

5

ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES CÍCLICAS PARA AVALIAÇÃO DE FADIGA

No capítulo 4 observou-se que a pressão de ruptura dos espécimes indentados não é afetada pela presença de mossa simples transversais com 15% de profundidade máxima. Assim, um duto com as características geométricas (D/t , L/D , material) analisadas e contendo uma mossa como a estudada não falharia se operasse na pressão constante ou monotônica. Entretanto, os dutos operam sob pressões cíclicas, possibilitando a atuação de fadiga.

Este capítulo avalia mediante a combinação da análise numérica e de critérios publicados na literatura (detalhados no Capítulo 2) a possibilidade de iniciação de uma trinca por fadiga a partir de uma mossa. A análise numérica implementada dá continuidade ao modelo estudado no Capítulo 4, verificando a variações das tensões e deformações com três hipóteses de carregamento cíclico. As hipóteses de carregamento foram estabelecidas considerando três fatores de segurança aplicáveis a linhas de transporte de óleo e gás. Para quantificação da vida à fadiga apoiou-se no software VIDA2002 [49], desenvolvido por Megglio & Castro, professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Quando requeridos, cuidados foram tomados para compatibilizar os resultados dos softwares ANSYS10.0 e o VIDA2002.

5.1.

Modelagem Numérica

A modelagem numérica teve como finalidade a verificação da variação das tensões e deformações com a pressão, obtendo um histórico desses parâmetros ao longo do tempo que pode ser usado para a avaliação de fadiga mediante métodos tradicionais.

5.1.1.

Descrição do Modelo Numérico

O modelo usado é o mesmo implementado para a avaliação da possibilidade de ruptura no Capítulo 4, usando no extremo oposto ao plano de simetria xy a condição de contorno de restrição axial, tal como indicado na Figura 5.1.

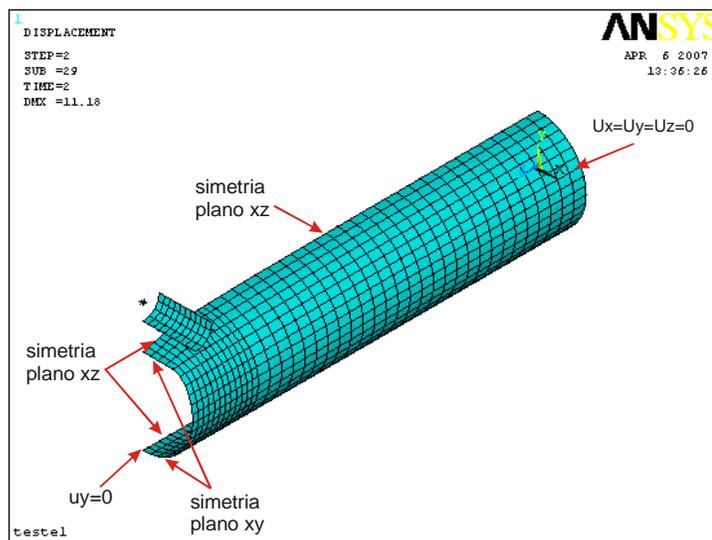


Figura 5.1 - Condições de simetria usadas na avaliação numérica

As hipóteses de pressão avaliadas foram estabelecidas para se aproximar de condições reais de linhas transporte de óleo e gás. Para cada hipótese foi escolhido um valor de pressão mínima, sempre igual a zero e uma pressão máxima calculada mediante a equação (5.1), sendo: F o fator de projeto, t a espessura nominal e D o diâmetro externo do duto.

$$P_{\max} = \frac{F \cdot 2 \cdot t}{D} \cdot S_y \quad \text{eq. (5.1)}$$

Escolheram-se três valores de fator de projeto F para o cálculo das pressões máximas. A primeira hipótese considerou o fator $F = 0,72$ usado em linhas de transporte de óleo, segundo a ASME B31.4-2002, Item 402.3.1. A segunda, o fator $F = 0,8$, indicado pela ASME B31.8, Item 841.11 para uma localização classe I em linhas de transporte de gás. A terceira, o fator $F = 0,5$, uma condição de carregamento mais benigna do que os anteriores que se aplica tanto para óleo, como para gás. A Tabela 5.1 resume as hipóteses de carregamento implementadas na modelagem numérica.

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

Hipótese	F	Pressão máxima	Pressão mínima	DP	Pressão média	Pressão alternada
1	0,50	10,8	0	10,8	5,4	5,4
2	0,72	15,6	0	15,6	7,8	7,8
3	0,80	17,3	0	17,2	8,6	8,6

Quando uma mossa expõe-se a variações de pressão, esta pode experimentar variação da sua profundidade até a condição de estabilização. Nessa condição de estabilidade espera-se que, mantendo a gama de pressão, os valores de tensão e deformação não variem. Assim, numericamente, foram aplicados vários ciclos de pressão até atingir a condição de estabilização e no último ciclo foi lido o histórico de tensões e deformações usada para a análise de fadiga.

5.1.2.

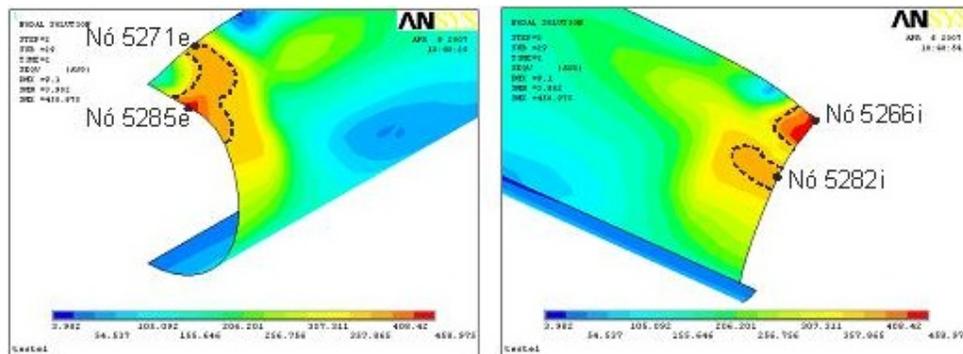
Método de Análise dos Resultados da Modelagem Numérica

O procedimento de análise das tensões e deformações numéricas é detalhado a seguir.

5.1.2.1.

Análise das Tensões de Von Mises na Região Deformada Antes de Serem Aplicados os Ciclos de Pressão

O estado de tensão de Von Mises na massa recuperada elasticamente, segue a distribuição apresentada na Figura 5.2. Tais tensões são tensões residuais, decorrentes da indentação. Nessa figura, a região amarela corresponde a tensões da ordem de 300MPa, menores que o limite de escoamento do material. A região passando do laranja ao vermelho, destacada com linha tracejada apresenta, por causa do encruamento, tensões maiores que o limite de escoamento do material.



A – Parede externa

B – Parede interna

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

A maior tensão na parede externa, localiza-se num ponto distando, aproximadamente, dez milímetros do centro da massa (nó 5285e). A partir deste ponto se estende uma envolvente de tensões significativamente altas, contendo o nó 5271e no plano de simetria longitudinal. Já na parede interna as maiores tensões estão ao longo do perímetro, no plano de simetria xy. O maior valor ocorre no centro da massa (nó 5266i). Ainda na parede interna, é observada uma região laranja, com um ponto de tensões altas, coincidindo com a posição do nó 5282i.

5.1.2.2.

Determinação do Número de Ciclos de Pressão até Estabilização

A determinação do ciclo de estabilização é importante, já que o estado de tensão-deformação que o caracterize será reproduzido em ciclos posteriores, sempre que as condições de operação sejam mantidas. Para determinar o número de ciclos de estabilização, avaliou-se a variação da profundidade da mocha com os ciclos de pressão. O local escolhido foi o nó 5266, ponto com maior profundidade. Os resultados são apresentados na Figura 5.3.

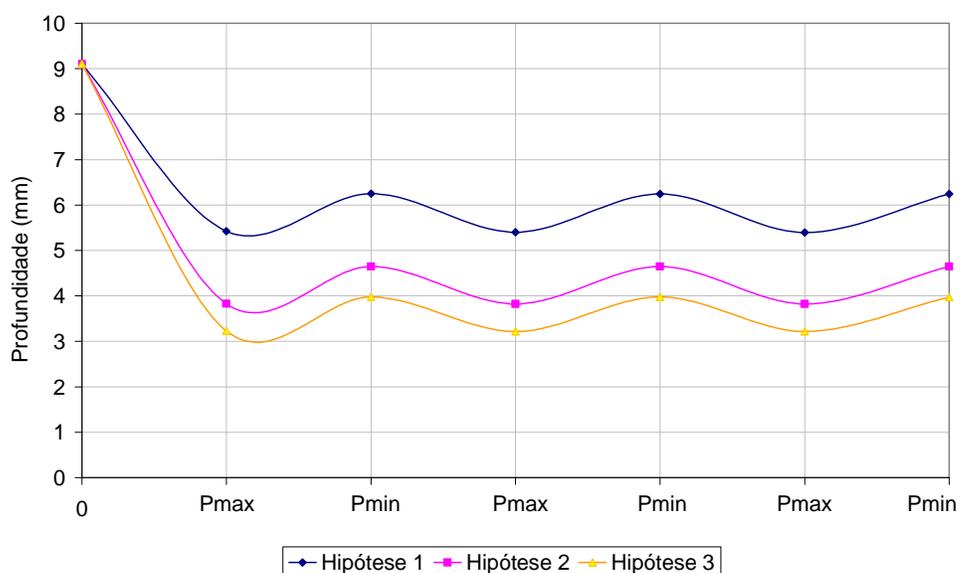


Figura 5.3 - Variação da profundidade da mocha ao longo dos ciclos de pressão

Uma variação significativa da profundidade é observada no primeiro e segundo ciclo. No segundo ciclo a mocha estabiliza, apresentando diferenças menores que 1%. Escolheu-se para efeitos da modelagem a aplicação de três ciclos de pressão consecutivos, ao final dos quais foram extraídas as informações requeridas para a avaliação de fadiga.

5.1.2.3.

Análise das Tensões de Von Mises na após a Estabilização

O estado de tensão após o ciclo de estabilização é registrado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, para as hipóteses de carregamento 1, 2 e 3, respectivamente. Em todas as figuras foi destacada a posição com maior tensão de Von Mises, correspondente ao nó 5269 na parede externa.

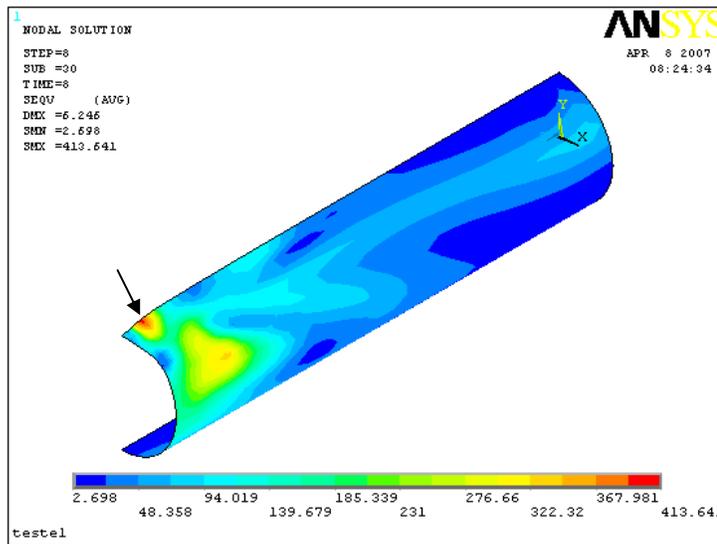


Figura 5.4 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 1

A maior tensão de Von Mises, lida para a hipótese 1 é igual a 413MPa, para a hipótese 2: 417MPa e para a hipótese 3: 429,46MPa.

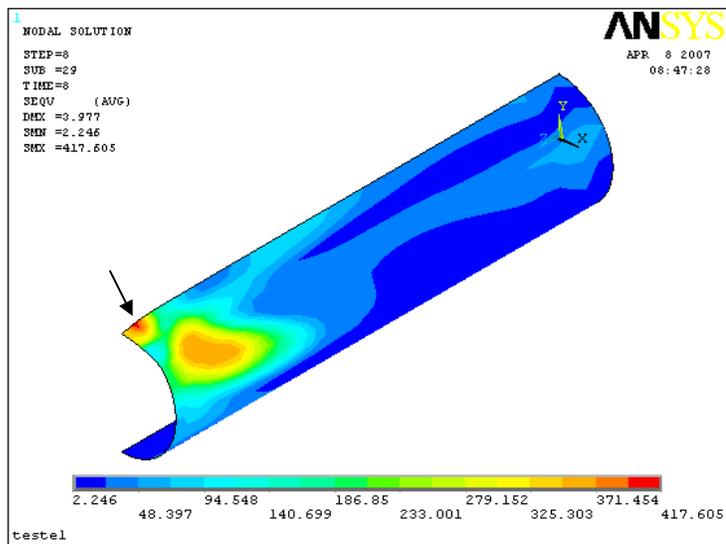


Figura 5.5 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 2

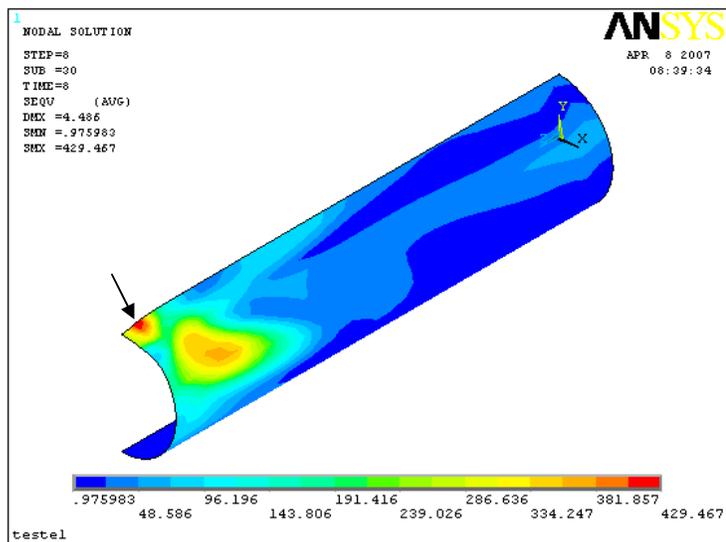


Figura 5.6 - Tensão de Von Mises após a estabilização, hipótese 3

5.1.2.4.

Análise do Histórico das Tensões de Von Mises nos Ciclos de Pressão

Para determinar os locais com maior severidade de tensão, selecionaram-se os nós com as tensão de Von Mises mais altas, destacados nas Figuras 5.2, 5.4, 5.5 e 5.6 e foram lidos o históricos tensão-deformação de Von Mises ao longo dos ciclos de carregamento. Os nós selecionados na parede externa foram: 5285,

5269 e 5391, e na parede interna: 5266 e 5282. A Figura 5.7 registra o histórico tensão-deformação de Von Mises nesses locais para a hipótese de carregamento 1.

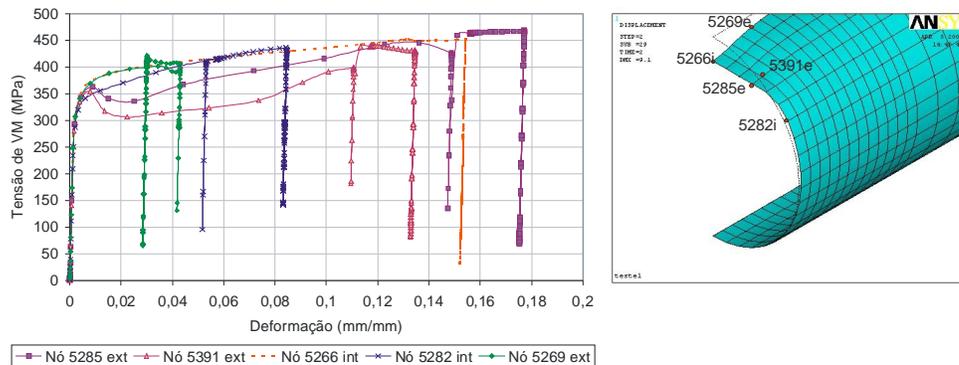


Figura 5.7 - Histórico das tensões-deformações de Von Mises nos nós seleccionados, hipótese 1

As Figuras 5.8 a 5.12 permitem visualizar a variação das tensões com as etapas de carregamento nos nós seleccionados, para a hipótese 1. Nessas figuras as etapas 1 e 2 correspondem ao processo de indentação e descarregamento, respectivamente. As etapas 3 e 4 são o primeiro ciclo de pressão, sendo que na etapa 3 a pressão é aplicada e na etapa 4, na pressão é aliviada, as etapas 5 e 6 representam o segundo ciclo de pressão e as 7 e 8 o terceiro ciclo. Em cada etapa a pressão é aplicada gradualmente mediante sub-passos. Cada sub-passo é destacado como um ponto nas curvas apresentadas.

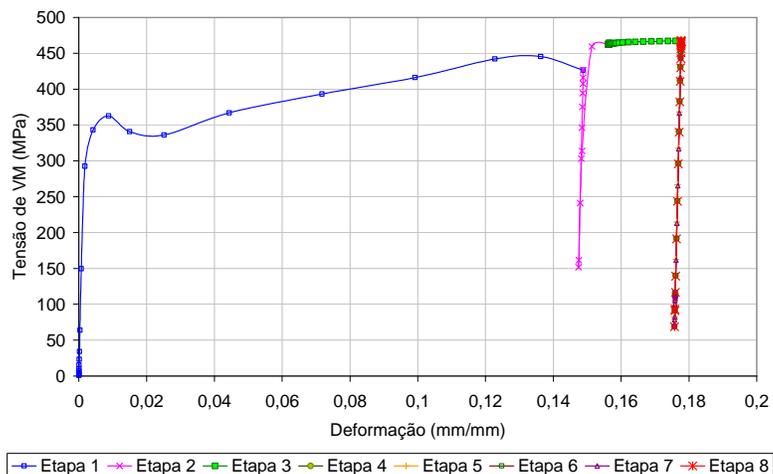


Figura 5.8 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5285 externo, hipótese 1

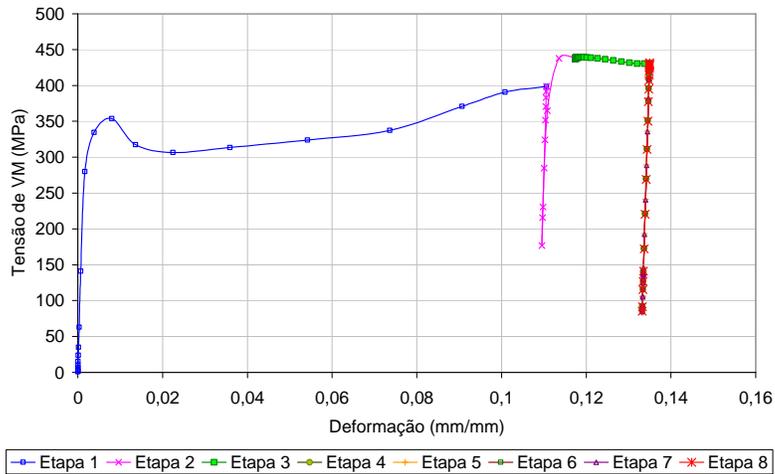


Figura 5.9 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5391 externo, hipótese 1

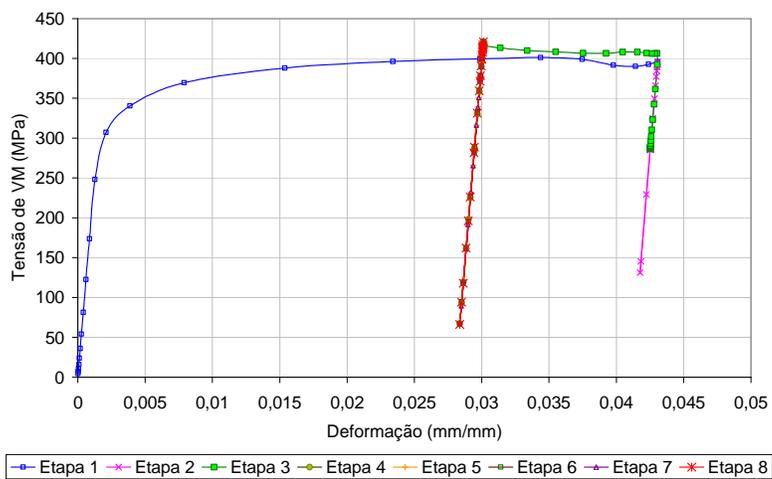


Figura 5.10 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5269 externo, hipótese 1

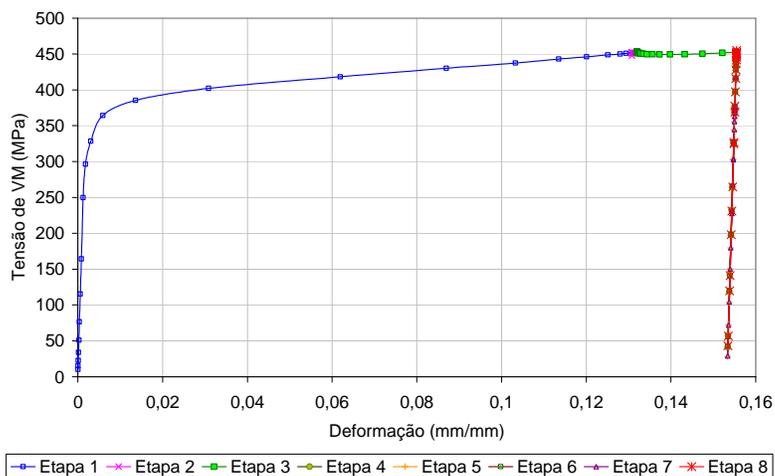


Figura 5.11 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5266 interno, hipótese 1

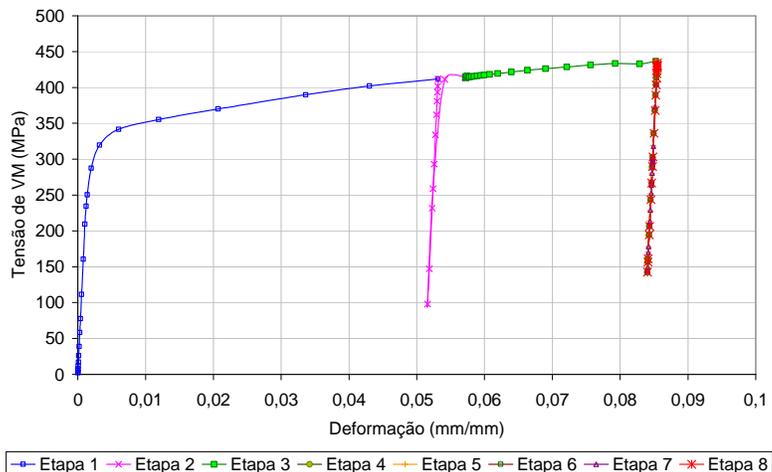


Figura 5.12 - Histórico de tensão-deformação de Von Mises, nó 5282 interno, hipótese 1

O comportamento esperado das curvas tensão-deformação cíclicas são laços de histerese similares aos apresentados no Apêndice C, Figura C.2. Entretanto, alguns desvios peculiares são observados nas Figuras 5.8 a 5.10, principalmente no descarregamento e na aplicação dos ciclos de pressão. Tais desvios obedecem à variação da direção das tensões principais durante os ciclos, que afetam de modo irregular a tensão de Von Mises. Como as tensões de interesse são as produzidas no último ciclo de carregamento, o aprofundamento no estudo dessas peculiaridades está fora do escopo do presente trabalho.

No terceiro ciclo, etapas 7 e 8 de carregamento, todos os nós analisados apresentaram comportamento elástico. Na etapa 7, quando a pressão é aplicada, observa-se um incremento gradual nas tensões, até atingirem o valor máximo. Já na etapa 8, quando a pressão é aliviada, a tensão diminui gradualmente até alcançar um valor mínimo, logo a tensão aumenta sem existir nenhum carregamento que a promova. Para ilustrar melhor este comportamento, na Tabela 5.2 são indicados os valores de tensão de Von Mises máximo e mínimo de tensão para cada hipótese de carregamento. Dois valores mínimos são apresentados: o último valor de tensão registrado na etapa de descarregamento (S_{min}^*) e o menor valor lido nessa mesma etapa (S_{min}^{**}). Em todos os casos analisados o valor (S_{min}^*) é sempre maior que (S_{min}^{**}).

O incremento de tensão sem um carregamento que o promova obedece à mudança no sinal das tensões. Assim, o que parece um incremento, na realidade é uma reversão do estado compressivo ao tractiveivo ou vice-versa. A reversão do sinal não é identificada facilmente pelo fato das tensões de Von Mises não possuírem sinal. As gamas de tensão Ds^* da Tabela 5.2 são calculadas com a tensão máxima S_{max} e a tensão mínima S_{min}^* , considerando a reversão do sinal nessa tensão, e Ds^{**} com a tensão máxima S_{max} e a tensão mínima S_{min}^{**} . Diferenças entre esses valores são significativas. Se não considerado o sinal das tensões, podem ser induzidos erros nas vidas à fadiga calculadas com tensões de Von Mises.

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

Hipótese	Nó	S_{max} (MPa)	S_{min}^* (MPa)	S_{min}^{**} (MPa)	Ds^* (MPa)	Ds^{**} (MPa)
1	5285e	468,0	116,6	68,7	584,60	399,36
	5391e	431,6	141,0	85,1	572,50	346,45
	5269e	417,1	420,9	142,4	838,00	350,89
	5266i	454,7	377,2	42,9	831,87	411,81
	5282i	434,3	303,3	66,2	737,52	291,82
2	5285e	472,45	126,30	75,66	598,75	396,79
	5391e	436,27	136,58	89,66	572,85	346,61
	5269e	426,57	422,98	36,59	849,55	389,99
	5266i	457,59	319,64	13,94	777,23	443,65
	5282i	412,11	373,57	180,05	785,69	232,07
3	5285e	474,22	115,57	81,92	589,78	392,29
	5391e	438,59	124,49	92,64	563,09	345,96
	5269e	428,68	379,99	42,10	808,67	386,58
	5266i	458,94	219,30	19,44	678,23	439,49
	5282i	431,73	361,10	199,39	792,83	232,33
Nota:						
* Valor calculado com o último valor da tensão na etapa de carregamento com reversão do sinal						
** Valores calculados com o mínimo valor da tensão lido para a última etapa de descarregamento.						

Considerando os valores das gamas de tensão e de tensões máximas apresentadas na Tabela 5.2, selecionaram-se os nós 5285 e 5269 na parede externa, assim como o nó 5266 na parede interna como os pontos com maior severidade. As curvas de tensão-deformação de Von Mises das hipóteses 2 e 3 nesses nós são apresentadas no Apêndice F.

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

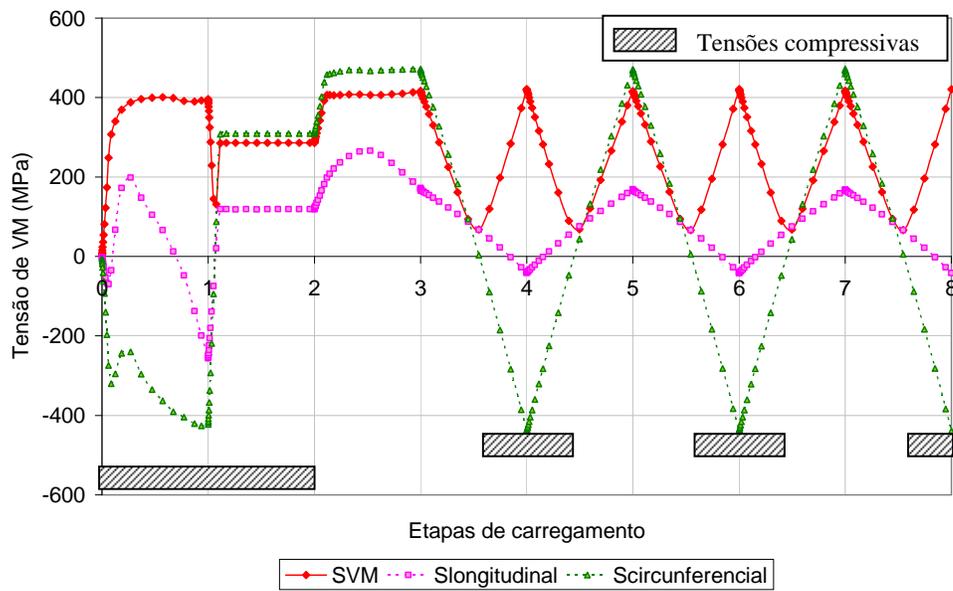


Figura 5.14 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5269 externo, hipótese 1

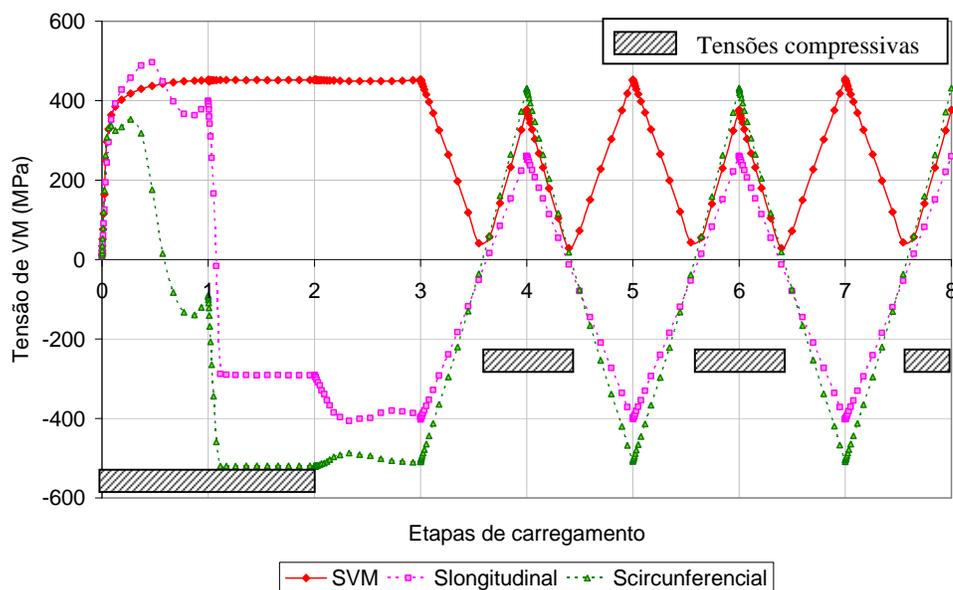


Figura 5.15 - Histórico da tensão de Von Mises, circunferencial e longitudinal no nó 5266 interno, hipótese 1

Para atribuir um sinal às tensões de Von Mises, usa-se o critério proposto em [20], [49], baseado no sinal das componentes das tensões. Assim, para o estado de tensão no espécime, se a somatória das componentes das tensões for negativa, a tensão de Von Mises também o será e vice-versa.

Nas Figuras 5.16 a 5.18 são apresentados os históricos da tensão de Von Mises com o sinal já corrigido, destacando os pontos onde foram lidos os valores máximos e mínimos das tensões de Von Mises. Nos nós 5285 e 5269, externos, as tensões de Von Mises quando aplicada a pressão são tractivas (+) e após o alívio da pressão, tais tensões são compressivas (-). Já no nó 5266, interno, quando aplicada a pressão as tensões são compressivas e após o alívio, passam a serem tractivas. É por isto que a tensão máxima no nó 5266 é lida após o alívio da pressão e a tensão mínima durante a aplicação da pressão. Os resultados da aplicação do critério nos resultados das outras hipóteses são apresentados no Apêndice F.

A Tabela 5.3 resume as tensões máxima, mínima e nominal calculadas a partir do histórico de tensões de Von Mises corrigidas, assim como o fator de concentração determinado pela equação 5.1.

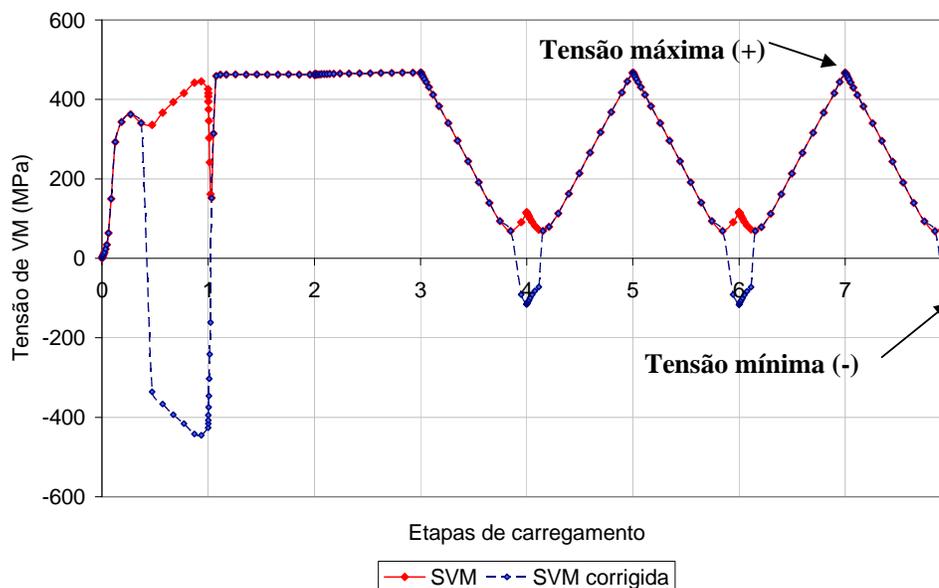


Figura 5.16 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5282 externo, hipótese 1

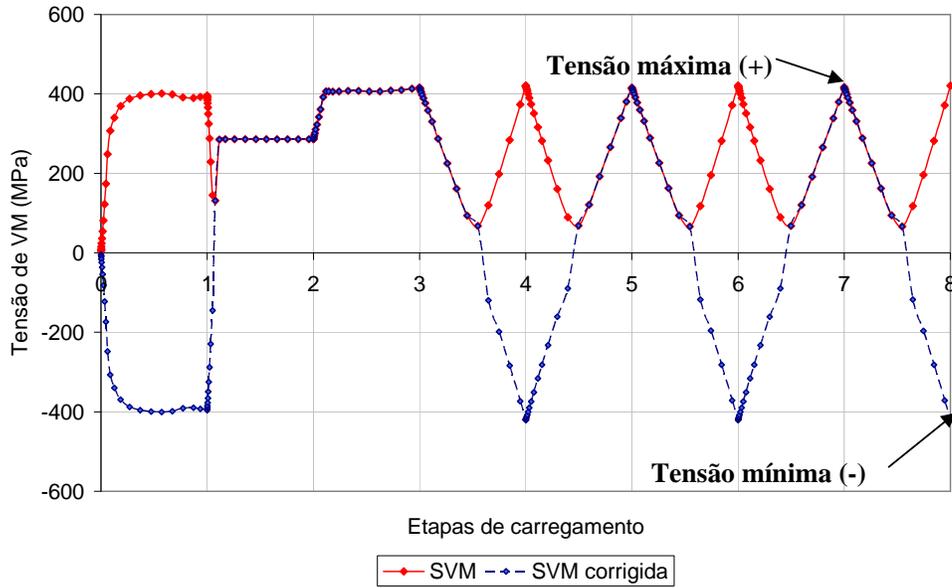


Figura 5.17 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5269 externo, hipótese 1

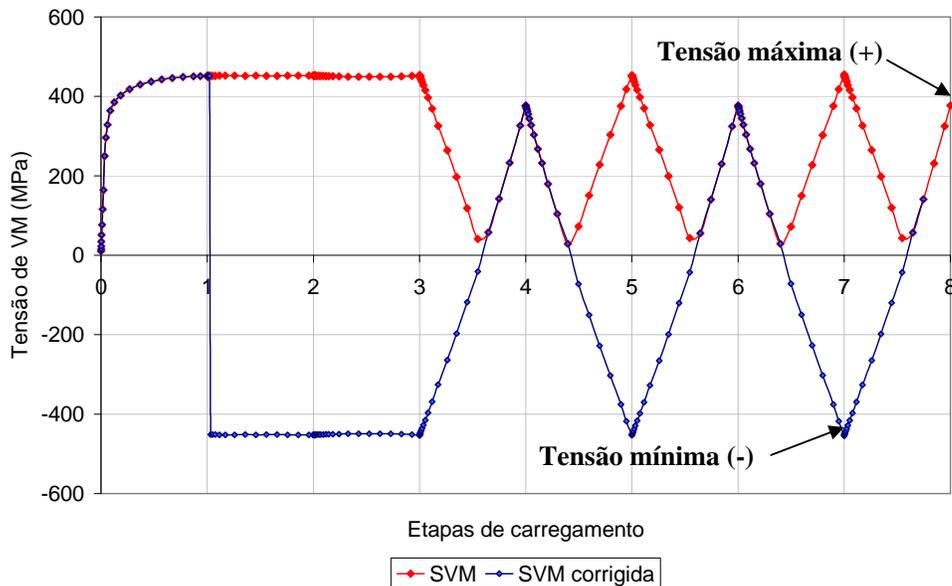


Figura 5.18 - Comparação da tensão de Von Mises e tensão de Von Mises corrigida, no nó 5266 interno, hipótese 1

A Tabela 5.3 permite observar a influência da pressão no fator de concentração de tensão K_t . Sob a menor pressão, maior a profundidade da mocha e maior o fator de concentração de tensão e vice-versa. Entretanto, na medida em que a pressão aumenta, o K_t tende a se estabilizar e permanece no intervalo entre 2,1 e 2,5.

Tabela 5.3 – Fatores de concentração de tensão

Nó	Gama de pressão (MPa)	Tensão máxima	Tensão mínima	Tensão nominal	K_t
Hipótese 1					
5285	10,5	468,01	-116,61	168,23	3,48
5269	10,5	417,10	-420,92	168,23	4,98
5266	10,5	377,24	-454,71	168,23	4,95
Hipótese 2					
5285	15,6	472,45	-126,30	249,93	2,40
5269	15,6	426,57	-422,98	249,93	3,40
5266	15,6	319,64	-457,59	249,93	3,11
Hipótese 3					
5285	17,3	474,22	-115,57	277,17	2,13
5269	17,3	428,67	-379,98	277,17	2,92
5266	17,3	219,30	-458,94	277,17	2,45

O maior valor do K_t foi obtido no nó 5269 externo em todos os níveis de pressão avaliados.

5.1.2.6.

Verificação das Direções das Tensões Principais

Os métodos de fadiga uniaxial SN e ϵN , são apropriados si as direções das tensões principais não variarem. Para verificar isto, foram escolhidos dois estados de tensão da hipótese 1, obtidos em tempos diferentes, e a partir das componentes foram calculadas as tensões e planos principais.

a) Tempo computacional: 1,623:

O tensor das tensões:

$$T := \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 4.754 & -1.99 & -27.448 \\ -1.99 & 368.65 & 7.404 \\ -27.448 & 7.404 & 509.75 \end{pmatrix}$$

As direções principais

$$D := \text{eigenvals}(T) \quad D = \begin{pmatrix} 368.263 \\ 3.26 \\ 511.631 \end{pmatrix}$$

Os planos principais

$$V := \text{eigenvecs}(T) \quad V = \begin{pmatrix} -1.5 \times 10^{-3} & -0.999 & 0.054 \\ 0.999 & -4.344 \times 10^{-3} & -0.052 \\ -0.053 & -0.054 & -0.997 \end{pmatrix}$$

b) Tempo computacional: 3,011:

O tensor das tensões:

$$T := \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 2.788 & 0.429 & -44.72 \\ 0.429 & 297.71 & 2.665 \\ -44.72 & 2.665 & 530.03 \end{pmatrix}$$

As direções principais

$$D := \text{eigenvals}(T) \quad D = \begin{pmatrix} 297.682 \\ -0.979 \\ 533.825 \end{pmatrix}$$

Os planos principais

$$V := \text{eigenvecs}(T) \quad V = \begin{pmatrix} 3.102 \times 10^{-3} & 0.996 & -0.084 \\ 1 & -2.179 \times 10^{-3} & 0.011 \\ -0.011 & 0.084 & 0.996 \end{pmatrix}$$

Efetivamente, as direções dos planos principais variam ao longo do tempo. Assim, trata-se de um caso de tensão que gera fadiga multiaxial.

A curva tensão-deformação de Von Mises dada pelo ANSYS é uma expressão uniaxial do estado complexo de tensões nos pontos analisados. Alterações nos sinais de tais valores devem ser usadas com cuidado e de modo independente para os dois parâmetros.

5.2.

Avaliação de Fadiga

Como as direções dos planos principais da região indentada variam com o tempo, como discutido no Item 5.1.2.6, cuidados devem ser tidos no cálculo de vidas à fadiga, já que se trata de um caso de fadiga multiaxial. Entretanto, uma aproximação simples e rápida é a do caso uniaxial, usando as tensões-deformações máximas e mínimas no ciclo de estabilização. Os resultados da avaliação uniaxial são usados de modo qualitativo para a comparação com outros procedimentos disponíveis na literatura, que também usam a abordagem uniaxial, e com resultados experimentais [26].

A avaliação da vida a fadiga uniaxial pode ser efetuada a partir das tensões, mediante o método SN ou das deformações usando o método ϵN . O método SN é apropriado no regime elástico, já no regime elasto-plástico, o método ϵN fornece melhores resultados.

A seguir são apresentados os resultados da avaliação pelo método SN usando as tensões máximas e mínimas apresentadas na Tabela 5.3. Estes resultados desconsideram o dano causado pela indentação e pelo arredondamento, mas como o arredondamento não contabiliza mais do que dois ciclos, a aproximação usada é apropriada. Na avaliação também são usadas tensões circunferenciais de modo comparativo, já que é prática comum avaliar a fadiga usando estas tensões [37]. Os resultados da avaliação de fadiga usando as tensões circunferenciais são apresentados no Apêndice G.

As deformações circunferenciais foram usadas para a avaliação de fadiga pelo método ϵN , os resultados são apresentados no Apêndice H.

A avaliação por fadiga apoiou-se no uso da ferramenta de software VIDA2002 [42]. Esta ferramenta automatiza o cálculo do dano pelos métodos SN, ϵN ou combinações. A ferramenta aplica algoritmos Rainflow e Rainflow seqüencial para a contagem dos ciclos de carregamento e cálculo das tensões médias e alternadas correspondentes. No método SN pode incorpora-se o efeito da tensão média mediante os métodos de Gerber e Goodman, equações (2.30) e (2.31). No método ϵN são implementados os modelos de Coffin-Manson, equações (2.35) e (2.36) e considera-se o efeito da tensão média através dos métodos de Morrow elástico, Morrow elasto-plástico, Smith-Topper-Watson, equações (2.37) a (2.39). O método das inclinações universais de Manson é também avaliado. Fatores de redução da resistência à fadiga também podem ser incorporados, segundo as características específicas do material.

Em situações que as tensões usadas na avaliação SN superarem o limite de escoamento, o VIDA2002 incorpora o método ϵN para considerar o efeito das tensões residuais. Nessas situações, optou-se por avaliar a vida a fadiga manualmente, usando os mesmos parâmetros do material que o VIDA2002 usaria.

5.2.1.

Adequação dos Dados Obtidos da Análise por Elementos Finitos

O primeiro passo na avaliação de fadiga é a compatibilização dos dados obtidos pelo ANSYS10.0 com os requeridos pelo software VIDA2002. Tal compatibilização deve considerar: material, tensões e deformações.

a) *Material*: no ANSYS10.0 o material é modelado como multilinear elástico com encruamento isotrópico. Para isto são ingressados pares de tensão-deformação real, calculados a partir da curva experimental do material obtida em teste uniaxial. O software calcula o módulo de elasticidade do material com o primeiro par da curva. A partir desse par, as tensões-deformações seguem a curva fornecida pelo analista. O critério de escoamento usado é o de Von Mises, ocorrendo escoamento quando a tensão de Von Mises superar o limite elástico do material. O encruamento isotrópico foi escolhido, especificando que o limite de escoamento e em compressão são iguais, e desconsiderando o efeito Bauschinger.

O VIDA2002 considera o modelo Ramberg-Osgood apresentado no Apêndice C, equação C.1, para modelar o material. O modelo Ramberg-Osgood considera que o material apresenta comportamento elasto-plástico, sendo a região elástica modelada por uma linha reta e a plástica por uma parábola. A maioria dos materiais testados uniaxialmente obedece a este modelo. Para a curva monotônica, usa-se a equação (5.2) e para a curva cíclica (5.3).

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^h \quad \text{eq. (6.3)}$$

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H_c} \right)^{hc} \quad \text{eq. (6.4)}$$

Os parâmetros H e h são obtidos num teste de tração uniaxial e H_c e h_c de um teste sob carregamento cíclico. Quando desconhecidos tais parâmetros, como ocorre nesta avaliação, estes podem ser calculados a partir das propriedades mecânicas do material ou usando a estimativa das medianas.

Para garantir que o material modelado pelo ANSYS10.0 fosse igual ao material usado pelo VIDA2002, efetuaram-se alterações nos parâmetros h_c e H_c até se obter a melhor aproximação das duas curvas, ver Figura 5.19. O amolecimento do material observado na curva cíclica é comumente observado em aços de baixo carbono usados para a fabricação dos tubos.

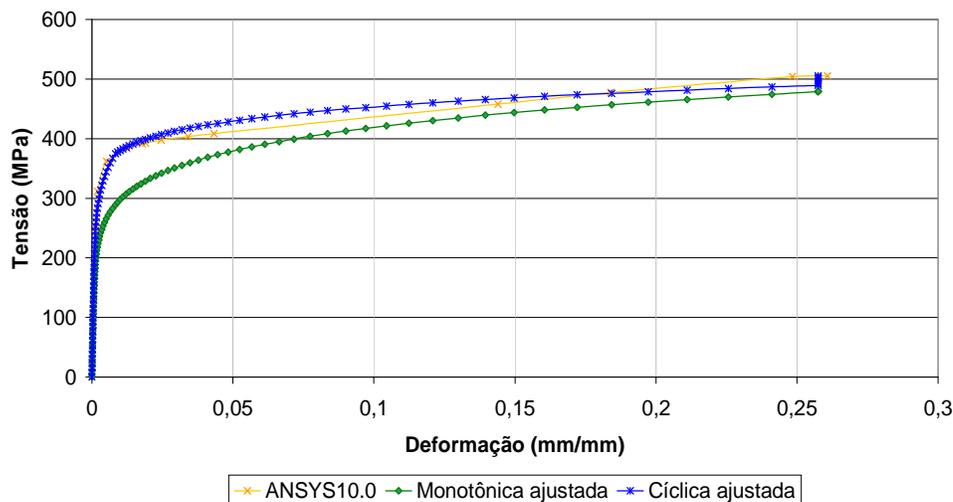


Figura 5.19 - Melhor ajuste do modelo Ramberg-Osgood à curva multilinear do material dos espécimes avaliados.

b) Tensões / deformações: uma diferença no cálculo das tensões e deformações do ANSYS 10.0 e do VIDA 2002, é que no primeiro caso usa-se um coeficiente de Poisson igual a 0,3 no regime elástico e 0,5 no regime elasto-plástico, já o VIDA2002 utiliza sempre 0,3. As deformações devem ser fornecidas em $\mu\epsilon$, 10^{-6} mm/mm. Tanto umas como as outras podem ser fornecidas como picos/vales ou como valores médios e alternados.

As deformações foram ingressadas no VIDA2002 na forma de picos e vales, seguindo o histórico apresentado no Apêndice G.

O fator de concentração de tensão já está implícito nas tensões e deformações.

5.2.2.

Detalhes do Método SN Implementado

Os parâmetros do material utilizados para a avaliação de fadiga são detalhados na Tabela 5.4. As propriedades mecânicas do material fornecidas ao software foram apresentadas na Tabela 3.3. Quando desconhecido algum parâmetro, este foi calculado usando as estimativas das medianas ou mediante relações com as propriedades mecânicas conhecidas.

Tabela 5.4 – Parâmetros do material usados na avaliação de vida a fadiga

Propriedade	Símbolo VIDA2002	Valor	Unidade	Procedência	
				Fornecida	Estimada
Módulo de elasticidade	E	202	GPa	X	
Resistência última à tração	Su	399	MPa	X	
Limite de escoamento	Sy	375	MPa	X	
Limite de escoamento cíclico	Sy'	289	MPa		X
Tensão real na ruptura	σ_f'	505,55	MPa	X	
Deformação na ruptura	ϵ_f	0,26	--	X	
Redução de área	R.A.	22,89	%		X
Alongamento	--	32	%	X	
Coefficiente de encruamento cíclico	Hc	580	MPa		X
Expoente de encruamento cíclico	hc	0,145	--		X
Limite de vida a fadiga N=1E6	Sf'	220	MPa		X
Expoente da curva SN	b	2,84			X
Expoente da curva SN	c	1,1E10			X
Parâmetro curva EN	σ_f'	599	MPa		X
Parâmetro curva EN	ϵ_f'	0,45			X
Parâmetro curva EN	b	-0,09			X
Parâmetro curva EN	c	-0,59			X

Nota: A curva SN usada pelo VIDA2002 é $N * (S_f)^B = C$

O método SN usado é o método tradicional apresentado na equação (2.17), incorporando um fator $f = 0,76$. Os valores dos fatores de redução, k_a e k_b na resistência à fadiga, calculados pelas equações (2.18) e (2.19) variam segundo a referência do autor. Os fatores usados neste cálculo são os recomendados por [50]. Outros valores desses fatores são apresentados em edições anteriores dessa referência, sendo sempre menores aos usados neste trabalho. Estes fatores também são incorporados à curva elástica do método eN .

Os fatores de acabamento superficial e de carregamento usados na redução da resistência do limite de fadiga são:

- Fator de acabamento superficial: laminado a frio, $k_a = 0,92$;
- Fator de carregamento: tensões de flexão na região danificada, $k_b = 1,16$.

O número de ciclos usado na avaliação foi selecionado considerando duas situações [38]:

- Situação 1 ($n_1 = 120$ ciclos): uma linha de gás experimenta um ciclo completo até a máxima pressão de operação por mês. Se considerado o tempo de 10 anos, ter-se-ia um total de 120 ciclos;
- Situação 2 ($n_2 = 2000$): uma linha de transporte de óleo é projetada para suportar 2000 ciclos completos de pressão até a máxima pressão de operação em 10 anos.

Os casos avaliados pelo método SN são resumidos na Tabela 5.5. A nomenclatura usada é H_i -YYYY- n_j , onde:

- H_i : Hipótese de carregamento, sendo $H_1 = 1, 10,5$ MPa, $H_2 = 15,6$ MPa e $H_3 = 17,3$ MPa;
- YYYY: Número de nó analisado, podendo ser 5285, 5269 o 5266;
- n_j : número de ciclos aplicados, $n_1 = 120$ ciclos e $n_2 = 2000$ ciclos.

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

Caso	S_{max}	S_{min}	S_m	S_a	n
H1-5285-n1	468,01	-116,61	175,7	292,31	120
H1-5285-n2	468,01	-116,61	175,7	292,31	2000
H1-5269-n1	417,1	-420,92	-1,91	419,01	120
H1-5269-n2	417,1	-420,92	-1,91	419,01	2000
H1-5266-n1	377,24	-454,71	-38,735	415,975	120
H1-5266-n2	377,24	-454,71	-38,735	415,975	2000
H2-5285-n1	472,45	-126,3	173,075	299,375	120
H2-5285-n2	472,45	-126,3	173,075	299,375	2000
H2-5269-n1	426,57	-422,98	1,795	424,775	120
H2-5269-n2	426,57	-422,98	1,795	424,775	2000
H2-5266-n1	319,64	-457,59	-68,975	388,615	120
H2-5266-n2	319,64	-457,59	-68,975	388,615	2000
H3-5285-n1	474,22	-115,57	179,325	294,895	120
H3-5285-n2	474,22	-115,57	179,325	294,895	2000
H3-5269-n1	428,67	-379,98	24,345	404,325	120
H3-5269-n2	428,67	-379,98	24,345	404,325	2000
H3-5266-n1	219,3	-458,94	-119,82	339,12	120
H3-5266-n2	219,3	-458,94	-119,82	339,12	2000

5.2.3.

Resultados da Avaliação de Fadiga das Tensões de Von Mises

A Tabela 5.6 resume os resultados da aplicação do método SN usando três abordagens. A primeira abordagem desconsidera o efeito da tensão média, a segunda considera a tensão média mediante o modelo de Goodman, equação (2.30) e a terceira mediante o modelo de Gerber, equação (2.31). O valor da resistência última à tração S_u usada no cálculo das tensões alternadas equivalentes é igual a 505MPa. Nos casos onde a tensão média for negativa, esta não é considerada, sendo a tensão equivalente igual à tensão alternada da Tabela 5.5

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

Caso	Sem tensão média		Goodman ^{(1), (2)}			Gerber ^{(1), (2)}		
	Nf	D	Saeq	Nf	D	Saeq	Nf	D
H1-5285-n1	1110	0,11	448,27	329	0,37	332,57	769	0,16
H1-5285-n2	1110	>1	448,27	329	>1	332,57	769	>1
H1-5269-n1	398	0,30	419,01	398	0,30	419,01	398	0,30
H1-5269-n2	398	>1	419,01	398	>1	419,01	398	>1
H1-5266-n1	407	0,30	415,98	407	0,30	415,98	407	0,30
H1-5266-n2	407	>1	415,98	407	>1	415,98	407	>1
H2-5285-n1	1037	0,12	455,48	314	0,38	339,22	727	0,17
H2-5285-n2	1037	>1	455,48	314	>1	339,22	727	>1
H2-5269-n1	383	0,31	426,29	379	0,32	424,78	383	0,31
H2-5269-n2	383	>1	426,29	379	>1	424,78	383	>1
H2-5266-n1	494	0,24	388,62	494	0,24	388,62	494	0,24
H2-5266-n2	494	>1	388,62	494	>1	388,62	494	>1
H3-5285-n1	1083	0,11	457,27	311	0,39	337,45	738	0,16
H3-5285-n2	1083	>1	457,27	311	>1	337,45	738	>1
H3-5269-n1	441	0,27	424,80	383	0,31	405,27	438	0,27
H3-5269-n2	441	>1	424,80	383	>1	405,27	438	>1
H3-5266-n1	727	0,16	339,12	727	0,16	339,12	727	0,16
H3-5266-n2	727	>1	339,12	727	>1	339,12	727	>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.

Agrupando os resultados por nós, para facilitar sua visualização tem-se a Tabela 5.7.

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

Caso	Pressão (MPa)	Nf sem tensão média	Nf Goodman	Nf Gerber
H1-5285-n1 e n2	10,5	1110	329	769
H2-5285-n1 e n2	15,6	1037	314	727
H3-5285-n1 e n2	17,3	1083	311	738
H1-5269-n1 e n2	10,5	398	398	398
H2-5269-n1 e n2	15,6	383	379	383
H3-5269-n1 e n2	17,3	441	383	438
H1-5266-n1 e n2	10,5	407	407	407
H2-5266-n1 e n2	15,6	494	494	494
H3-5266-n1 e n2	17,3	727	727	727

Analisando as Tabelas 5.6 e 5.7, são destacados os aspectos a seguir:

- A avaliação da vida à fadiga com consideração da tensão média reduz ou no mínimo mantém as vidas determinadas pelo método convencional. O modelo de Goodman forneceu resultados mais conservadores que o modelo de Gerber.
- A avaliação de fadiga sem consideração do efeito da tensão média indicou como ponto crítico para iniciação de trincas por fadiga o nó 5269 na parede externa.
- Se considerado o efeito da tensão média, mediante Goodman o local de iniciação de trincas seria o nó 5285 externo, seguido pelo 5269 externo. Usando Gerber, o nó 5269 é o ponto crítico para iniciação de trincas.
- À pressão de 10,5MPa, os nós 5269 e 5266 apresentam a mesma vida de iniciação. Isto significa que a trinca poderia iniciar em qualquer um desses locais. Este comportamento muda quando a pressão aumenta e o nó 5266 interno perde severidade, por conta do incremento na tensão média compressiva.
- O maior número de ciclos obtido foi 1110, no nó 5285 quando desconsiderada a tensão média e o menor valor foi 311 no mesmo local, quando usado o modelo de Goodman.
- O nó 5269 apresentou o comportamento mais estável se comparados todos os casos avaliados, a maior vida à fadiga obtida nesse local foi de 438 ciclos (17,3MPa e usando Gerber) e a menor foi 379 ciclos (15,6MPa e usando Goodman).
- Quando avaliada a condição de linha de transporte de gás ($n_1 = 120$ ciclos), todos os casos apresentaram danos menores que 0,38, o que representa uma redução máxima de 40% da vida para a qual foi projetada a linha. Já na condição de linhas de transporte de óleo ($n = 2000$ ciclos), todos os casos avaliados apresentaram danos maiores que 1.

Os resultados da aplicação do método SN nas tensões circunferenciais são resumidos na Tabela 5.8, maiores detalhes são apresentados no Apêndice G.

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

Caso	Pressão (MPa)	Nf sem tensão média	Nf Goodman	Nf Gerber
H1-5285-n1* e n2*	10,5	4143	1935	3526
H2-5285-n1* e n2*	15,6	2530	1156	2135
H3-5285-n1* e n2*	17,3	2127	861	1709
H1-5269-n1* e n2*	10,5	314	286	313
H2-5269-n1* e n2*	15,6	310	289	310
H3-5269-n1* e n2*	17,3	358	289	353
H1-5266-n1* e n2*	10,5	286	286	286
H2-5266-n1* e n2*	15,6	417	417	417
H3-5266-n1* e n2*	17,3	900	900	900

Comparando as Tabelas 5.7 e 5.8, tem-se que as vidas de fadiga obtidas para o método SN usando tensões circunferenciais, são menos conservadoras no nó 5285, mais conservadoras no nó 5269 e similares no nó 5266. Se observadas as Figuras 5.13 a 5.15, para a moosa avaliada, as tensões longitudinais nos locais selecionados são significativas, especialmente no nó 5285, onde as tensões longitudinais são maiores que as tensões circunferenciais. Assim, os resultados da avaliação de fadiga, para o tipo de moosa avaliado, usando as tensões circunferenciais somente podem ser usados para fins comparativos e não de modo quantitativo.

Os resultados da aplicação do método ϵN nas deformações circunferenciais foram apresentados no Apêndice H e são resumidos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resumo da avaliação complementar pelo método ϵN

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
H2-5285-n1*	5,24E-2	2,29E+03	4,87E-2	2,46E+03	1,09E-1	1,10E+03
H3-5285-n1*	8,95E-2	2,23E+04	1,02E-1	1,96E+04	1,89E-1	1,06E+04
H1-5266-n1*	9,44E-3	1,27E+04	8,32E-2	1,44E+03	1,82E-2	6,59E+03
H2-5266-n1*	1,24E-2	9,68E+03	8,40E-2	1,43E+03	2,34E-2	5,13E+03
H3-5266-n1*	1,92E-2	1,04E+05	8,54E-2	2,34E+04	4,67E-2	4,28E+04

As vidas calculadas pelo método ϵN , Apêndice H, foram menores do que as vidas resultantes do método SN. Entretanto, os resultados do método ϵN devem ser analisados cuidadosamente e usados de modo qualitativo para efeitos comparativos.