<b>TA1</b>	<b>TA2</b>	<b>TB1</b>	<b>TB2</b>	<b>TC1</b>	<b>TC2</b>	<b>TC3</b>

Na execução dos testes TB foram observados vincos nas extremidades da região deformada, tal como observado na Figura D.1 onde as setas destacam a posição dos vincos. Os vincos devem-se ao assentamento das bordas do indentador cilíndrico sobre o espécime. Segundo as definições apresentadas no Apêndice A, esta moossa poderia ser tratada como uma moossa com vinco. Uma moossa com vinco é mais severa do que uma moossa simples.



Figura D.1 – Mossas longitudinais com vincos nos seus extremos.

As curvas força-deslocamento obtidas para os testes TB e TC são apresentadas nas Figuras D.2 e D.3.

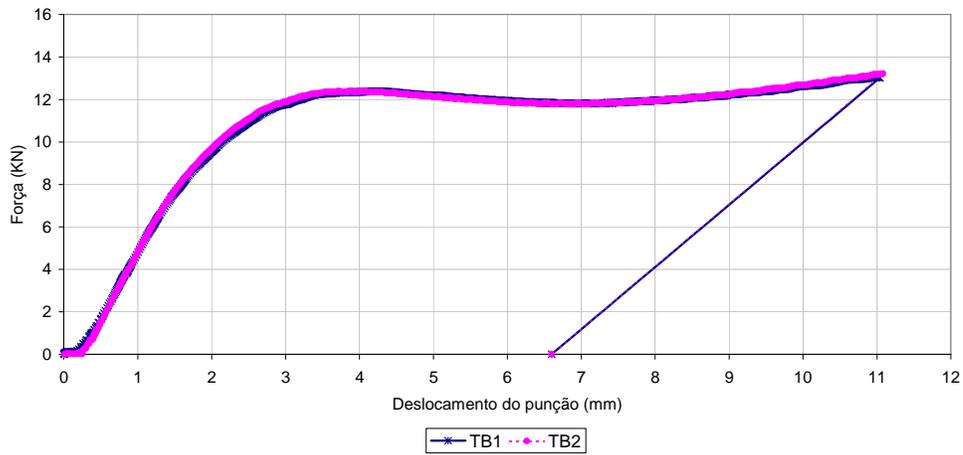


Figura D.2 - Curva “força-deslocamento”, moosa longitudinal com 15% de profundidade máxima

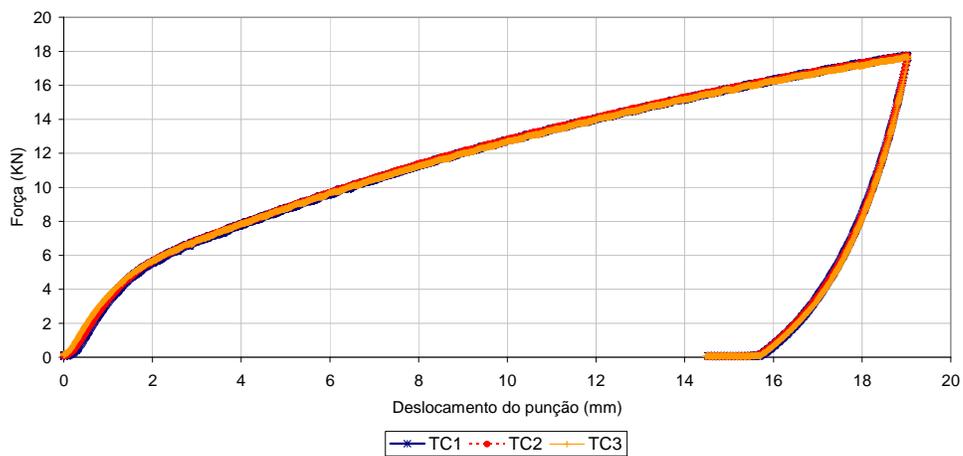


Figura D.3 - Curva “força-deslocamento”, moosa transversal com 25% de profundidade máxima

Na Figura D.2 é observado a partir de 4mm uma queda na força de reação com o incremento do deslocamento. Tal redução deve-se à instabilidade produzida durante o contato ou às variações nas direções principais.

A Tabela D.2 resume os resultados da fase de criação das mossas com seus respectivos valores médios, incluindo os já apresentados nos Capítulo 3.

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

Descrição	$d_{\max}$ (mm)	$d_{\max}/D$ (%)	$d_r$ (mm)	$d_r/D$ (%)	$Dd$ (mm)	Recuperação <sup>(1)</sup> (%)
TA1	11,26	14,82	6,60	8,68	4,66	6,10
TA2	11,40	15,00	6,60	8,68	4,80	5,80
Média TA	11,33	14,91	6,60	8,68	4,73	5,90
TB1	11,08	14,58	6,31	8,30	4,77	6,27
TB2	11,04	14,53	6,35	8,36	4,69	6,17
Média TB	11,06	14,56	6,32	8,33	4,73	6,22
TC1	19,03	25,04	14,80	19,47	4,23	5,56
TC2	19,03	25,03	14,72	19,37	4,31	5,66
TC3	19,04	25,05	14,50	19,08	4,54	5,97
Média TC	19,04	25,04	14,67	19,31	4,36	5,73

Nota:  
(1) % Recuperação =  $(d_{\max} - d_r) / D$

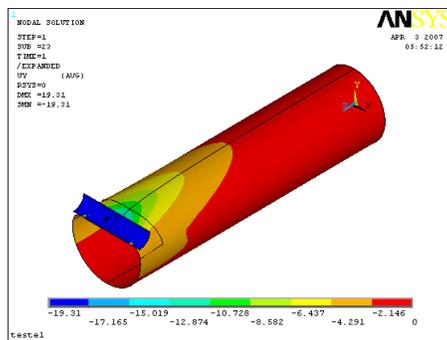
A Tabela D.2 permite comparar as percentagens de recuperação dos testes entre sim. Os testes TA e TC para mossas transversais com profundidades de 15% e 25%, respectivamente, apresentam valores de recuperação muito próximos. Este comportamento era esperado já que a recuperação é um processo elástico que dependeria, teoricamente, das propriedades do material. Os testes TB, para a mossa longitudinal com 15% de profundidade, apresentam valores de recuperação levemente maiores do que os testes TA com a mesma profundidade.

## D.2

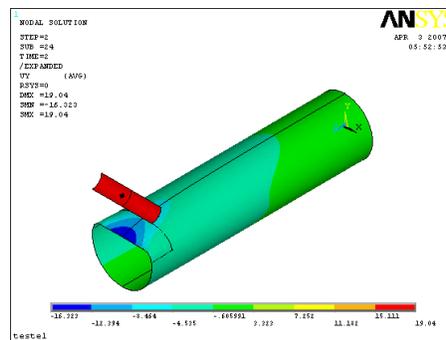
### Resultados Complementares da Análise Numérica

A avaliação numérica, da moosa transversal com 25% de profundidade, foi efetuada considerando os aspectos e o procedimento já detalhados no Item 3.2. Os resultados obtidos dessa avaliação são apresentados como Modelo 2. O Modelo 1 corresponde à moosa transversal com 15% de profundidade máxima.

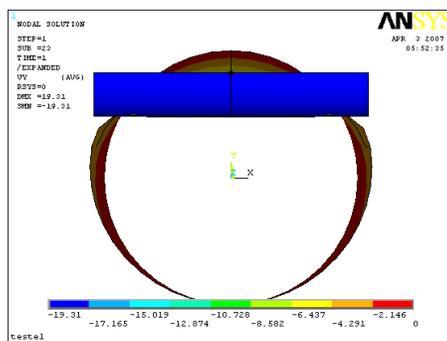
Na Figura D.4 é apresentada a distribuição de profundidade na região indentada do Modelo 2. Nessa figura observa-se ovalização significativa associada ao processo de indentação. A extensão da região afetada pela moosa é maior no Modelo 2 do que no Modelo 1 (Figura 3.11).



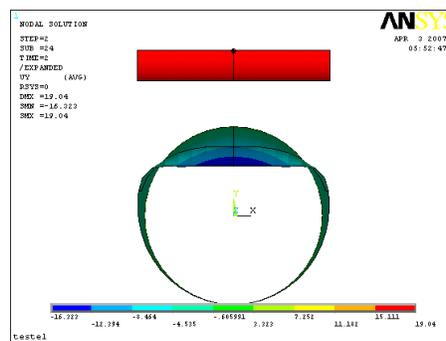
A – Indentação / Vista geral



B – Recuperação elástica / Vista geral



C – Indentação / Vista transversal



D – Recuperação elástica / Vista transversal

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

A Figura D.5 apresenta-se a variação do deslocamento na direção vertical (y) e transversal (x) do Modelo 2 durante o processo de indentação e de recuperação elástica. A ovalização associada ao dano é maior do que no Modelo 1, Figura 3.12. A geratriz inferior do duto não sofre o efeito do dano. A Figura D.6 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e numérico da mossa com 25% de profundidade máxima.

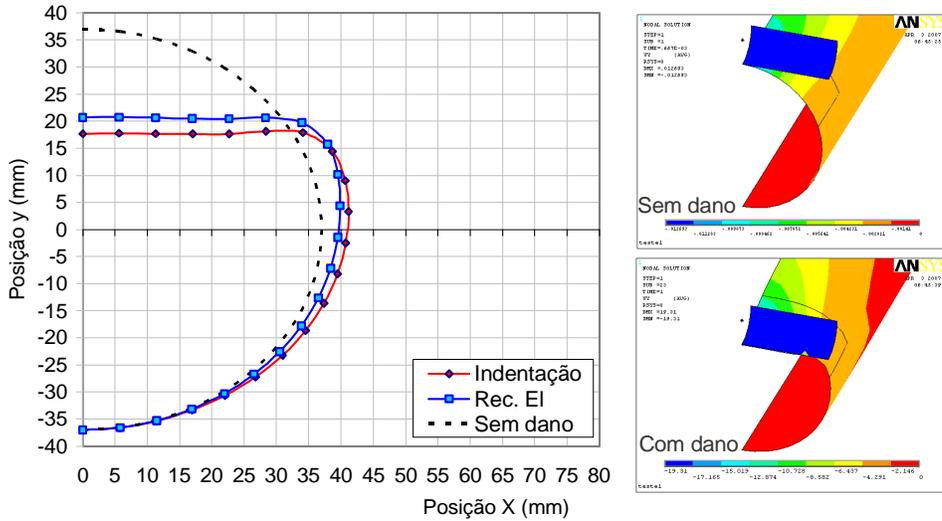


Figura D.5 - Deslocamento vertical (y) e transversal (x) do Modelo 2

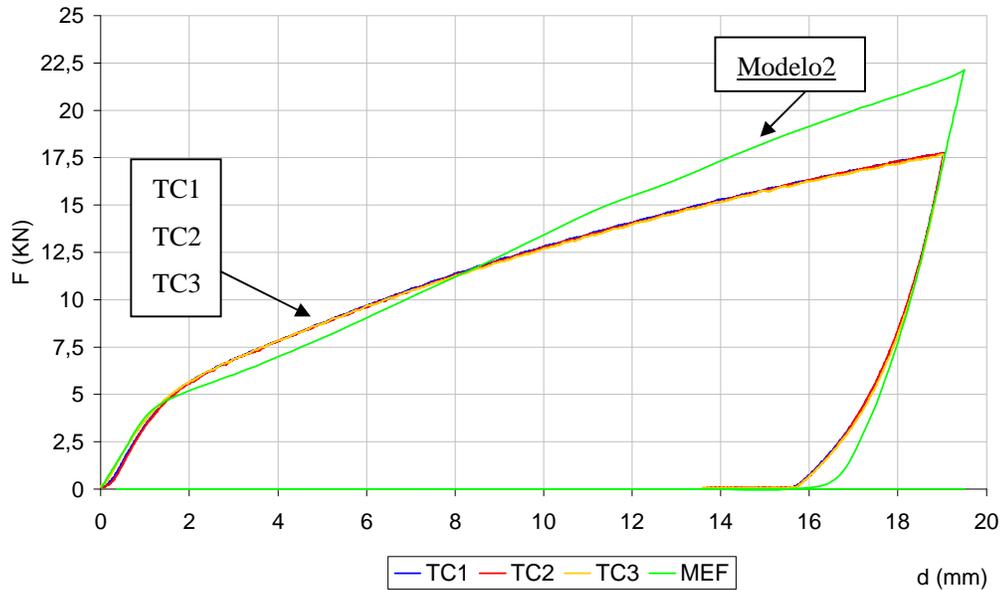


Figura D.6 - Variação da força de indentação com o deslocamento do indentador, Modelo 2 e testes TC1, TC2 e TC3

Si comparada a Figura D.6 com a Figura 3.13, observa-se um comportamento similar dos modelos no carregamento, até a profundidade avaliada do Modelo 1. O que indica que a resposta de indentação não dependeria da profundidade da mocha e sim da geometria do dano. O Modelo 2 apresenta maior resistência à indentação na medida que o deslocamento do indentador aumenta, possivelmente, devido ao encruamento sofrido pelo material. A inclinação das curvas de descarregamento dos testes experimentais e do modelo numérico são similares, assim como as profundidades residuais após a recuperação elástica. A melhor aproximação no descarregamento deve-se a que foi possível monitorá-lo na execução dos testes experimentais.

A Tabela D.3 resume os resultados de indentação e de recuperação elástica dos testes experimentais e da análise numérica.

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

Descrição	$d_{max}$ (mm)	$d_{max}/D$ (%)	$d_r$ (mm)	$d_r/D$ (%)	Dd (mm)	Razão de Recuperação <sup>(1)</sup>
TA1	11,26	14,82	6,60	8,68	4,66	0,58
TA2	11,40	15,00	6,60	8,68	4,80	0,58
Modelo1	11,50	15,50	9,10	12,20	3,00	0,79
TC1	19,03	25,04	14,80	19,47	4,25	0,77
TC2	19,03	25,03	14,72	19,37	4,31	0,77
TC3	19,04	25,05	14,50	19,08	4,54	0,76
Modelo2	19,31	26,09	16,00	21,62	3,31	0,80

Nota:  
(1) % Recuperação =  $d_r/d_{max}$

O Modelo2 apresenta valores mais próximos dos testes com 25% de profundidade (TC), com diferenças não maiores do que 2%.

A dimensão da mocha criada numericamente, após a recuperação elástica são resumidas na Tabela D.4.

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

Modelo	Valores médios		
	Profundidade remanescente (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
2	16,33	29,1	29,1

## E

## Resultados Complementares de Avaliação de Ruptura Experimental

A Tabela E.1 apresenta as pressões de ruptura dos espécimes TB1, TB2, TC1, TC2 e TC3.

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

Corpo de prova	Direção da moosa	$d_{\max}$ (mm)	Pressão de ruptura (MPa)
Sem defeito	--	0	21,84
TB1	Longitudinal	11,08	21,97
TB2	Longitudinal	11,04	22,00
TC1	Transversal	19,028	22,69
TC2	Transversal	19,026	22,53
TC3	Transversal	19,04	22,48

A Figura E.1 apresenta as curvas pressão hidrostática sob o duto e volume injetado para todos os espécimes.

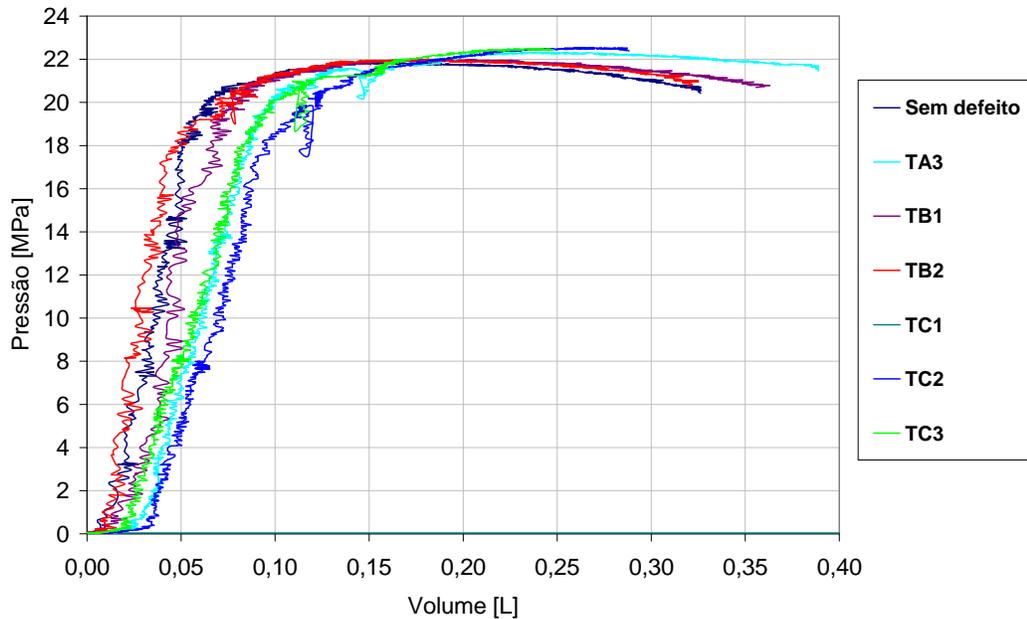


Figura E.1 - Volume de água Vs. Pressão hidrostática nos espécimes TB1, TB2, TC1, TC2, TC3 e sem defeito

## F HISTÓRICOS DE TENSÃO DAS HIPÓTESES 2 E 3 DE CARREGAMENTO

Este Apêndice apresenta os históricos “tensão-deformação” que complementam a análise de fadiga apresentada no Capítulo 5.

### F.1 Curvas Tensão-Deformação de Von Mises

O histórico de tensão-deformação obtido nos nós externos 5285 e 5269 e 5266 interno, para as hipóteses de carregamento 2 e 3 são apresentadas nas Figuras F.1 a F.6.

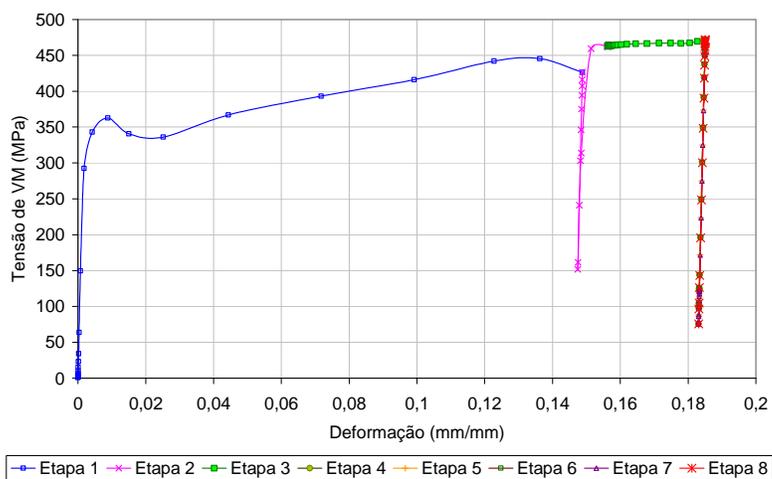


Figura F.1 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 2

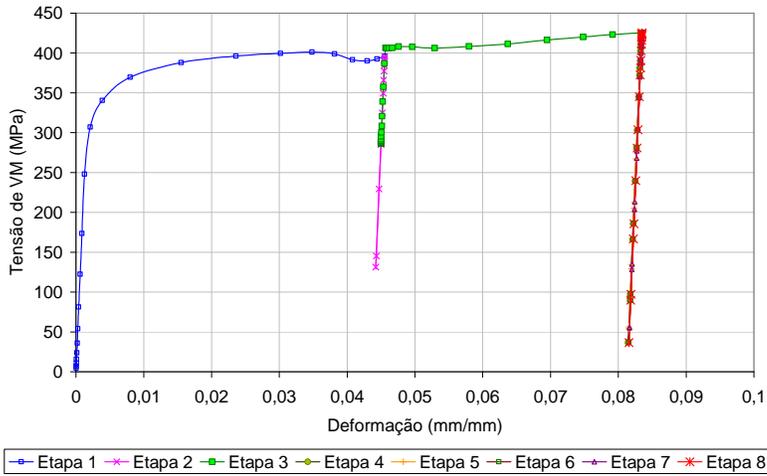


Figura F.2 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 2

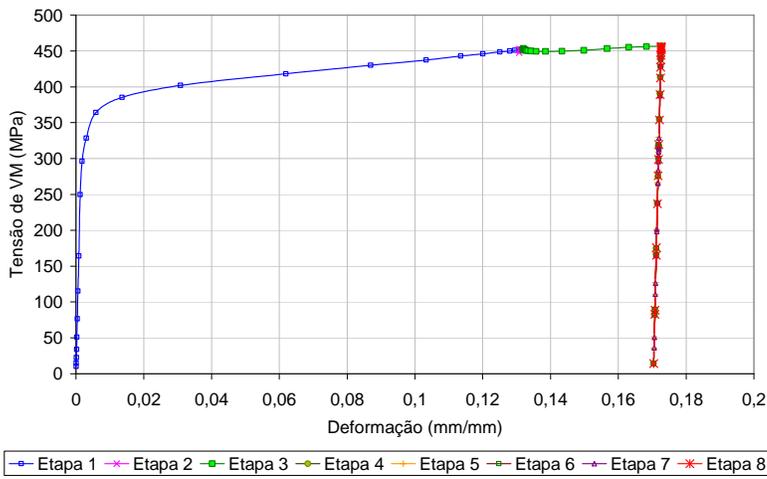


Figura F.3 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 2

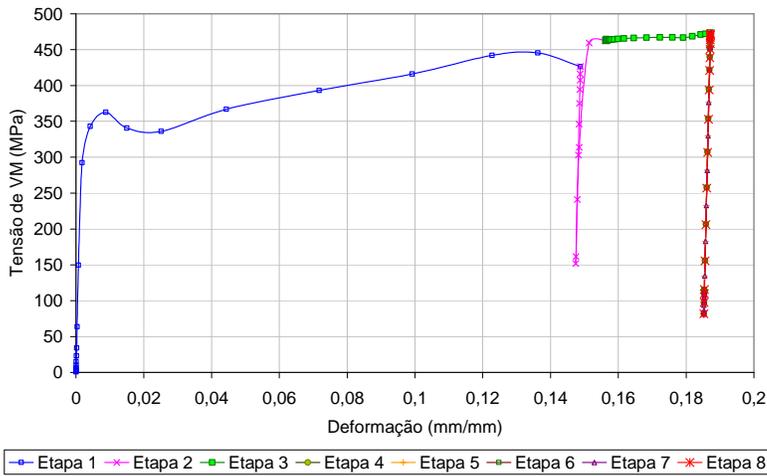


Figura F.4 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 3

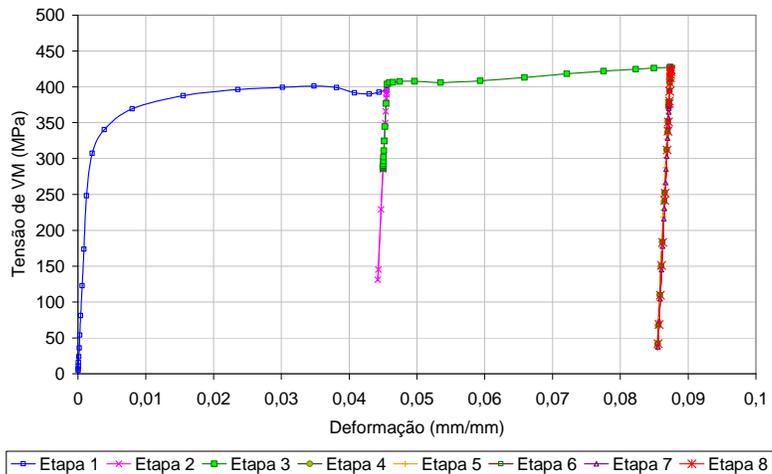


Figura F.5 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 3

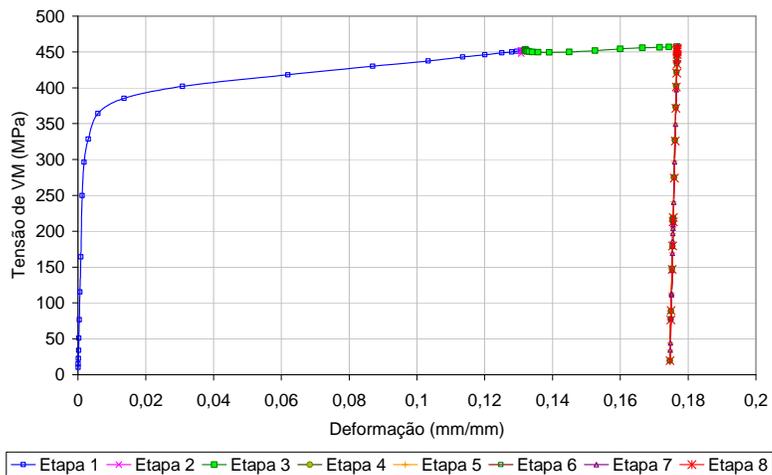


Figura F.6 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 3

## F.2

### Histórico das tensões de Von Mises, hipóteses 2 e 3

O histórico de tensão-deformação obtido nos nós externos 5285 e 5269 e 5266 interno, para as hipóteses de carregamento 2 e 3 são apresentadas nas Figuras F.7 a F.12. Destacam-se com quadro tracejado as regiões onde as tensões circunferencial e longitudinal são compressivas e por tanto, as de Von Mises também o seriam, se aplicado o critério proposto em [20].

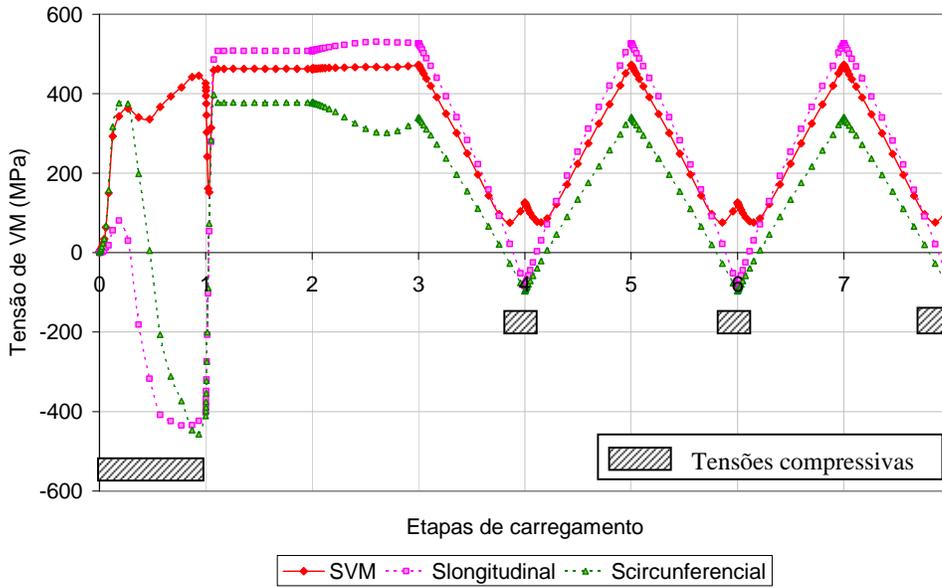


Figura F.7 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5285 externo, hipótese 2

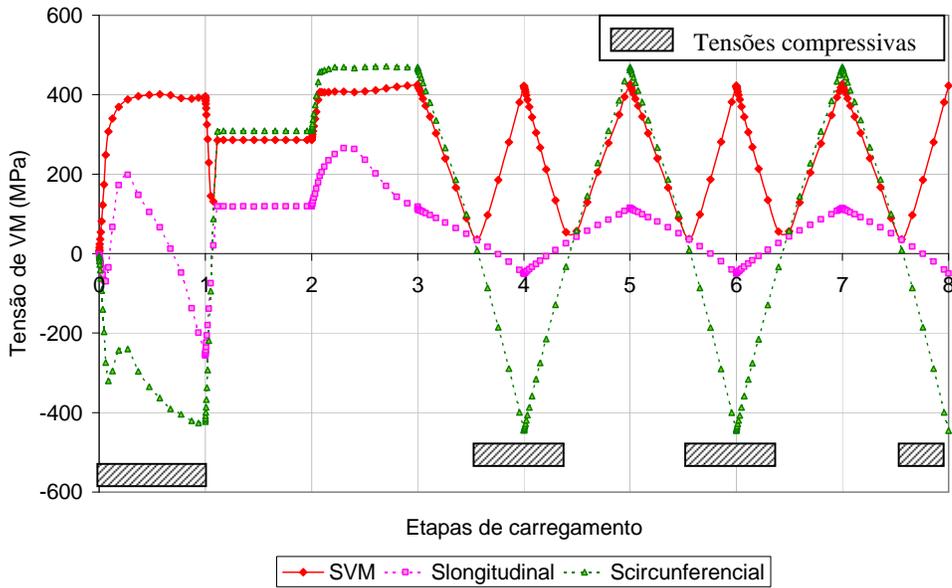


Figura F.8 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 2

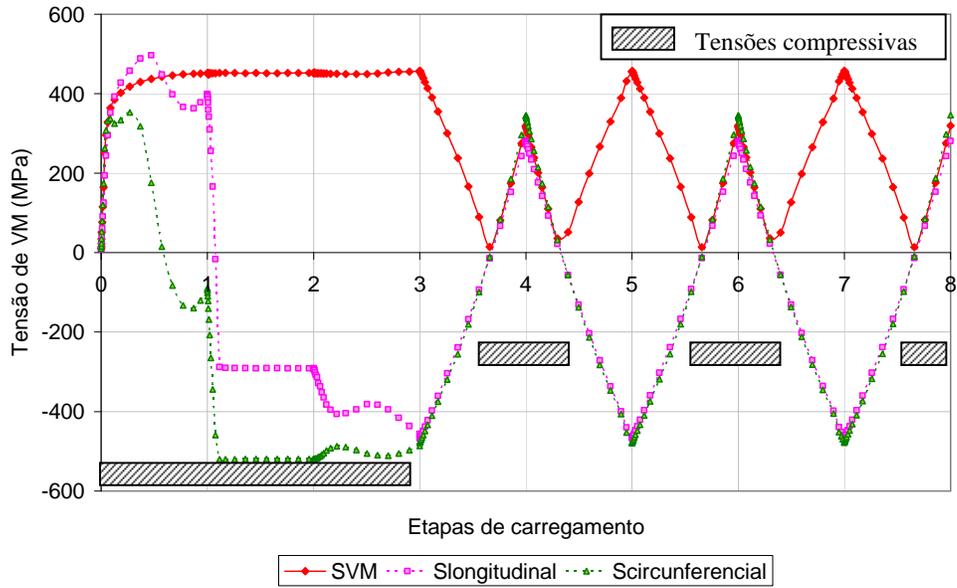


Figura F.9 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 2

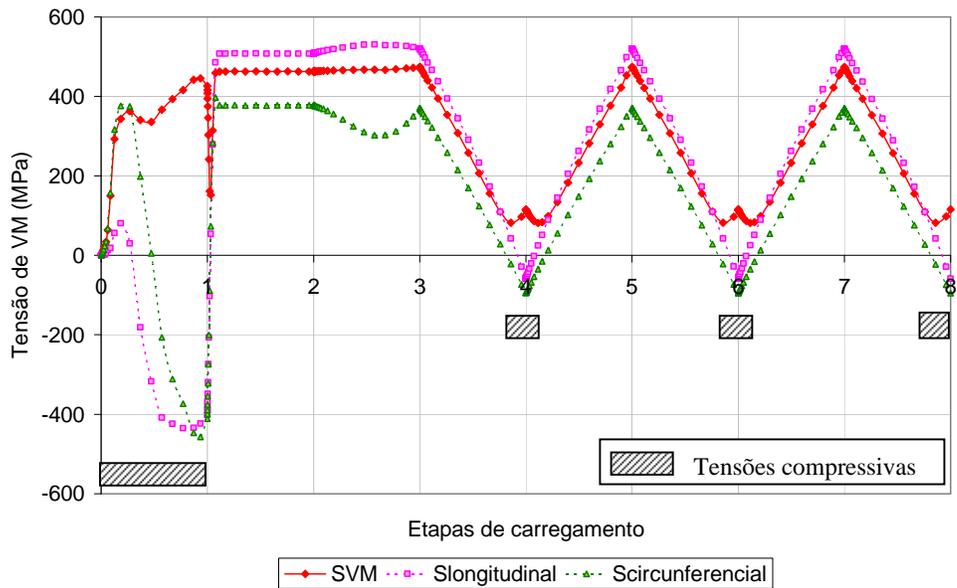


Figura F.10 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5285 externo, hipótese 3

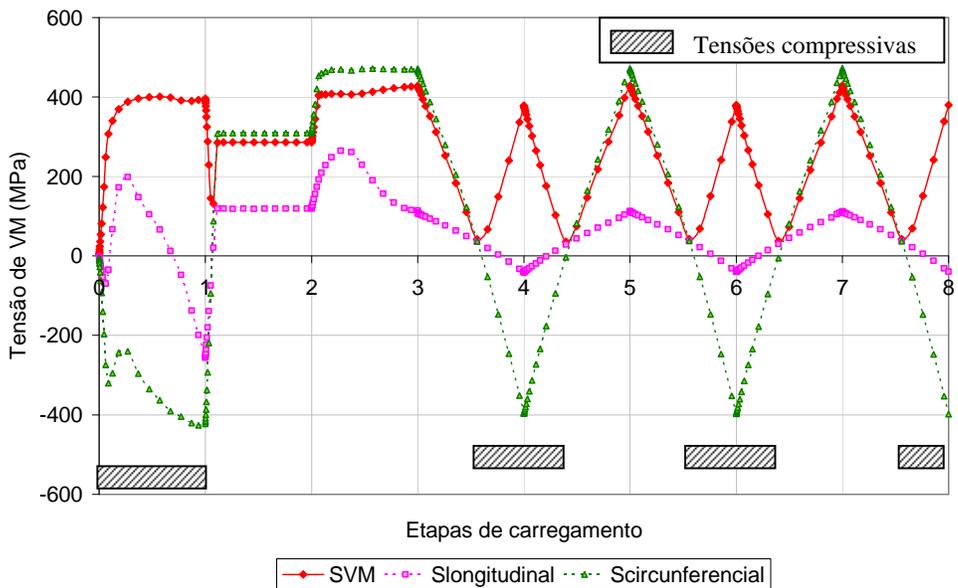


Figura F.11 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 3

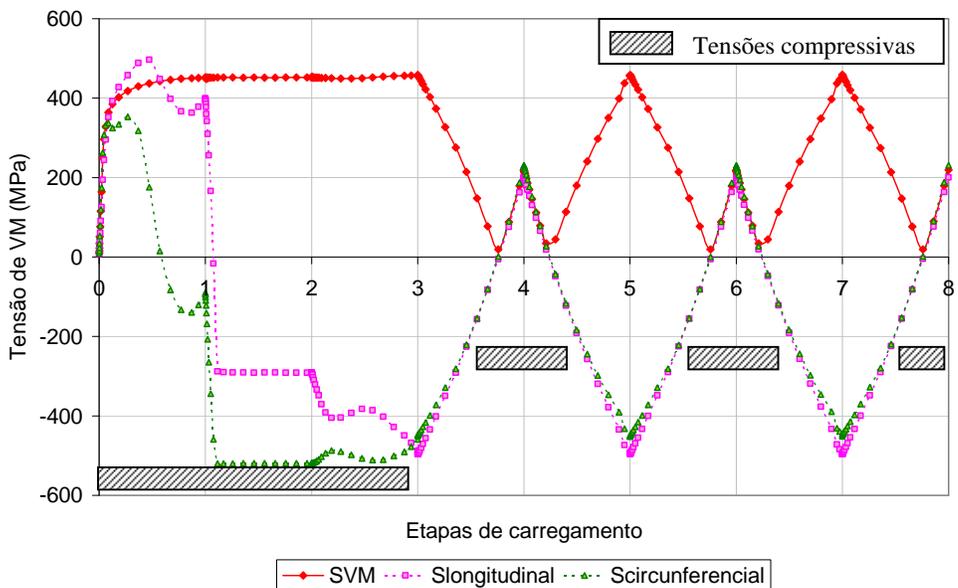


Figura F.12 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 3

### F.3

#### Tensões de Von Mises corrigidas, hipóteses 2 e 3

As Figuras F.13 a F.18 exibem as tensões de Von Mises e de Von Mises com o sinal corrigido, para os nós 5285 e 5269 na parede externa e 5266 na parede interna.

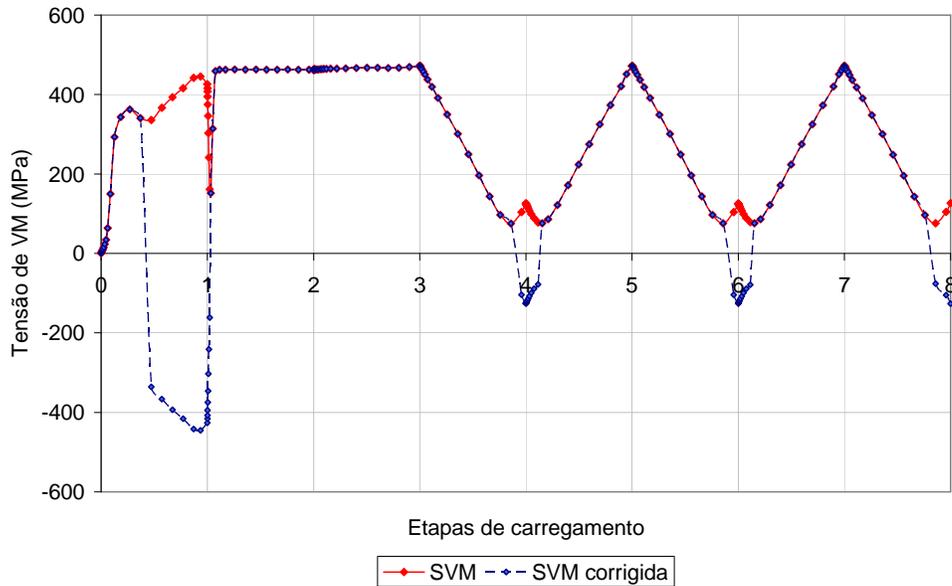


Figura F.13 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5285 interno, hipótese 2

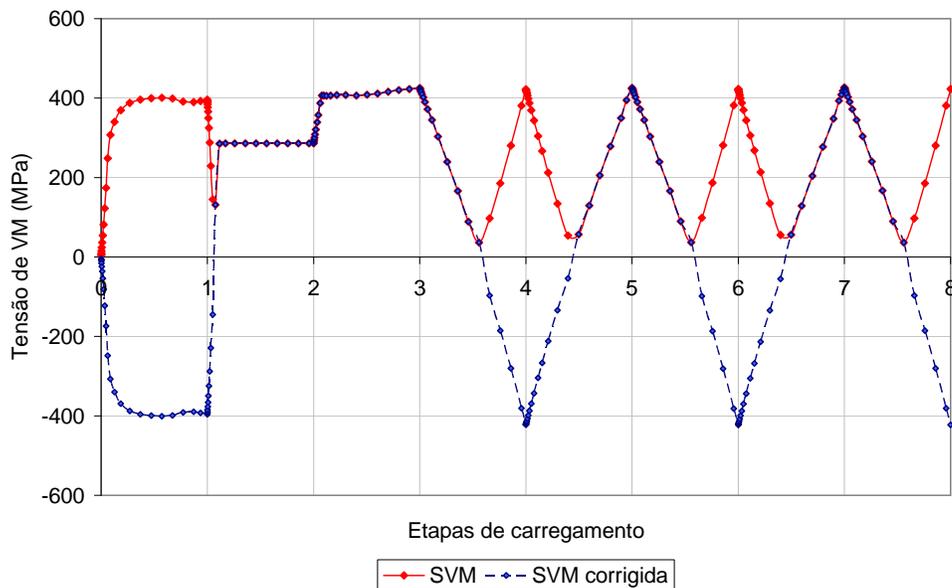


Figura F.14 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 interno, hipótese 2

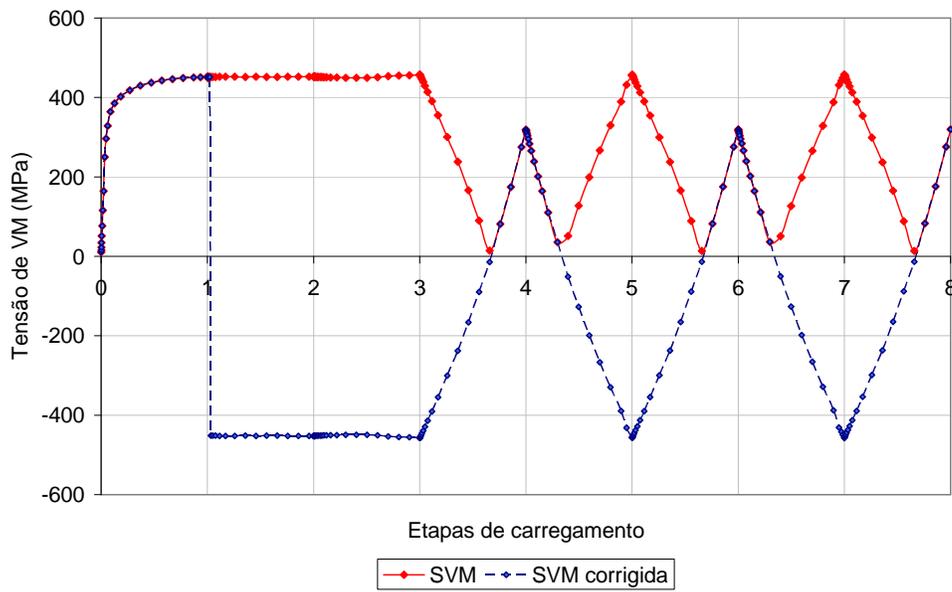


Figura F.15 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 2

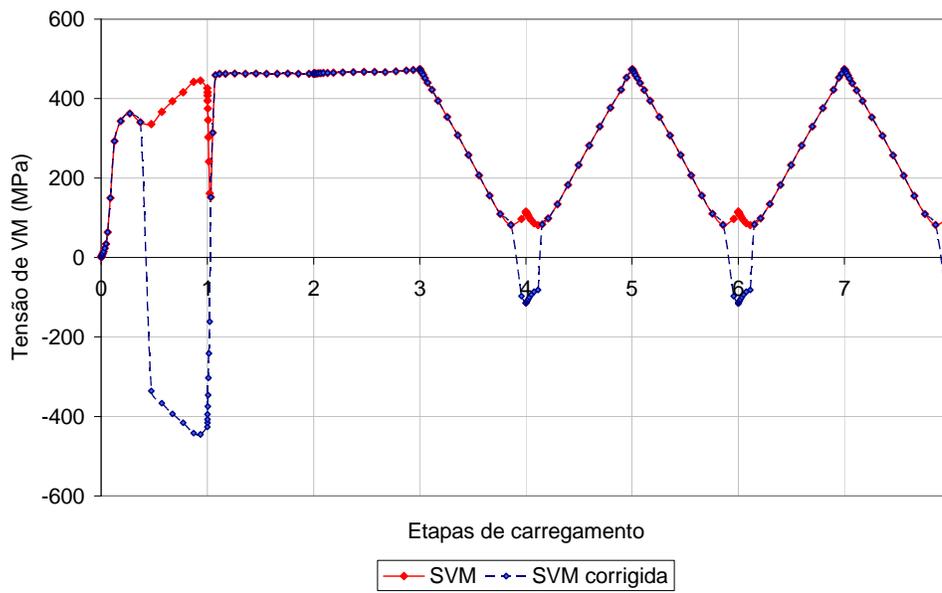


Figura F.16 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5285 externo, hipótese 3

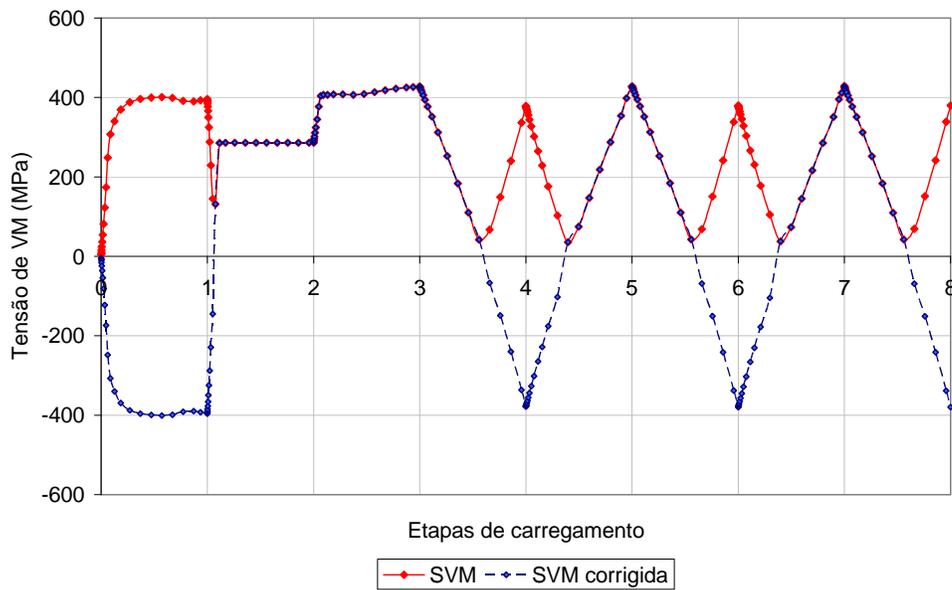


Figura F.17 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 externo, hipótese 3

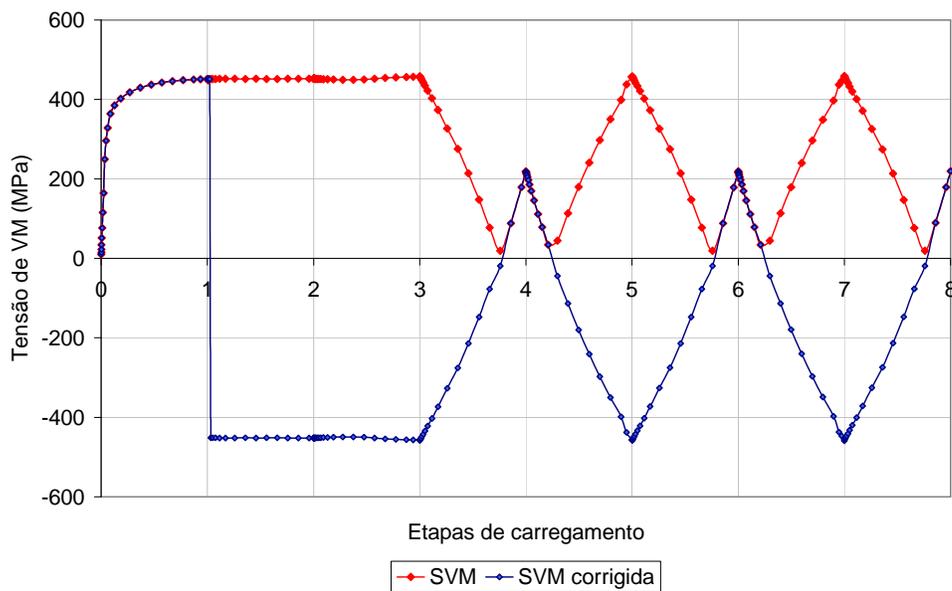


Figura F.18 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 3

**G****ANÁLISE DE FADIGA PELO MÉTODO SN, TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS**

Este Apêndice apresenta os resultados da avaliação de fadiga desenvolvida usando a mesma metodologia e parâmetros detalhados no Item 5.2, do Capítulo 5, e usando as tensões circunferenciais, obtidas da análise numérica, nos nós 5285 e 5269 externos, e 5266 interno. A Tabela G.1 resume os casos avaliados.

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

<b>Caso</b>	<b>S<sub>max</sub></b>	<b>S<sub>min</sub></b>	<b>S<sub>m</sub></b>	<b>S<sub>a</sub></b>	<b>n</b>
H1-5285-n1*	302,55	-65,54	118,50	184,04	120
H1-5285-n2*	302,55	-65,54	118,50	184,04	2000
H1-5269-n1*	471,84	-439,22	16,31	455,53	120
H1-5269-n2*	471,84	-439,22	16,31	455,53	2000
H1-5266-n1*	431,90	-509,28	-38,69	470,59	120
H1-5266-n2*	431,90	-509,28	-38,69	470,59	2000
H2-5285-n1*	340,39	-97,30	121,54	218,84	120
H2-5285-n2*	340,39	-97,30	121,54	218,84	2000
H2-5269-n1*	469,71	-445,21	12,25	457,46	120
H2-5269-n2*	469,71	-445,21	12,25	457,46	2000
H2-5266-n1*	346,38	-478,10	-65,86	412,24	120
H2-5266-n2*	346,38	-478,10	-65,86	412,24	2000
H3-5285-n1*	370,06	-95,17	137,45	232,61	120
H3-5285-n2*	370,06	-95,17	137,45	232,61	2000
H3-5269-n1*	471,77	-398,03	36,87	434,90	120
H3-5269-n2*	471,77	-398,03	36,87	434,90	2000
H3-5266-n1*	231,42	-398,03	-83,30	314,73	120
H3-5266-n2*	231,42	-398,03	-83,30	314,73	2000

Na Tabela G.2 são detalhados os resultados da avaliação pelo método SN considerando três possibilidades: sem efeito da tensão média, Goodman e Gerber.

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

Caso	Sem tensão média		Goodman <sup>(1), (2)</sup>			Gerber <sup>(1), (2)</sup>		
	Nf	D	Saeq	Nf	D	Saeq	Nf	D
H1-5285-n1*	4143	0,03	240,47	1935	0,06	194,77	3526	0,03
H1-5285-n2*	4143	0,48	240,47	1935	>1	194,77	3526	0,57
H1-5269-n1*	314	0,38	470,73	286	0,42	456,00	313	0,38
H1-5269-n2*	314	>1	470,73	286	>1	456,00	313	>1
H1-5266-n1*	286	0,42	470,59	286	0,42	470,59	286	0,42
H1-5266-n2*	286	>1	470,59	286	>1	470,59	286	>1
H2-5285-n1*	2530	0,05	288,21	1156	0,10	232,30	2135	0,06
H2-5285-n2*	2530	0,79	288,21	1156	>1	232,30	2135	0,94
H2-5269-n1*	310	0,39	468,84	289	0,41	457,73	310	0,39
H2-5269-n2*	310	>1	468,84	289	>1	457,73	310	>1
H2-5266-n1*	417	0,29	412,24	417	0,29	412,24	417	0,29
H2-5266-n2*	417	>1	412,24	417	>1	412,24	417	>1
H3-5285-n1*	2127	0,06	319,60	861	0,14	251,22	1709	0,07
H3-5285-n2*	2127	0,94	319,60	861	>1	251,22	1709	>1
H3-5269-n1*	358	0,33	469,16	289	0,42	437,23	353	0,34
H3-5269-n2*	358	>1	469,16	289	>1	437,23	353	>1
H3-5266-n1*	900	0,13	314,73	900	0,13	314,73	900	0,13
H3-5266-n2*	900	>1	314,73	900	>1	314,73	900	>1

D – Dano acumulado;  
Nf – Número de ciclos para falha

(1) - O valor de Su usado no cálculo das tensões alternadas equivalente é o valor real igual a 505MPa

(2) – Para casos com tensão média negativa o efeito da tensão média não é considerado.

## H

### ANÁLISE DE FADIGA PELO MÉTODO eN

Este Apêndice apresenta os resultados da avaliação de fadiga usando o método eN apresentado no Capítulo 2. A análise foi efetuada sob as deformações circunferenciais lidas nos nós 5285 e 5269 externos e 5266 interno.

#### H.1

##### Históricos de deformação

O histórico de tensão-deformação obtido nos nós externos 5285 e 5269 e 5266 interno, para as hipóteses de carregamento 1, 2 e 3 são apresentadas nas Figuras H.1 a H.9.

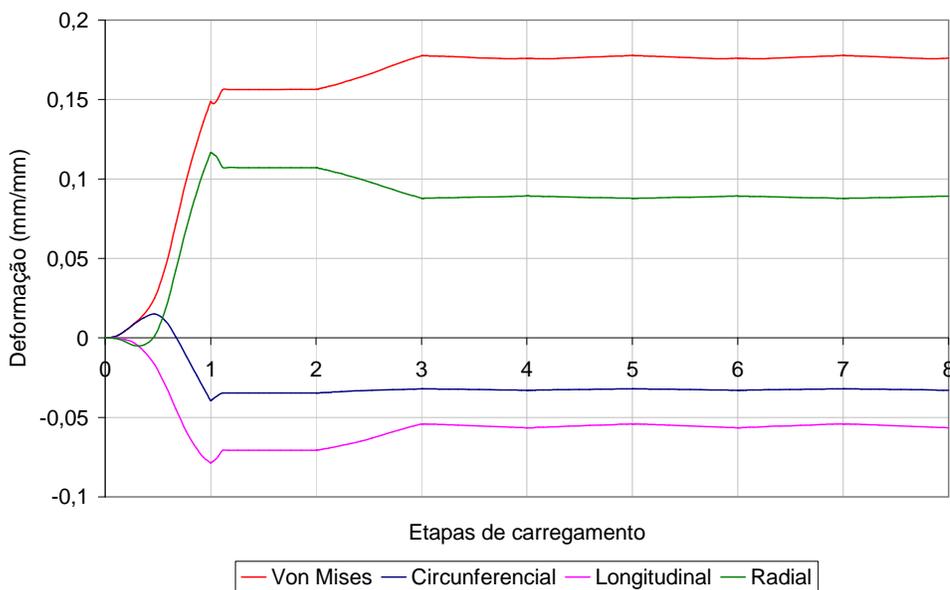


Figura H.1 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 1

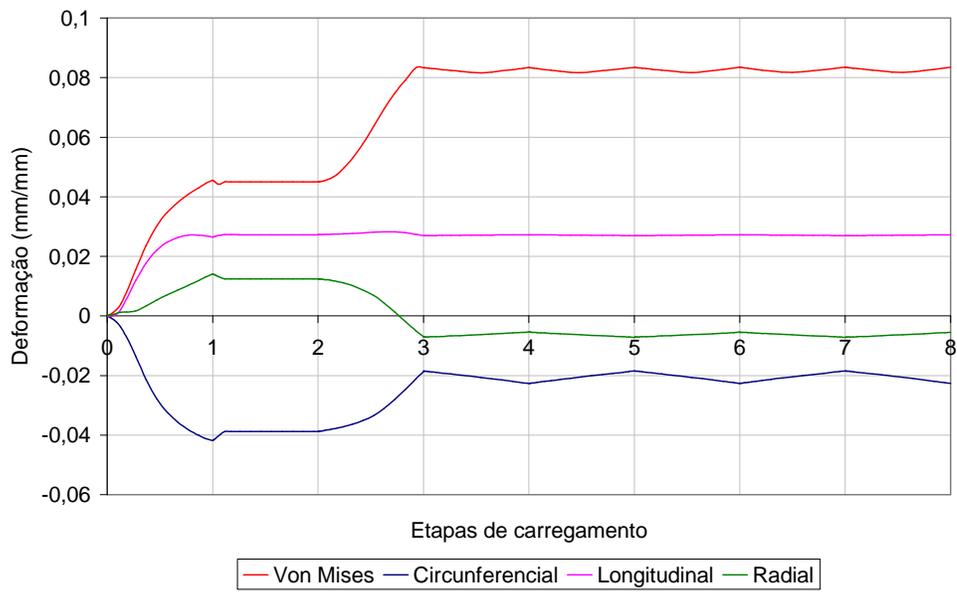


Figura H.2 - Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 1

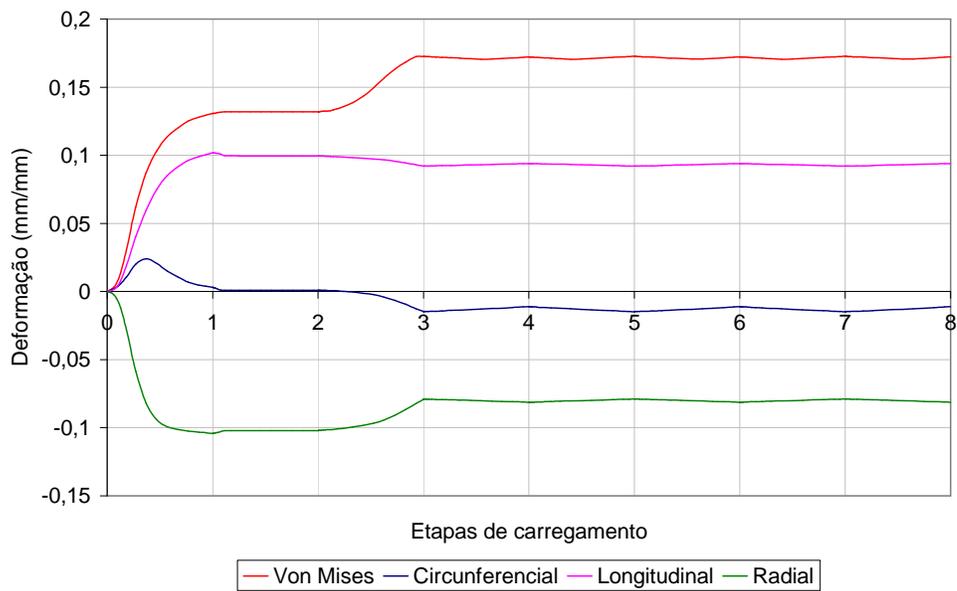


Figura H.3 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 1

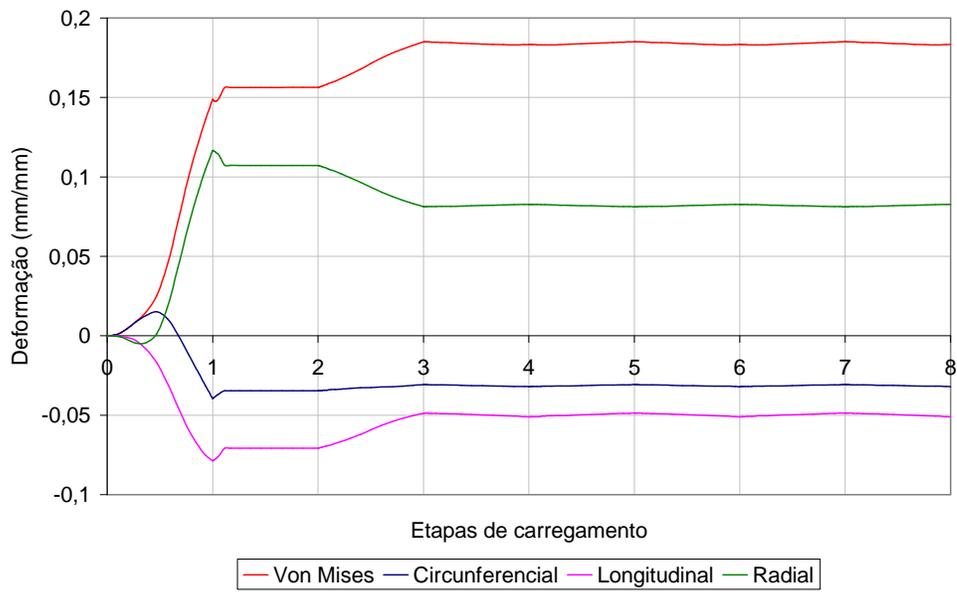


Figura H.4 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 2

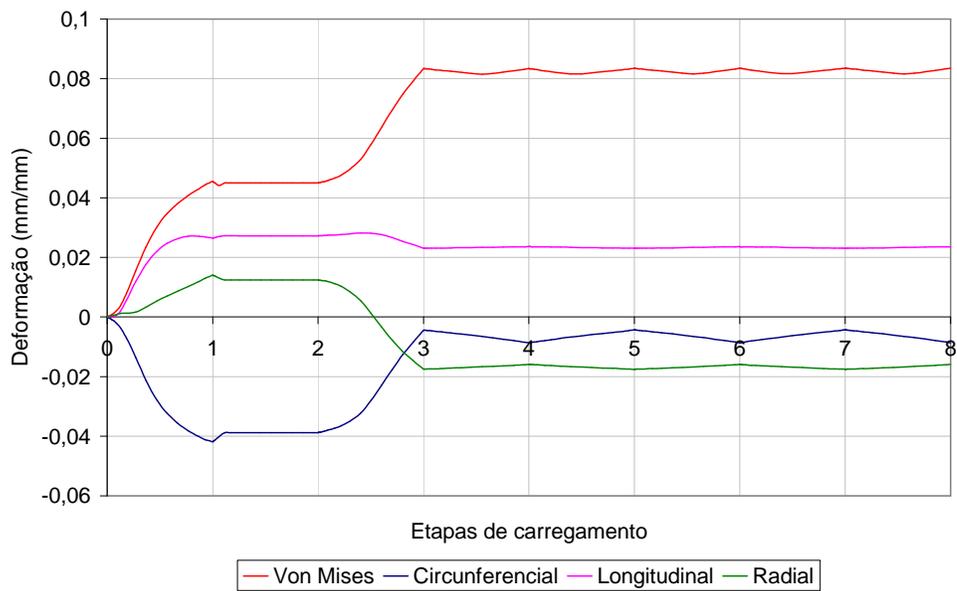


Figura H.5 Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 2

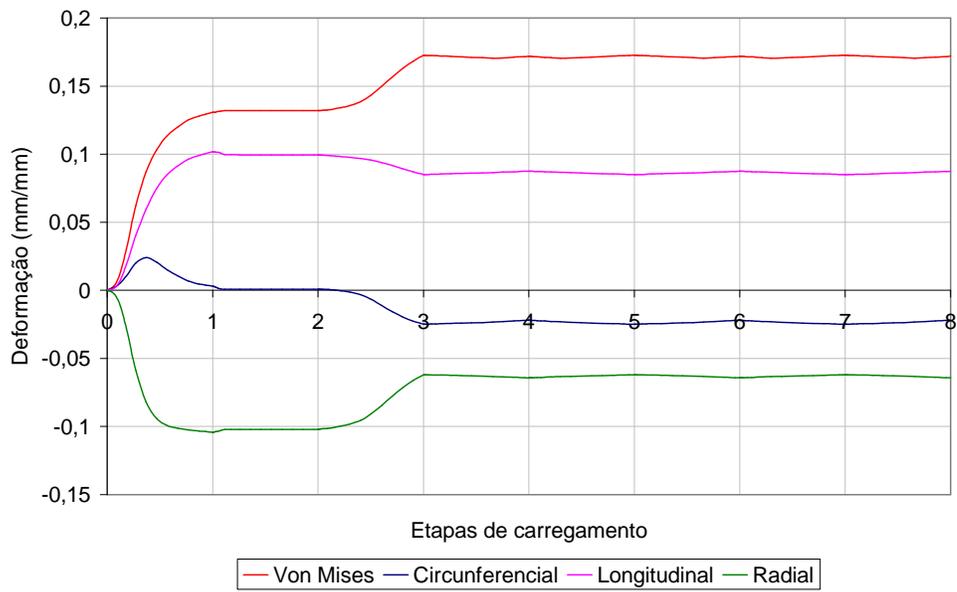


Figura H.6 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 2

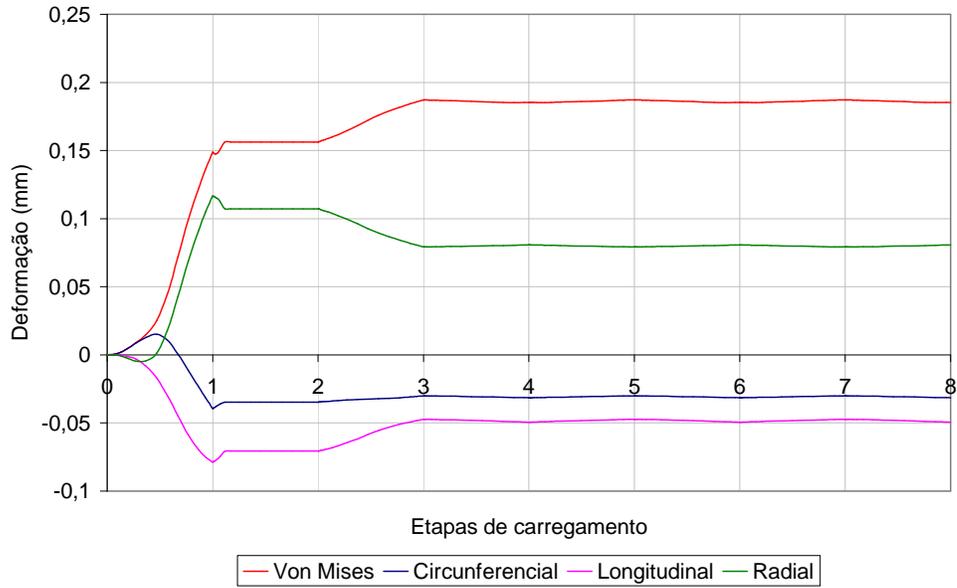


Figura H.7 - Histórico de deformação, nó 5285 externo, hipótese 3

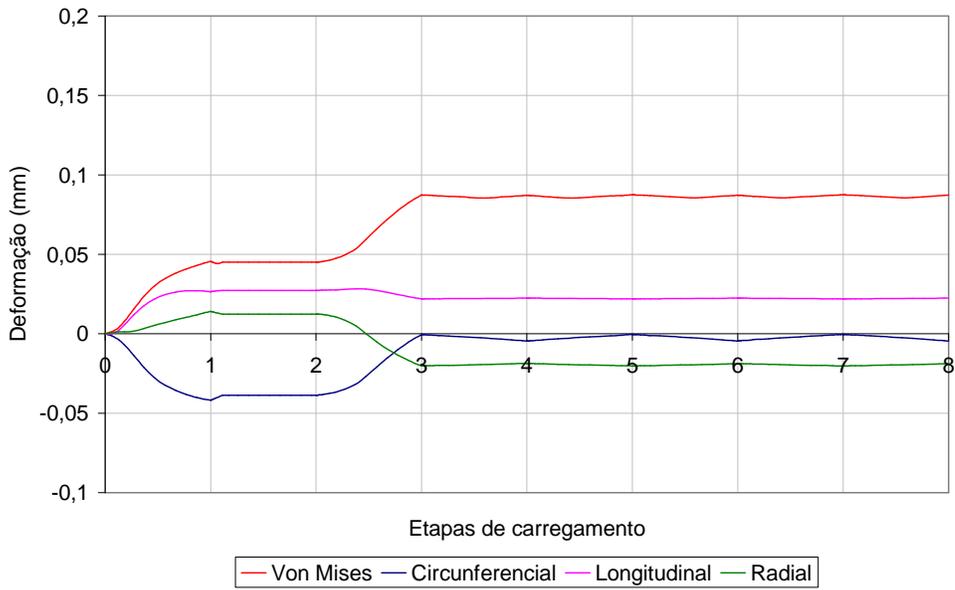


Figura H.8 - Histórico de deformação, nó 5269 externo, hipótese 3

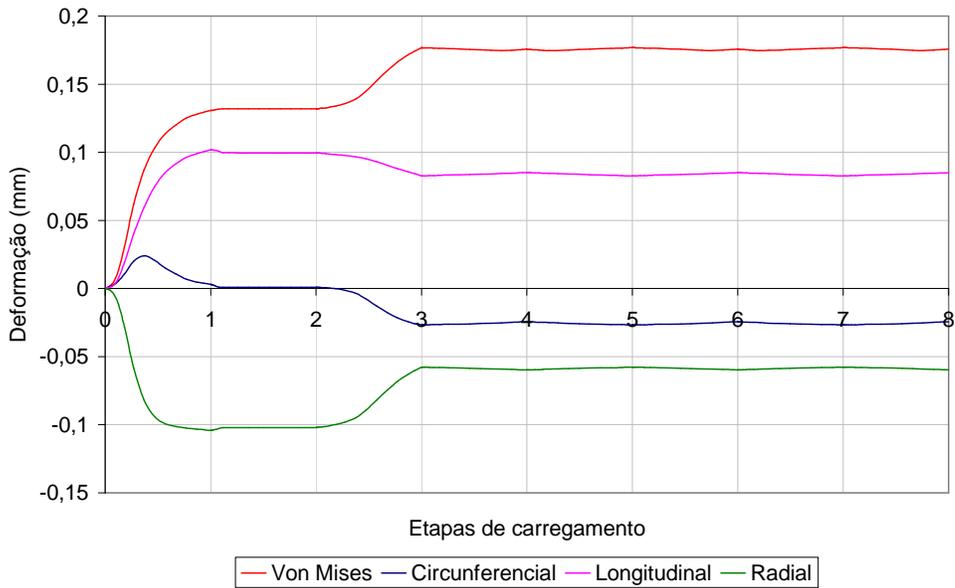


Figura H.9 - Histórico de deformação, nó 5266 interno, hipótese 3

## H.2

### Resultados da avaliação pelo método $\epsilon N$

Uma análise complementar usando o histórico de deformações circunferenciais, apresentados nas Figuras H.1 a H.9, foi efetuada de modo a verificar a influência do dano inicial e do arredondamento na vida à fadiga. Os resultados obtidos mediante este método, podem ser comparados qualitativamente com os resultados apresentados no Capítulo 5. A implementação do método foi efetuada mediante o software VIDA2002. Os resultados da aplicação do método são apresentados na Tabela H.1.

Tabela H.1 - Resultados da avaliação complementar pelo método  $\epsilon N$

Caso	Coffin Manson		Morrow Elasto-plástico		Inclinações Universais	
	D	Nf	D	Nf	D	Nf
H1-5285-n1*	3,01E-2	3,99E+03	8,94E-3	1,34E+05	5,23E-2	2294
H1-5285-n2*	2,50E-2	8,00E+04	1,33E-2	1,50E+05	5,50E-2	3,64E+04
H1-5266-n1*	9,44E-3	1,27E+04	8,32E-2	1,44E+03	1,82E-2	6,59E+03
H1-5266-n2*	6,73E-2	2,97E+04	9,028E-2	2,22E+04	1,41E-1	1,42E+04
H2-5285-n1*	5,24E-2	2,29E+03	4,87E-2	2,46E+03	1,09E-1	1,10E+03
H2-5266-n1*	1,24E-2	9,68E+03	8,40E-2	1,43E+03	2,34E-2	5,13E+03
H3-5285-n1*	8,95E-2	2,23E+04	1,02E-1	1,96E+04	1,89E-1	1,06E+04
H3-5266-n1*	1,92E-2	1,04E+05	8,54E-2	2,34E+04	4,67E-2	4,28E+04

Os gráficos apresentados nas Figuras H.10 a H.11 são geradas pelo VIDA2002, para o caso de carregamento H1-5285-n1\*, ilustram o dano que o material experimenta em cada evento de carregamento, o dano acumulado e os laço de histerese criado pelo histórico das deformações. A Figura H.12 e H.13 são os históricos da tensão-deformação circunferencial obtido do VIDA 2002 e do ANSYS10.0, respectivamente. Observa-se a semelhança com os laços obtidos pelo VIDA2002, com algumas diferenças na forma da curva no local indicado pela seta azul. Tal diferença é um reflexo dos modos distintos de modelagem das ferramentas de software.



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

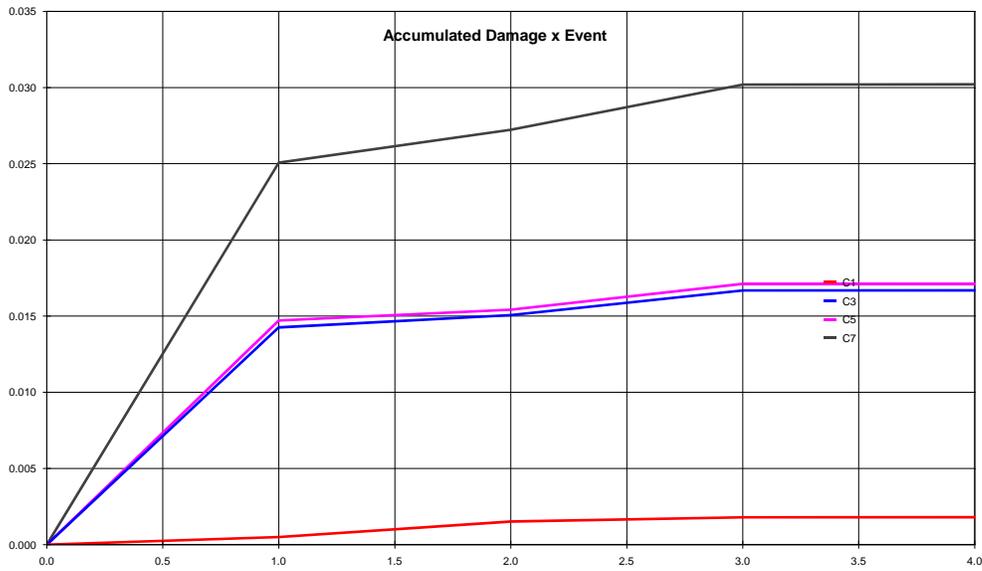


Figura H.11 - Dano acumulado calculado pelo método  $\epsilon N$  para o caso H1-5285-n1\*, VIDA 2002

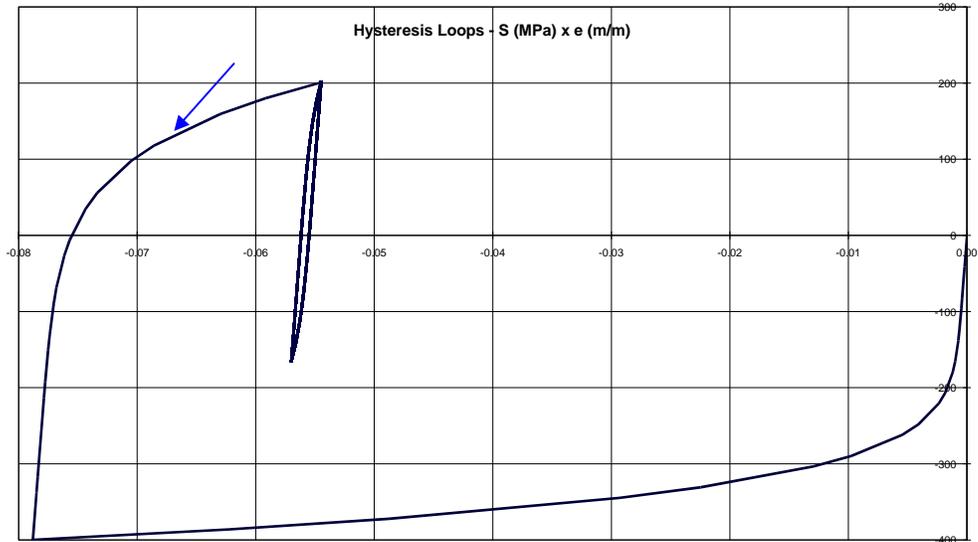


Figura H.12 - Laço de histerese calculado para o caso H1-5285-n1\*, VIDA 2002

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421094/CA

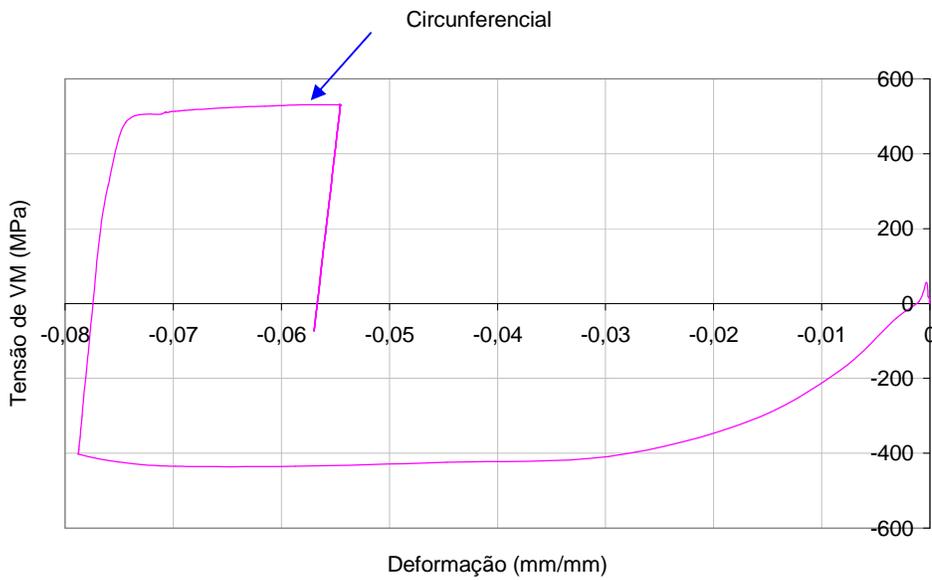


Figura H.13 - Histórico de tensão-deformação circunferencial para o caso H1-5285-n1\*, ANSYS10.0

## I

**Procedimento de cálculo do raio de curvatura da moesa**

O raio de curvatura é um parâmetro requerido para a determinação das deformações pela norma ASME B31.8-2003. O raio de curvatura na direção circunferencial e longitudinal pode ser estimado mediante a equação (I.1), sendo “y” uma função de “x” que define a linha de tendência melhor adequada à curvatura da moesa e “x” a posição onde o “y(x)” é o valor máximo.

$$\frac{1}{Ri} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{eq. (I.1)}$$

As Figuras I.1 e I.2 apresentam as linhas de tendências na direção longitudinal e circunferencial, calculadas a partir dos resultados de elementos finitos da moesa com 15% de profundidade máxima.

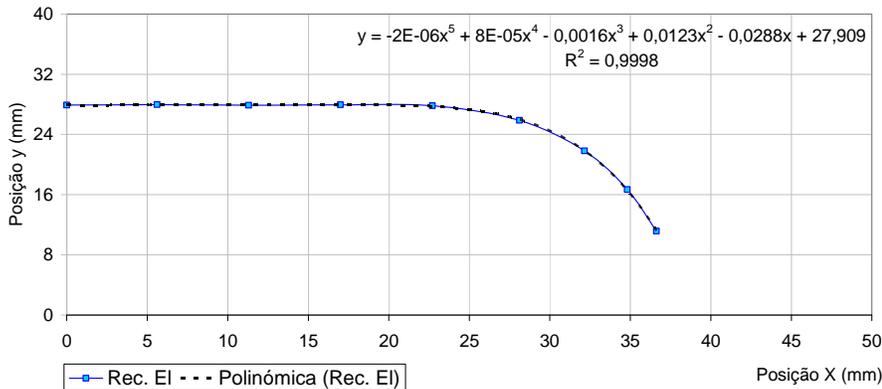


Figura I.1 - Linha de tendência na direção circunferencial da moesa

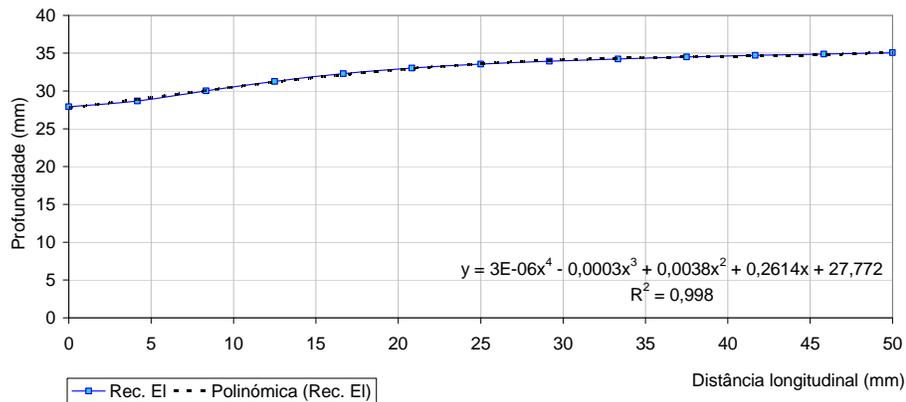


Figura I.2 - Linha de tendência na direção longitudinal da massa

A rotina de cálculo implementada no Maple 9.5 para o cálculo do raio de curvatura é descrita a seguir:

#### Direção circunferencial

$$Z := -0.000002 W^5 + 0.00008 W^4 - 0.0016 W^3 + 0.0123 W^2 - 0.0288 W + 27.909$$

*Primeira derivada:*

$$Z1 := -0.000010 W^4 + 0.00032 W^3 - 0.0048 W^2 + 0.0246 W - 0.0288$$

*Segunda derivada:*

$$Z2 := -0.000040 W^3 + 0.00096 W^2 - 0.0096 W + 0.0246$$

*Cálculo do raio de curvatura no ponto(w) mais profundo do dano:*

$$K1 := \frac{-0.000040 W^3 + 0.00096 W^2 - 0.0096 W + 0.0246}{\sqrt{1 + (-0.000010 W^4 + 0.00032 W^3 - 0.0048 W^2 + 0.0246 W - 0.0288)^2}}$$

*Em x=0*

$$J1 := \text{eval}(K1, W=0);$$

$$J1 := 0.02456942537$$

*Resultado:*

$$R1 := 1/J1;$$

$$R1 := 40.70099259$$

#### Direção longitudinal

*Linha de tendência:*

$$Y := 0.000004 x^4 - 0.0003 x^3 + 0.0065 x^2 + 0.253 x + 25.412$$

*Primeira derivada:*

$$Y1 := 0.000016 x^3 - 0.0009 x^2 + 0.0130 x + 0.253$$

*Segunda derivada:*

$$Y2 := 0.000048 x^2 - 0.0018 x + 0.0130$$

*Cálculo do raio de curvatura no ponto(x) mais profundo do dano:*

$$K := \frac{0.000048 x^2 - 0.0018 x + 0.0130}{\sqrt{1 + (0.000016 x^3 - 0.0009 x^2 + 0.0130 x + 0.253)^2}}$$

*Em x=0*

H1:=eval(K,x=0);

H1 := 0.01184473641

*Resultado:*

R2:=1/H1;

R2 := 84.42568626

## J

## Procedimento Geral para a Avaliação de Integridade de Mossas Simples Transversais

O diagrama de fluxo apresentado na Figura J.1 é aplicável em mossas simples transversais com profundidade máxima de até 15% do diâmetro externo.

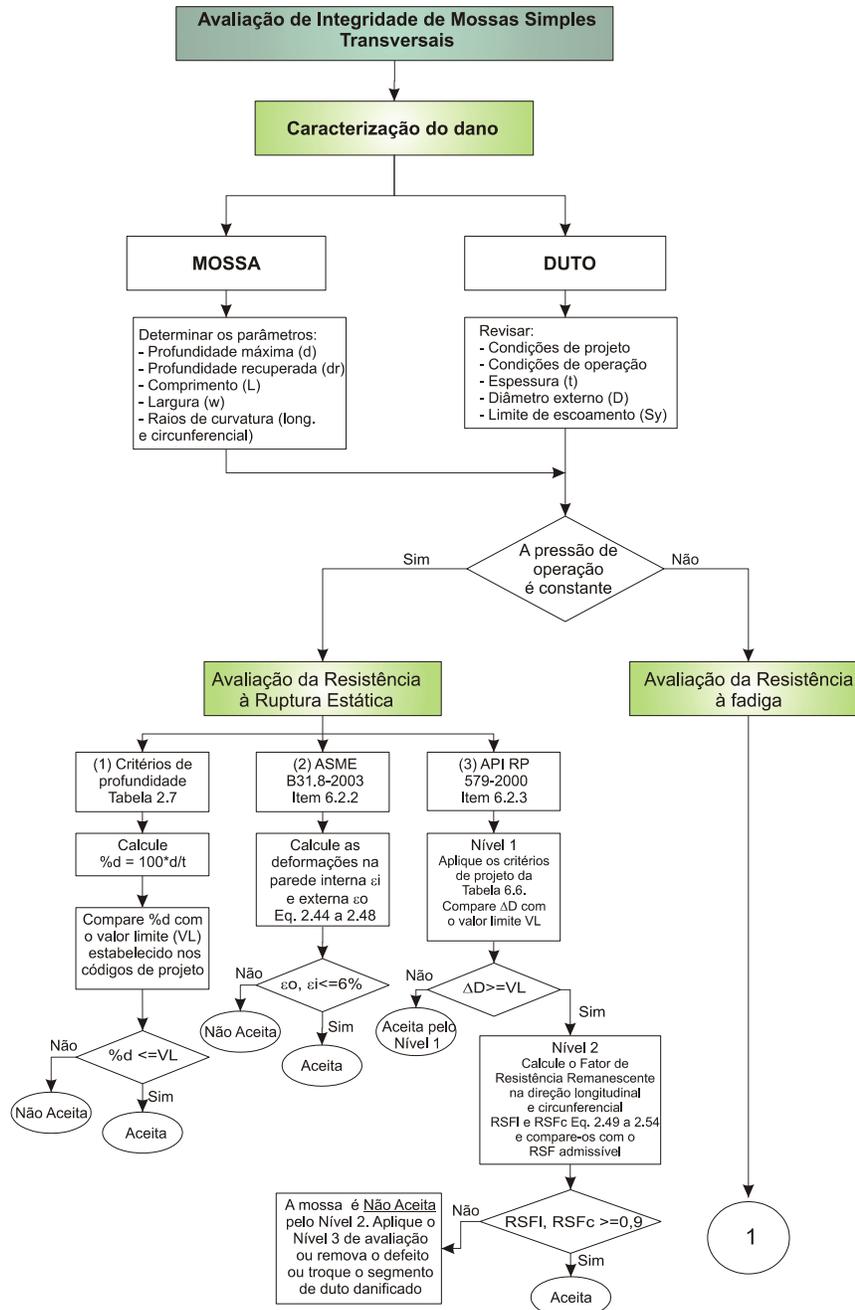


Figura J.1 - Diagrama de fluxo do procedimento geral de avaliação de integridade de mossas simples transversais com profundidade de até 15% do diâmetro externo

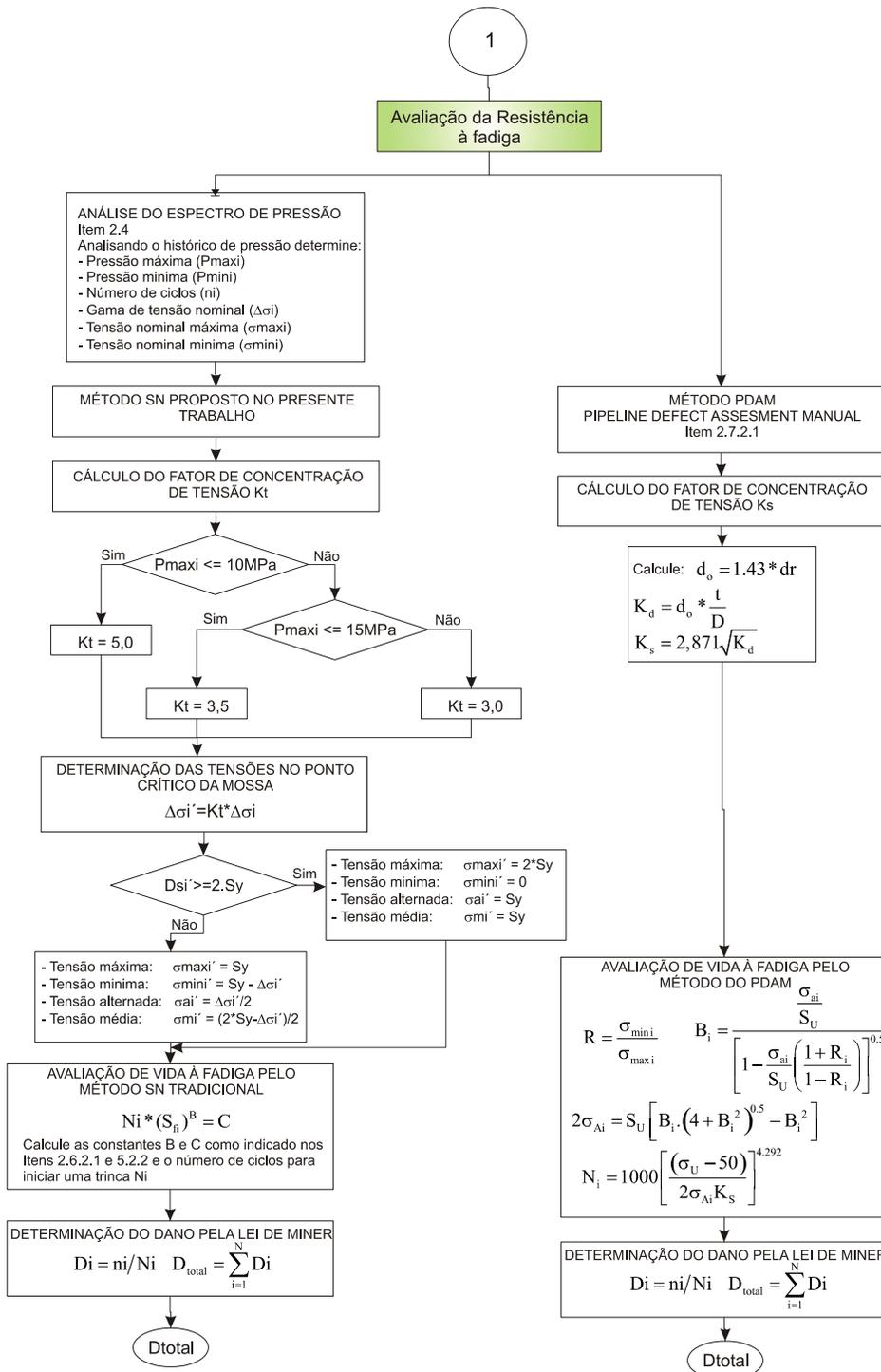


Figura J.1 - Diagrama de fluxo do procedimento geral de avaliação de integridade de mossas simples transversais com profundidade de até 15% do diâmetro externo (Continuação)