

## 5

### RESULTADOS

#### 5.1

##### MOMENTO

No Gráfico 8, pode-se observar os pontos de Momento X Curvatura dos Casos I a VI estudados. Os valores de momento máximo encontrados são crescentes com a diminuição da relação  $D/t$ . Em cada um dos casos, com exceção ao Caso I, observa-se a existência de um ponto de máximo momento a partir do qual este começa a decair. O ângulo correspondente ao momento máximo varia para cada caso, mas é decrescente com o aumento da relação  $D/t$ , ou seja, quanto maior a relação  $D/t$  menor o ângulo máximo a ser obtido sem que haja perda de resistência do material. Atribui-se esta redução na capacidade de momento a alterações na seção transversal do tubo, provenientes da localização e intensificação da flambagem, conforme já discutido.

O Caso I não teve seu máximo atingido o que confirma o não desenvolvimento do enrugamento para este caso. A falha ocorrerá provavelmente por colapso localizado do tubo.

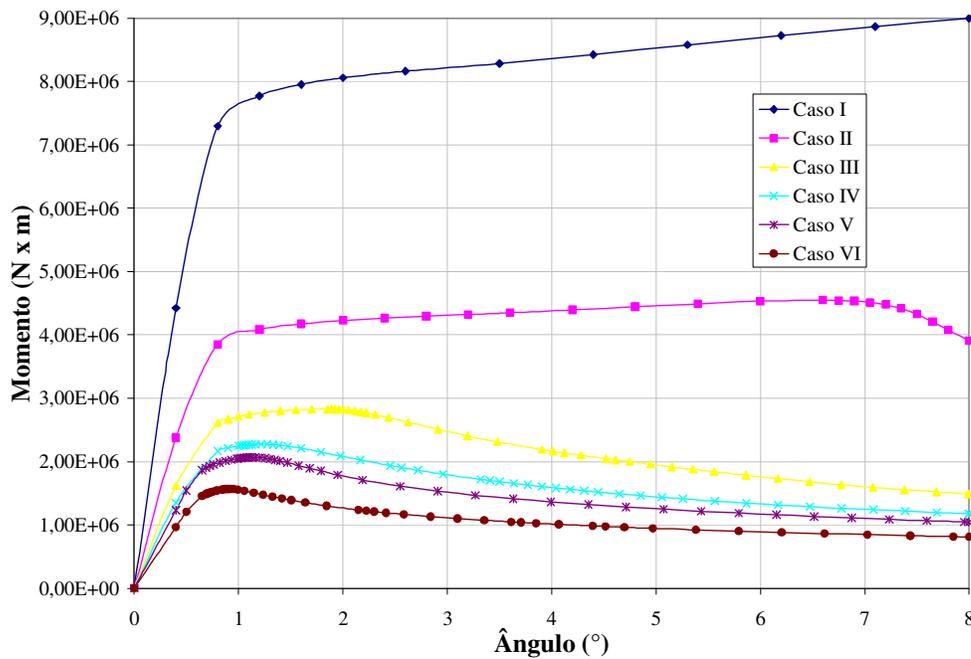


Gráfico 8 – Resultado do Ângulo (°) X Momento (N x m)

O Gráfico 9 mostra os resultados exibidos anteriormente adimensionalizados pelas eq. (44) e (45). Neste gráfico, pode-se observar claramente o pico do momento e o decréscimo decorrente da suavização do material, ou seja crescimento do enrugamento formado.

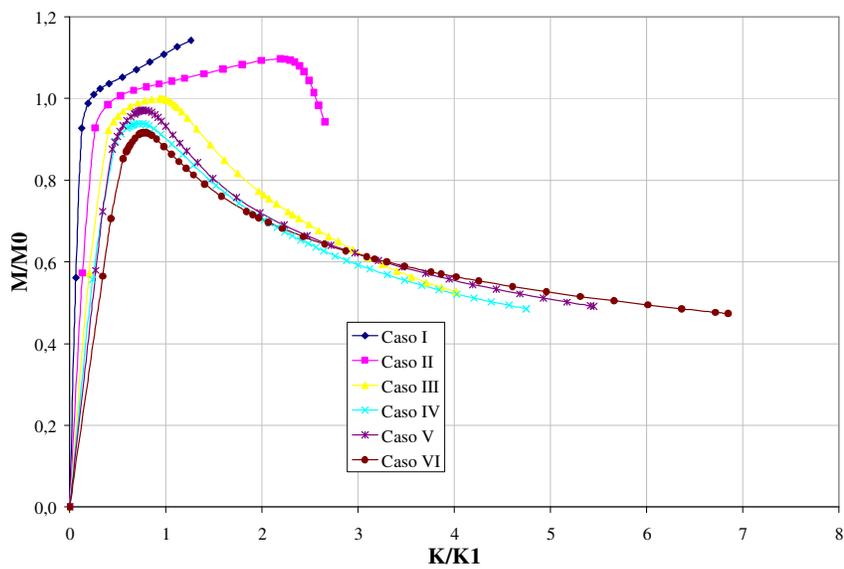


Gráfico 9 – Resultado adimensional para Curvatura X Momento

No Gráfico 10 são mostrados também os valores máximos de momento para cada caso e os valores de momento encontrados na literatura para colapso do tubo proposto por Superb [42] e pela DNV [45]. Observa-se por este gráfico que o momento máximo, por FEM, atingido pelos Casos I a III e V é superior àquele considerado como o valor crítico para iniciação do colapso da estrutura. Já os valores para os Casos IV e VI são inferiores aos propostos por Superb [42].

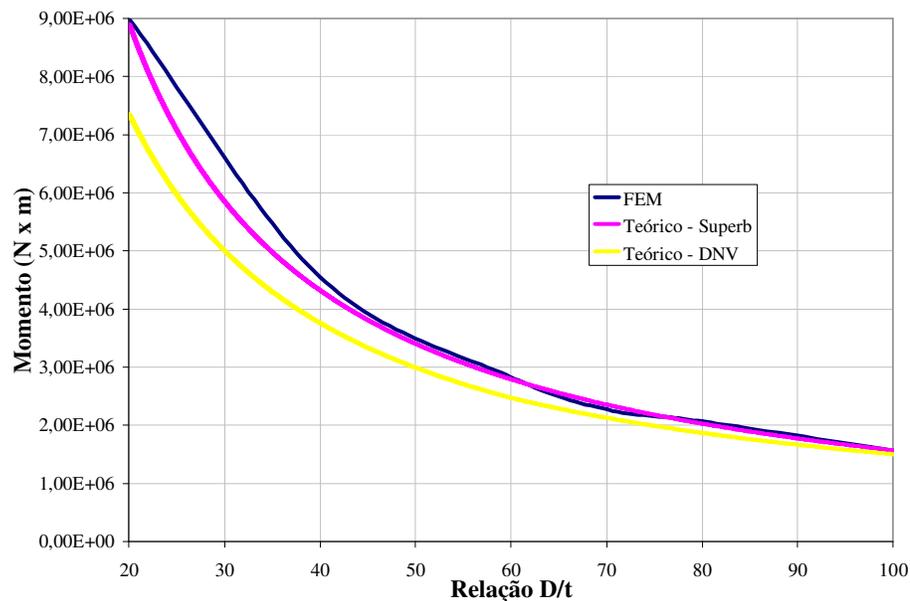


Gráfico 10 – Para Colapso: Momento X Relação D/t

A Tabela 13 apresenta os valores de momento máximo encontrados por FEM e os valores encontrados por Superb [42], além do percentual da diferença entre eles. Charnoux [38] em seu trabalho, também utilizando FEM, encontrou valores de diferença similares aos aqui apresentados. A tabela também apresenta, para a DNV [45], o valor de máximo momento para cada relação D/t e o percentual da diferença em relação a FEM, os valores aqui encontrados divergem com um percentual de erro maior. Esta diferença provavelmente se deve a utilização de fatores de segurança presentes às equações, como fator de condição de carregamento ( $\gamma_c$ ) e fator de classe de segurança ( $\gamma_{sc}$ ). Para efeito de comparação, foi introduzida uma coluna com o percentual de diferença do momento por FEM em relação ao momento calculado pela DNV sem o fator de

condição de carregamento ( $\gamma_c$ ) e o fator de classe de segurança ( $\gamma_{sc}$ ). Observa-se que o percentual da diferença encontrado é menor, assim o valor do momento se aproxima do valor obtido por FEM.

Tabela 13 – Momento máximo por FEM e da literatura, unidades em N x m

Caso	FEM	Superb [42]	% Diferença	DNV	% Diferença	DNV %
				OS-F101 [45]		Diferença (1)
I	$9,00 \times 10^6$	$8,90 \times 10^6$	1,1	$7,35 \times 10^6$	22,4	8,4
II	$4,55 \times 10^6$	$4,32 \times 10^6$	5,3	$3,76 \times 10^6$	21,0	4,3
III	$2,83 \times 10^6$	$2,79 \times 10^6$	1,4	$2,47 \times 10^6$	14,5	2,8
IV	$2,27 \times 10^6$	$2,36 \times 10^6$	-3,5	$2,13 \times 10^6$	6,8	2,4
V	$2,07 \times 10^6$	$2,03 \times 10^6$	1,85	$1,87 \times 10^6$	10,5	2,1
VI	$1,57 \times 10^6$	$1,57 \times 10^6$	-0,2	$1,50 \times 10^6$	4,7	1,7

Nota: (1) Este resultado refere-se aos valores encontrados por FEM em relação aos calculados pela DNV OS-F101 sem o fator de classe de segurança e de resistência do material (ver seção 2.3.4).

O Gráfico 11 apresenta o máximo momento atingido para cada relação D/t. Observa-se claramente a redução do máximo momento, que nada mais é que a seção resistente do tubo, com o aumento da relação D/t, que neste caso resume-se somente à redução da espessura, já que todos os casos possuem o mesmo diâmetro externo. Esta redução é vista mais claramente para os casos de menor D/t, a medida que a relação vai aumentando, e vai ficando menos acentuada à medida que a relação D/t aumenta. Os casos de alta relação D/t apresentam reduzida resistência, em comparação com os casos de menor relação D/t. Assim, a presença de qualquer elemento que diminua a estabilidade da estrutura terá grande importância para tubos com alta relação D/t, por exemplo, uma ovalização preexistente da fabricação do tubo.

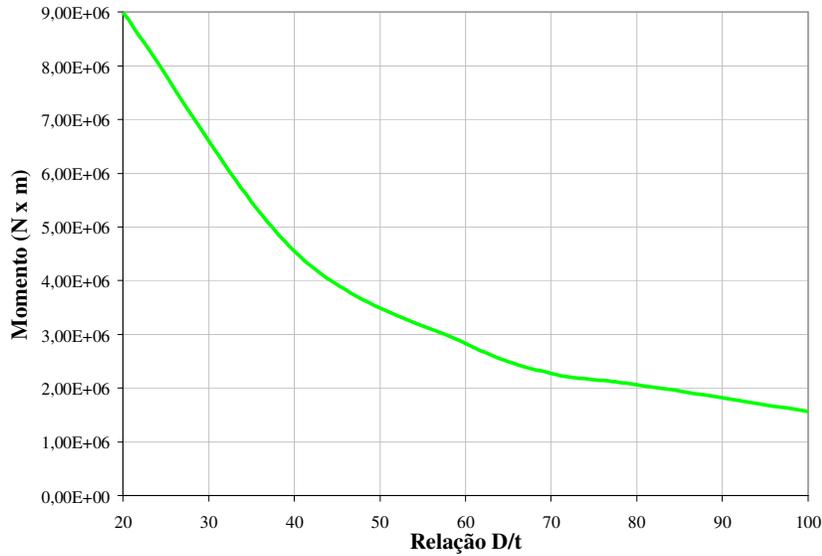


Gráfico 11 – Relação D/t X máximo momento

O ângulo por dois diâmetros de tubo, comprimento utilizado nos modelos deste trabalho, correspondente ao momento máximo para cada relação D/t estudada é mostrado no Gráfico 12. A formação do enrugamento se observa pouco antes do momento máximo ser atingido em cada um dos casos. Nota-se uma queda nos valores de ângulo máximo que pode ser obtido com o curvamento a frio à medida que a espessura é diminuída. Quanto maior a relação D/t, menor é o ângulo que pode ser obtido sem que haja o colapso do tubo.

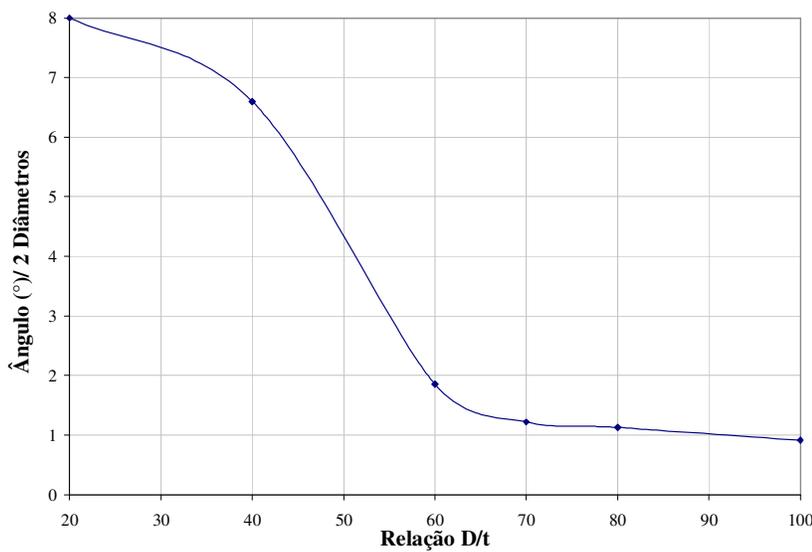


Gráfico 12 – Relação D/t X ângulo de máximo momento

Na prática, o ângulo máximo dado por golpe no tubo, após efeito mola, não ultrapassa 1°. Uma das limitações atribuídas a este limite é o aparecimento do enrugamento. A distância entre golpes costuma ser de 300 a 500 mm. A norma B31.8 [54] limita o ângulo máximo e o raio de curvatura mínimo, conforme já apresentado na seção 2.4.9.3, as demais limitam o raio de curvatura mínimo que o tubo deve ter.

## 5.2

### INICIAÇÃO DO ENRUGAMENTO

Como resultado da iniciação do enrugamento, está informado na Tabela 14 o desenvolvimento ou não do enrugamento e a quantidade de enrugamentos principais formados. Nos casos indicados com presença de enrugamento há a formação de enrugamentos secundários de pequenas dimensões que foram desprezados nas análises. Também é apresentado o ângulo de iniciação do enrugamento, que será discutido ainda nesta seção. Apenas o Caso I não teve a formação do enrugamento.

Tabela 14 – Formação do enrugamento

Caso	Formação do Enrugamento	Quantidade (RN)	Ângulo de Iniciação do Enrugamento	Raio de Curvatura de Iniciação do Enrugamento
I	Não	0	-	-
II	Sim	1	1,20	95D
III	Sim	1	0,90	127D
IV	Sim	1	0,90	127D
V	Sim	1	0,82	140D
VI	Sim	1	0,79	145D

O Gráfico 13 mostra o ângulo final obtido após o enrugamento e também pode ser observado o retorno elástico do material. O ângulo final é composto por uma parcela elástica e uma parcela plástica. O ângulo obtido após a retirada do

carregamento (alívio) é correspondente à parcela plástica. O ângulo após o alívio é menor que o ângulo final após o curvamento devido ao efeito mola do tubo.

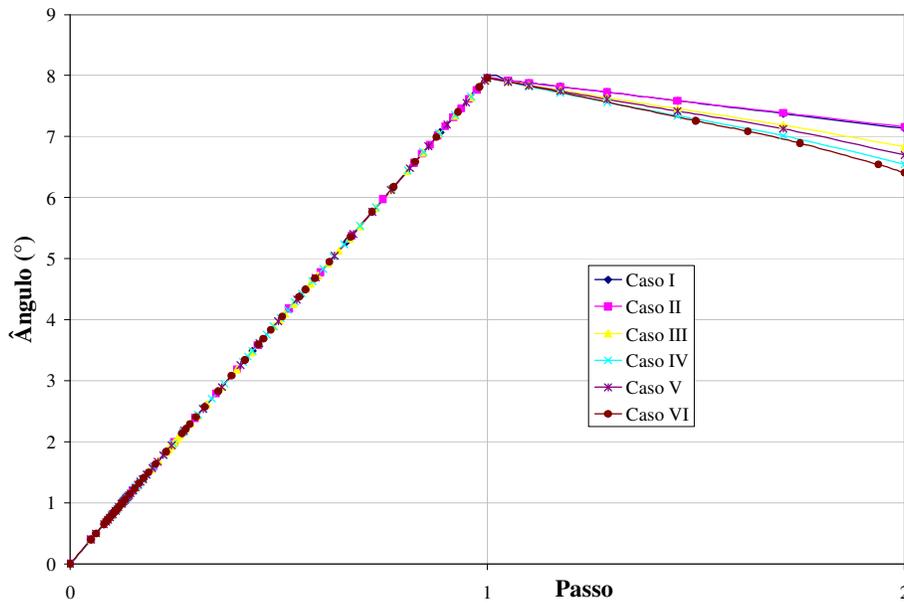


Gráfico 13 – Apresentação do ângulo de curvamento e final após efeito mola do tubo

O ângulo do efeito mola é maior para maiores relações  $D/t$  provavelmente devido a maior deformação localizada ocorrida nestes casos, localização e intensificação do enrugamento ocorrido.

Podem ser observados na Tabela 15 o ângulo de rotação final obtido e o ângulo após alívio (retorno da deformação elástica) assim como o ângulo do efeito mola.

Tabela 15 – Característica do ângulo das curvas, unidades em grau

Caso	Ângulo Final de Rotação	Raio de Curvatura	Ângulo Após Alívio	Raio de Curvatura Após Alívio	Ângulo Efeito Mola
I	7,96	14D	7,14	16D	0,82
II	7,96	14D	7,16	16D	0,80
III	7,96	14D	6,84	17D	1,12
IV	7,96	14D	6,55	17D	1,41
V	7,96	14D	6,70	14D	1,26
VI	7,96	14D	6,41	18D	1,55

A Figura 44 (a) mostra a geometria do enrugamento ao final do curvamento e a Figura 44 (b) após o alívio do carregamento para o Caso IV. Observa-se leve suavização na geometria do enrugamento após o alívio em relação à geometria após o curvamento.

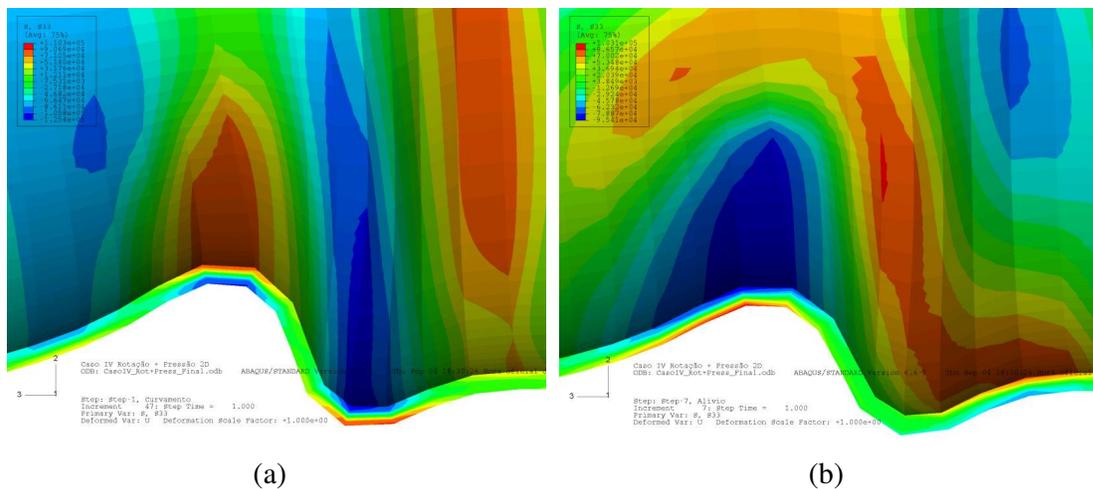


Figura 44 – Detalhe do enrugamento. (a) Enrugamento após curvamento, (b) enrugamento após alívio

Como resultado, foi obtido o modelo mostrado na Figura 45, onde a escala de cor mostra a variação da tensão longitudinal. Como pode ser observado pela Figura 45, ocorre a iniciação e propagação da ruga como consequência de uma flambagem localizada, proveniente do curvamento a frio do material. Nesta figura a aplicação da rotação se dá na face esquerda do tubo e a face da direita é a de

aplicação do engaste. Na primeira imagem, Figura 45 (a), o enrugamento ainda não pode ser percebido e o ângulo do curvamento é de  $0,80^\circ$ . Na figura (b) já é possível observar o enrugamento de forma bem suave, ele possui altura igual a 1,77 mm que corresponde a 17,4% da espessura e 0,25% do diâmetro do tubo, neste momento o ângulo do curvamento é de  $1,03^\circ$ . A figura (c) é o ponto de máximo momento (ângulo de  $1,22^\circ$ ), nela o enrugamento possui comprimento igual a 203,4 mm e altura igual a 5,3 mm que corresponde a 52% da espessura do tubo e 0,74% do diâmetro, ele requer no campo, atenção do inspetor para ser observado. Com o aumento do ângulo o enrugamento vai se tornando cada vez mais severo até adquirir as formas finais que serão analisadas na próxima seção, esta evolução pode ser vista na Figura 45 (a) a (f).

Após o ponto de momento máximo ocorre a propagação do enrugamento que se deve a formação de uma rótula plástica que irá concentrar toda a carga aplicada (momento) neste local. Estruturalmente o tubo já perdeu sua resistência e qualquer carga aplicada só intensifica a deformação já existente.

A Figura 46 mostra a evolução da formação do enrugamento para diferentes tempos durante a aplicação do momento. A escala de cores apresentada é para deformação plástica, os ângulos da Figura 46 (a) a (f) são correspondentes aos ângulos da Figura 45 (a) a (f) exibida anteriormente. A Figura 46 (d), (e) e (f) apresentam, respectivamente, ângulos de curvamento de  $1,79^\circ$ ,  $3,64^\circ$  e  $6,17^\circ$ . Nesta figura a aplicação da rotação se dá na face esquerda do tubo e a face da direita é a de aplicação do engaste.

Durante a formação do enrugamento, observa-se na Figura 46 (a) a (f), que inicialmente a deformação plástica para formação do enrugamento apresenta múltiplos pontos de iniciação. Conforme é aumentada a curvatura um destes pontos prevalece na formação do enrugamento e nos outros pontos diminui o crescimento da deformação, fazendo com que a deformação plástica restante se concentre em um único enrugamento formado.

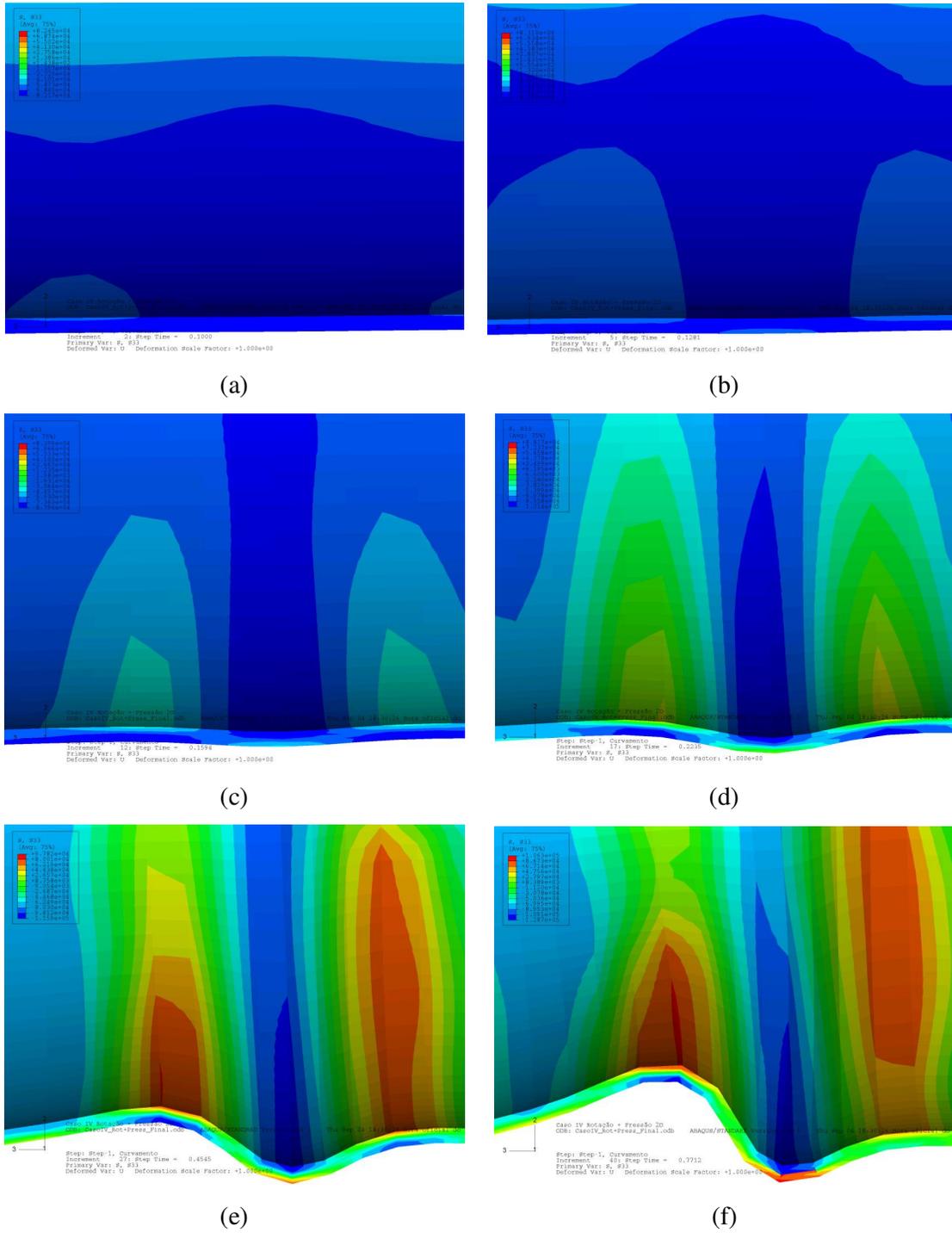


Figura 45 – Imagens de (a) a (f) mostrando a evolução da formação do enrugamento – Caso IV

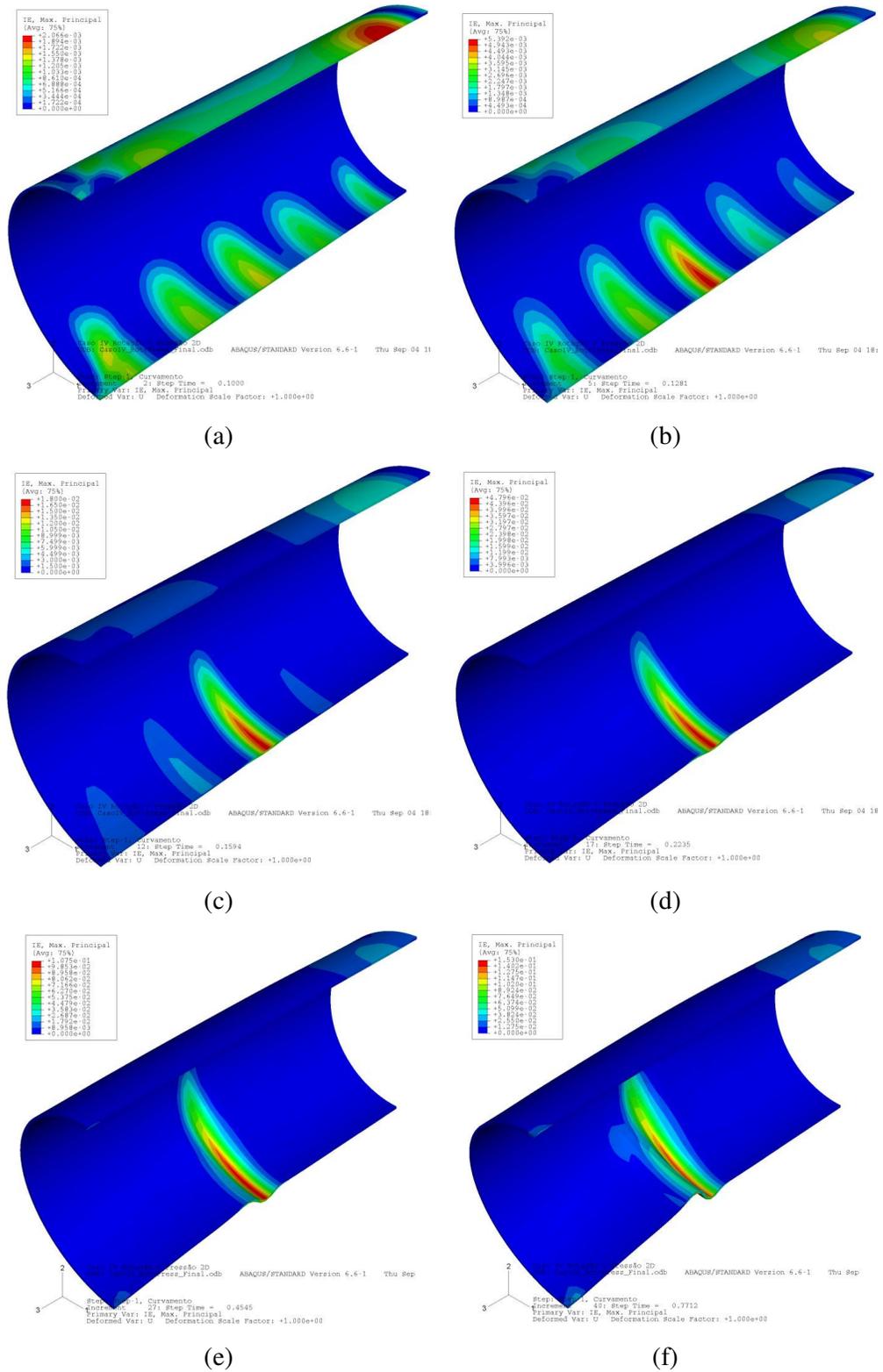
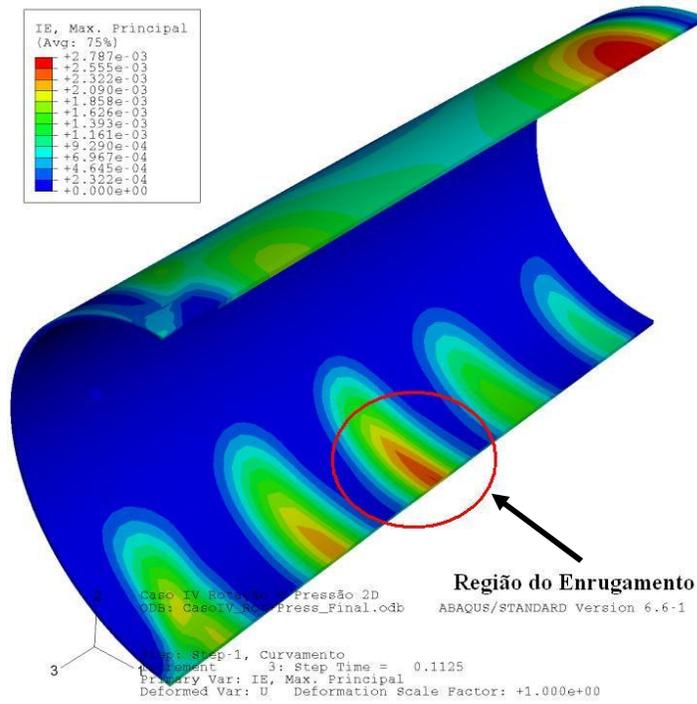


Figura 46 – Imagens de (a) a (f) mostrando a evolução da formação do enrugamento – Caso IV – Deformação

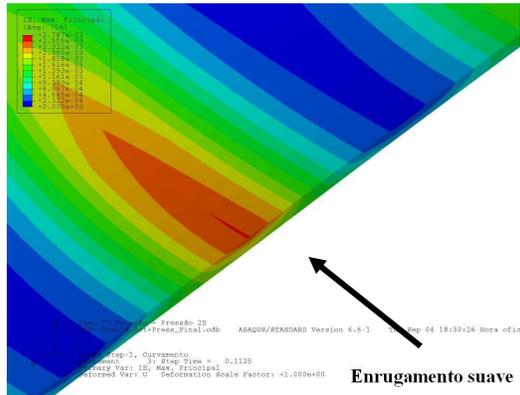
O enrugamento, que tem seu crescimento propagado, tem sua formação próximo à metade do comprimento do tubo. Sua formação é neste ponto provavelmente devido às condições de contorno utilizadas no modelo, que impedem a ovalização nas extremidades do tubo.

Foi caracterizado o ponto de iniciação do enrugamento quando este atingir altura (d) superior a 0,5 mm, devido a dificuldade de visualização e inspeção de enrugamentos inferiores a esta dimensão. Para o Caso IV, é o ponto correspondente a  $0,90^\circ$ , imediatamente após a imagem mostrada na Figura 45 (a), e está exibido na Figura 47 (a). O enrugamento apresentado é suave e de difícil visualização, na Figura 47 (b) é exibida uma aproximação da figura (a) para melhor observação do enrugamento formado. A Figura 47 (c) mostra a região do enrugamento com vista pelo corte de simetria longitudinal. Nesta figura a aplicação da rotação se dá na face esquerda do tubo e a face da direita é a de aplicação do engaste.

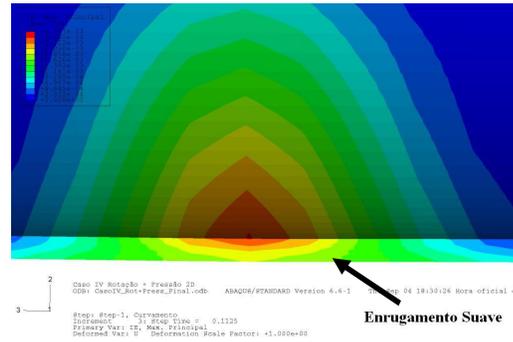
O Gráfico 12 serve como ponto de partida para limitação do ângulo máximo do curvamento sem que haja ocorrência do colapso plástico do material. Mas neste ponto existe a presença de enrugamento com altura (d) próxima a permitida pelos códigos que possuem critério de aceitação [53, 48]. Conforme já mencionado, o ponto de iniciação do enrugamento foi caracterizado quando este atinge altura superior a 0,5 mm. Deve-se lembrar que os valores aqui propostos são de difícil observação e inspeção. Incertezas de campo como: calibração da máquina de curvamento; experiência do operador; e simplificações do modelo, como não medição da ovalização, podem influenciar este valor. Por isso, os valores aqui propostos, na Tabela 8, servem como ponto de partida, mas deve-se estudar cada caso. Os valores propostos preservam a integridade do tubo não permitindo o colapso plástico.



(a)



(b)



(c)

Figura 47 – Início enrugamento. (a) Tubo, (b) detalhe para região do enrugamento, (c) detalhe do enrugamento suave visto de frente

Os ângulos propostos são após o efeito mola. Assim, a curvadeira deve prover ângulo superior aos aqui informados, para que após o alívio o tubo tenha ângulo semelhante ao proposto.

Tabela 16 – Valores ângulo máximo de curvamento (em graus), altura e comprimento do enrugamento no ponto de máximo momento.

Caso	Ângulo Momento Máximo	Ângulo Iniciação do Enrugamento	Altura (d) do enrugamento (mm)	Comprimento (mm)
I	8,00	-		
II	6,60	1,20	10,06	322,33
III	1,85	0,90	7,06	228,6
IV	1,22	0,90	4,64	203,7
V	1,13	0,82	3,35	178,8
VI	0,91	0,79	2,63	153,6

### 5.3

#### FALHA ESTÁTICA

O modelo não apresentou rompimento por carga estática em nenhum dos casos em estudo. Foi aplicado um carregamento de pressão com tensão circunferencial nominal correspondente ao limite de escoamento do material.

Observa-se a elevação da tensão de von Mises na região do enrugamento mas para a pressão aplicada correspondente a 80% de SMYS, a tensão não atinge o limite de resistência do material encruado, como pode ser observado pela Tabela 17. Para a pressão correspondente a 100% de SMYS observa-se deformação plástica devido a ação da pressão. Para o Caso I, como não há enrugamento a tensão máxima está ao longo do tubo e não localizada na região do enrugamento como nos demais casos.

As tensões apresentadas são as máximas encontradas ao longo do tubo. Para os Casos II a VI o enrugamento apresenta as máximas tensões. Para o Caso I a máxima tensão está em algum ponto do tubo, próximo da região onde se formou a ruga nos demais casos.

Tabela 17 – Tensões de von Mises máxima encontrada em cada caso

Caso	Tensão Máxima de von Mises (MPa)		
	Passo 3	Passo 4/6	Passo 5/7
I	517	455	440
II	653	527	587
III	653	618	621
IV	653	652	626
V	653	603	631
VI	653	641	642

A Tabela 18 mostra os resultados geométricos obtidos por FEM após alívio do processo de curvamento. As relações entre estas geometrias e as geometrias originais da tubulação ( $d/D$ ,  $L/d$ ,  $d/t$ ) também são apresentadas nesta tabela.

Tabela 18 – Resultados Geométricos do Enrugamento

Caso	$a$ (°)	$d$ (mm)	$L$ (mm)	$d/D$	$L/d$	$d/t$
I	-	-	-	-	-	-
II	90	7,98	235,97	0,011	29,58	0,4
III	160	34,80	129,03	0,049	3,71	2,9
IV	220	46,48	121,41	0,065	2,61	4,6
V	220	41,40	123,57	0,058	2,98	4,7
VI	250	39,37	108,46	0,055	2,75	5,5

Na Tabela 18  $D = 28''$ ,  $t$  varia conforme o caso e  $C = \pi \times D = \pi \times 28'' = 2234,3mm$ .

Pode-se observar que com o aumento da relação  $D/t$  o comprimento ( $L$ ) do enrugamento foi diminuindo e sua extensão ao longo da circunferência aumentando ( $a$ ), ou seja, quanto menor a espessura, maior a deformação circunferencial apresentada pelo tubo e o enrugamento vai se concentrando, diminuindo seu comprimento de onda conforme ele se estende circunferencialmente. A altura final do enrugamento teve magnitudes

aproximadamente iguais para os Casos III a VI, mas com extensões circunferenciais crescentes.

A relação  $d/D$ , altura do enrugamento com o diâmetro externo do tubo, apresentou resultados que variam de 1,1% a 6,5%. Observa-se também a aderência dos valores com relação a pequena variação, nos Casos III a VI, para a relação  $L/d$ , mostrando que a geometria do enrugamento final (altura e comprimento) pouco varia com a mudança da espessura.

A Tabela 19 mostra as relações geométricas  $a/C_{FEM}$  obtida com resultados de FEM,  $a/C_R$  calculado a partir da eq. (42) que utiliza a relação  $d/t$ . Também é apresentado o percentual da diferença entre os dois resultados ( $a/C_{FEM}$  e  $a/C_R$ ).

Tabela 19 – Relação  $a/C$

Caso	$a/C_{FEM}$	$a/C_R$	% Diferença
I	-	-	-
II	0,25	0,19	29,9
III	0,44	0,46	-3,7
IV	0,61	0,64	-4,2
V	0,61	0,65	-5,5
VI	0,69	0,74	-6,4

A grande diferença da relação  $a/C_{FEM}$  e a proposta por Rosenfeld *et al.* deve-se, provavelmente, a diferente metodologia empregada. Roselfeld *et al.* utilizou um elemento elástico em suas análises e magnitudes de enrugamento bem menores que os aqui propostos.

## 5.4

### ANÁLISE DE FADIGA

Uma avaliação da vida em fadiga foi realizada utilizando os métodos anteriormente descritos. A análise faz uso de uma aproximação uniaxial apesar do estudo ser um caso de fadiga multiaxial. Os trabalhos encontrados na literatura também utilizam esta simplificação [21, 22, 62].

Inicialmente foi feito um levantamento das regiões e nós, internos e externos que possuem maiores variações de tensões circunferenciais e longitudinais separadamente. As análises, foram então, separadas para valores de tensões circunferenciais e tensões longitudinais, pois suas influências e regiões de ação são completamente diferentes.

Numa sequência de gráficos (14 a 17), são apresentadas as tensões e deformações para o nó crítico (aquele que possui maior variação entre a máxima e a mínima tensão) do Caso IV. Os gráficos para os demais casos podem ser vistos no Apêndice II.

O Gráfico 14 mostra a variação nas tensões ao longo dos passos para o nó 104, este nó possui as maiores variações de tensão circunferencial do modelo. Ele é localizado na fibra externa do lado compressivo do curvamento e está na região D do enrugamento. Com a aplicação e retirada da pressão ocorrem ciclos estáveis de variação de tensão circunferencial neste nó.

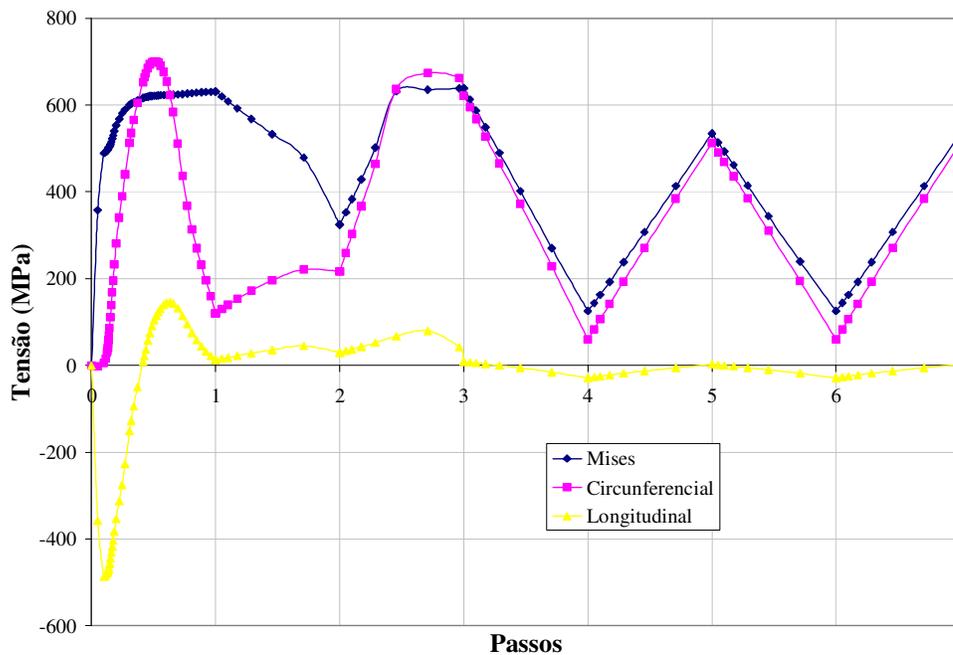


Gráfico 14 – Tensões para o nó externo crítico na tensão circunferencial para o Caso IV

O Gráfico 15 mostra a variação nas tensões ao longo dos passos para o nó 2969, este nó possui a maior variação de tensão longitudinal do modelo. Ele é localizado na fibra interna do lado compressivo do curvamento e está na região C

do enrugamento, mas não no ponto de maior altura (d) do enrugamento. Após o alívio as tensões residuais são trativas. Com a aplicação e retirada da pressão ocorre um ciclo de máxima variação de tensão longitudinal neste nó.

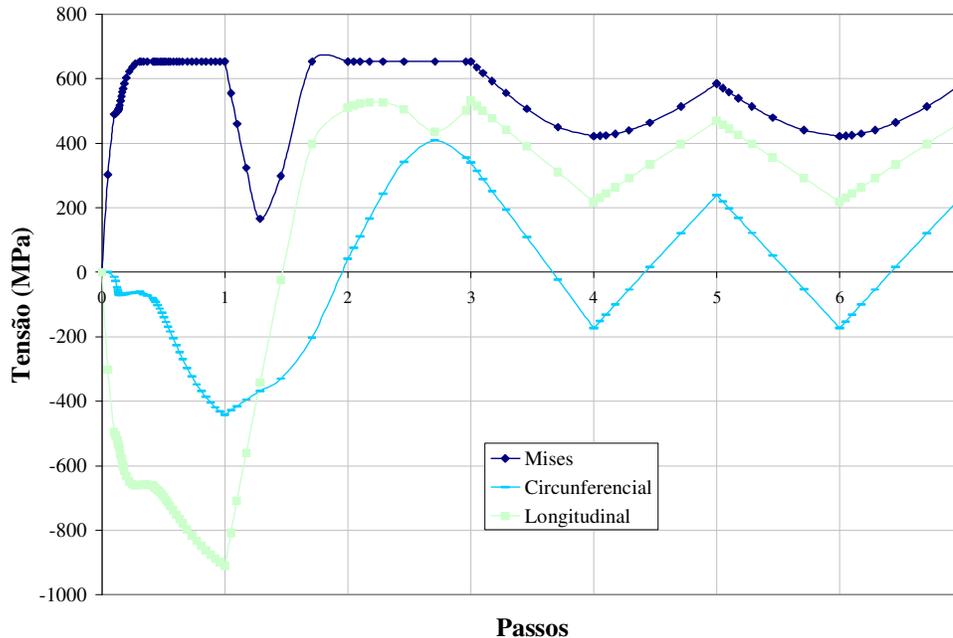


Gráfico 15 – Tensões para o nó interno crítico na tensão longitudinal para o Caso IV

Observa-se na tensão de von Mises um comportamento diferente dos demais, onde não há a formação de ‘pontas’ na tensão mínima. Isto se deve à parcela de compressão existente em alguma das tensões principais, neste caso em especial, a tensão longitudinal. Este fenômeno irá se repetir em vários casos, dada a particularidade de se estar trabalhando com tensões compressivas e trativas. Devido a esta situação, a tensão média de von Mises pode não ser a verdadeira. Existem técnicas para se trabalhar com tensões de von Mises com parcelas compressivas, mas optou-se por trabalhar com as tensões longitudinais e circunferenciais individualmente.

O Gráfico 16 exhibe as tensões-deformações para as tensões circunferenciais no nó externo mais críticos, número 104. Nele são exibidos com coloração diferente as tensões-deformações a cada passo, para que se possa traçar uma correlação entre a tensão-deformação, o passo e o tipo de carregamento ao qual o tubo estava sujeito.

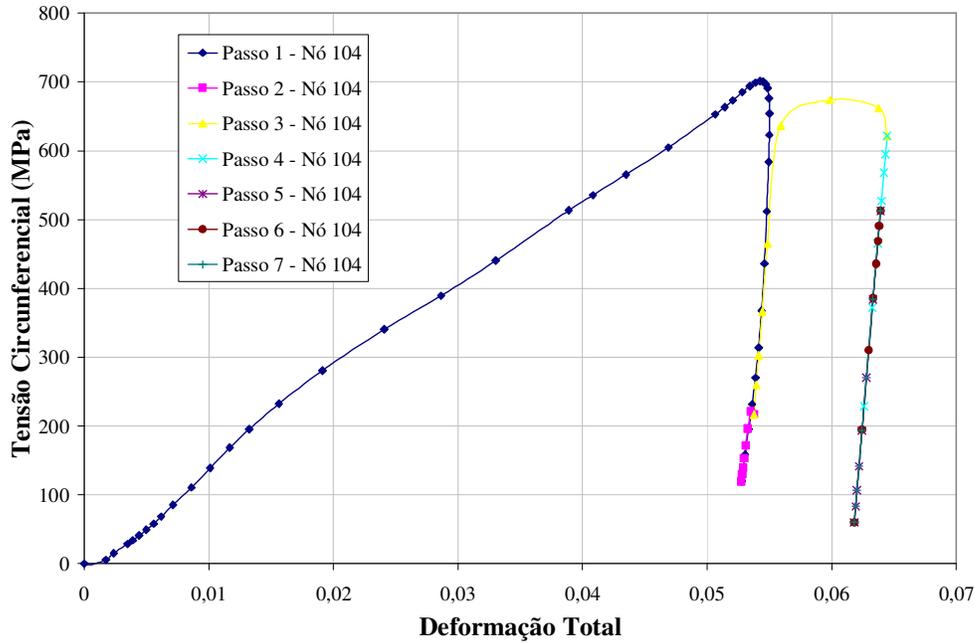


Gráfico 16 – Tensões críticas Caso IV – externo – Nó 104 tensões-deformações circunferenciais

E Gráfico 17 o exibe também as tensões-deformações para as tensões longitudinais, mas no nós interno mais crítico, de número 2969.

No modelo optou-se pela repetição do carregamento de pressão até que não houvesse mudança nos valores de máximo e mínimo de tensão encontrada. Neste momento não ocorreu mais deformação plástica no material. Pelo Gráfico 16 e Gráfico 17, pode-se ver que não mais ocorre variação entre as tensões e a deformação que ocorre é somente elástica, logo no primeiro passo de pressão correspondente a 80% de SMYS.

São descritos através de letras os pontos de estudo, conforme já descrito para cada um dos pontos na Metodologia na Figura 38. Na Tabela 20 é apresentada a consolidação dos valores de variação de tensão e deformação com a aplicação de pressão correspondente a  $\sigma_c = 0,80 \times SMYS$ , qual tipo de tensão (circunferencial ou longitudinal), o número do nó e a região a qual pertence o nó para cada caso. Estes dados foram extraídos depois de aplicada sobrepressão equivalente à tensão circunferencial correspondente a 100% de SMYS e depois que houve a estabilização da tensão-deformação em relação à carga aplicada com

os ciclos de pressão (80% SMYS) subsequentes. Os dados utilizados são correspondentes ao segundo ciclo de pressão (80% SMYS).

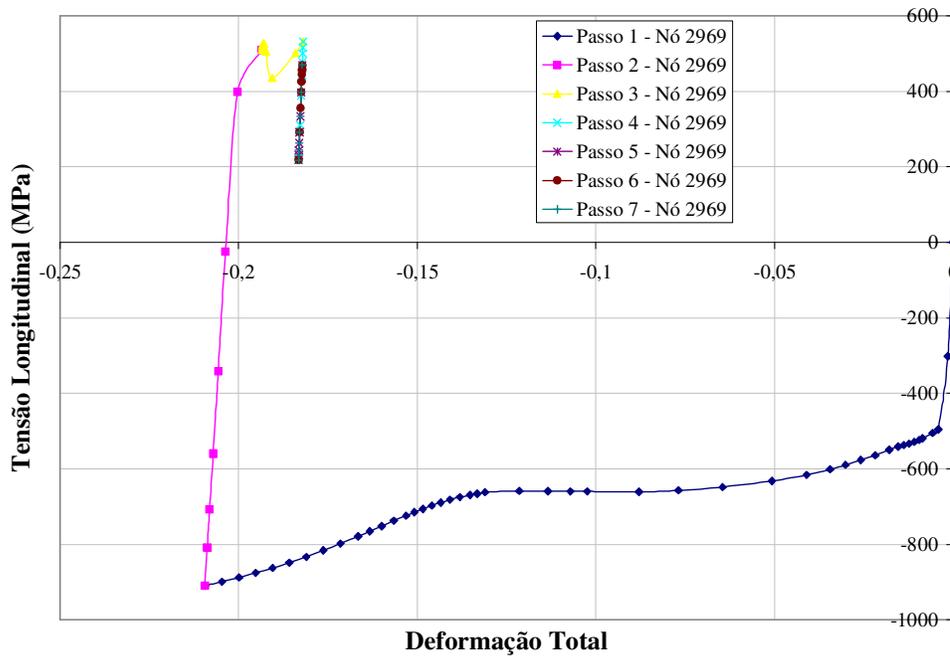


Gráfico 17 – Tensões críticas Caso VI – interno – Nó 2969 tensões-deformações longitudinais

A tensão de von Mises apresentada é ilustrativa devido à ausência de ‘pontas’, conforme já explicado nesta seção.

Para todos os casos a região de enrugamento que possui máxima variação de tensão se repete. A região que possui máxima variação na tensão longitudinal é, para todos os casos, a crista do enrugamento. Para os Casos III a VI o nó crítico é interno e para o Caso II o nó é externo.

O mesmo ocorre para a tensão circunferencial, onde a região de máxima tensão longitudinal é no ‘pé’ do enrugamento. Para os Casos III a VI o nó crítico é externo e para o Caso II o nó é interno.

A diferença entre o Caso II e os demais casos deve-se provavelmente à forma do enrugamento. Para o Caso II, a forma do enrugamento é para ‘dentro’ e para os outros casos é para ‘fora’.

Tabela 20 – Resultado de tensão para cada caso

Caso	Componente de Tensão	Nó	Posição	Amplitude		Região (C, D ou E)
				no Ponto mais Crítico Tensão (MPa)	Tensão Nominal (MPa) $SCF_{FEM}$	
II	Mises	70	Ex	187	386	0,48
	Circunferencial			729	386	
	Mises	3556	Ex	259	386	1,34
	Longitudinal			302	193	
III	Mises	70	In	359	386	0,93
	Circunferencial			452	386	
	Mises	4025	In	108	386	0,56
	Longitudinal			269	193	
IV	Mises	104	Ex	409	386	1,06
	Circunferencial			453	386	
	Mises	2969	In	162	386	0,841
	Longitudinal			251	193	
V	Mises	76	Ex	415	386	1,08
	Circunferencial			251	386	
	Mises	4461	In	146	386	0,38
	Longitudinal			271	193	
VI	Mises	80	Ex	317	386	0,82
	Circunferencial			564	386	
	Mises	93	In	260	193	0,67
	Longitudinal			326	193	

A Figura 48, mostra as regiões críticas do enrugamento. A região D é representada em (a) para tensão circunferencial e a região C é representada em (b) para tensão longitudinal. O nó crítico aparece destacado pelo retângulo vermelho

para o Caso IV. Mas, nos casos III a VI a região de localização dos nós críticos se repete.

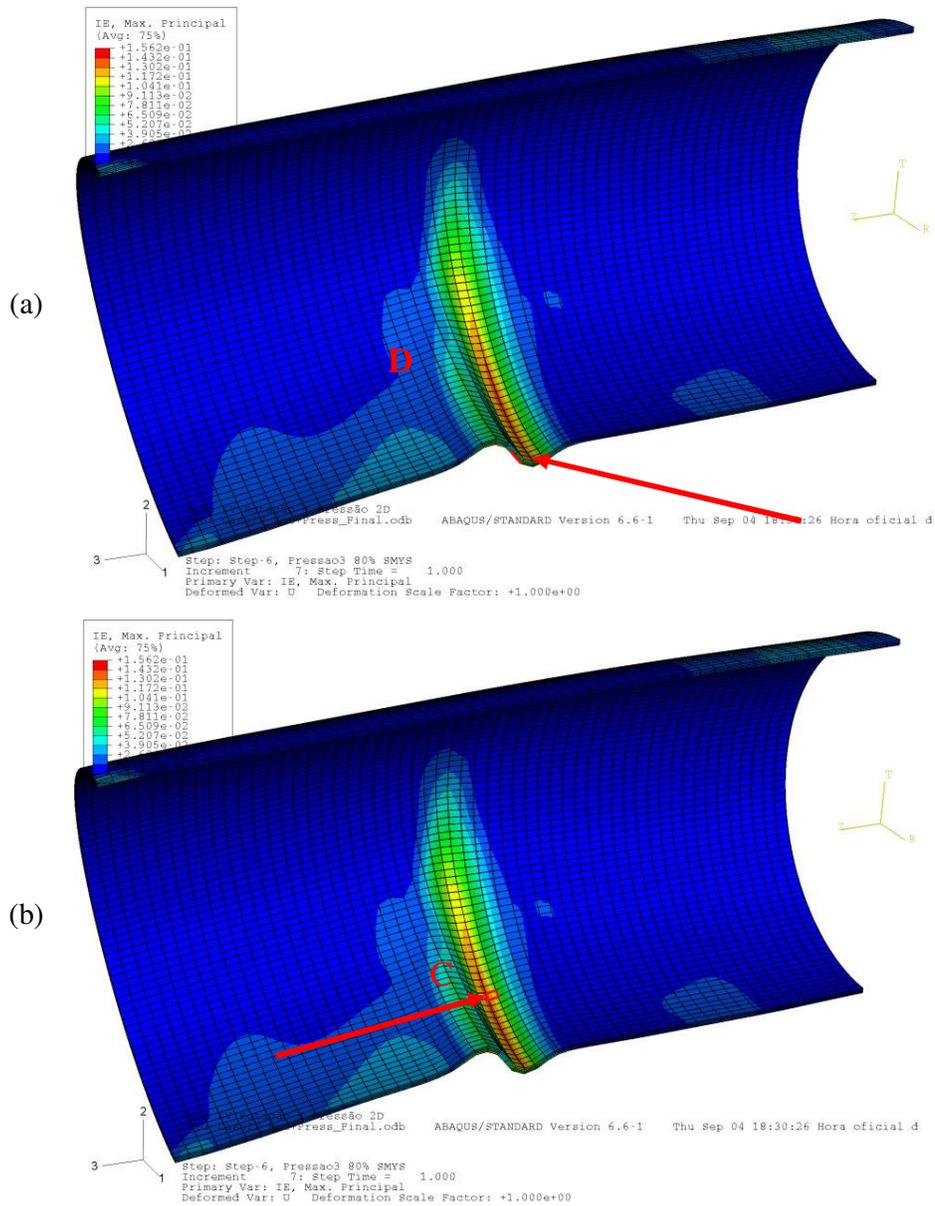


Figura 48 – Região C no enrugamento para os nós críticos (a) circunferencial e (b) longitudinal com pressão de 80% SMYS

A Tabela 21 apresenta qual a tensão crítica escolhida, seu valor, o fator de concentração de tensão correspondente ( $SCF_{FEM}$ ) e o SCF proposto por Rosenfeld *et al.* [21, 22] ( $SCF_R$ ) pela eq. (50). A tensão foi escolhida entre a maior longitudinal e circunferencial, independente se interno ou externo, para cada caso.

Ou seja, cada caso possui uma única tensão crítica sob avaliação de vida em fadiga.

Tabela 21 – Tensão crítica utilizada e seus SCF

Caso	Tensão	Nó	Região	Interno ou Externo	Amplitude Tensão Crítica (MPa)	Concentrador de Tensões SCF <sub>FEM</sub> SCF <sub>R</sub>	
II	C	70	D	Ex	729	1,89	1
III	L	4025	C	In	269	1,40	3,34
IV	L	2969	C	In	251	1,30	2,93
V	L	4461	C	In	271	1,40	2,92
VI	L	93	C	In	326	1,69	2,64

Como se pode observar, os valores de SCF<sub>FEM</sub> para o nó com maior tensão longitudinal são maiores, para maioria dos casos, que os valores encontrados para tensão circunferencial. Existe na literatura estudo de acidentes em dutos em que o duto rompeu circunferencialmente [89].

A Tabela 23 foi construída utilizando os valores calculados para a vida em fadiga em cada um dos métodos aqui já descritos para os nós, em cada caso, com maior SCF<sub>FEM</sub>. Para o método de Manson [68] foi utilizada a eq. (31). O método de determinação da vida via ASME [71] utiliza a curva de vida em fadiga já mostrada na Figura 27. E por Markl [74] pela eq. (47) e pela equação modificada proposta por Rosenfeld (eq. (49)) [21, 22].

Os cálculos que deram origem à Tabela 23 estão contidos no Apêndice II.

O Caso I não apresentou o enrugamento para a curvatura dada e por isso foi considerado com SCF igual a 1 e vida em fadiga de tubo padrão (100 anos).

Tabela 22 – Vida em fadiga para elementos críticos

Caso	Amplitude Tensão (MPa)	Vida em fadiga para cada SCF (N)				
		Manson	ASME		Markl	
		$SCF_R$	$SCF_{FEM}$	$SCF_R$	$M_{Padrão}$	$M_R$
II	729	$2,8 \times 10^8$	$4,1 \times 10^3$	$6,4 \times 10^4$	$2,1 \times 10^3$	$2,0 \times 10^4$
III	269	$3,3 \times 10^4$	$> 1,0 \times 10^6$	$7,0 \times 10^3$	$3,1 \times 10^5$	50
IV	251	$7,0 \times 10^4$	$> 1,0 \times 10^6$	$1,3 \times 10^4$	$4,4 \times 10^5$	97
V	271	$7,2 \times 10^4$	$> 1,0 \times 10^6$	$1,8 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5$	99
VI	326	$1,4 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	$1,8 \times 10^4$	$1,2 \times 10^5$	193

Os valores de vida em fadiga para o método do ASME [71] foram calculados obedecendo os critérios já mencionados na seção 2.5.4.4 e utilizando interpolação linear a partir dos dados da tabela 5-110.1 (p. 366) do ASME [71].

A partir da Tabela 23 podemos observar que os resultados mais conservadores em relação a vida em fadiga de componentes são os propostos por Rosenfeld ( $M_R$ ) [21, 22], a partir da equação modificada de Markl. O estudo de Rosenfeld é o único proposto diretamente para vida em fadiga de componentes que possuem o concentrador de tensão como um enrugamento. Os demais são estudos para concentradores de tensão em geral, que são aplicados para casos de concentração de tensão devido a mudanças geométricas, por exemplo.

A vida em fadiga, a partir do  $SCF_R$  utilizando o método das inclinações universais de Manson, apresentou resultado em que todos os casos poderiam operar no transporte de gás (vida de 100 anos) e apenas o Caso III não poderia operar com líquido por este período (vida inferior a 36.500 ciclos).

Para o modelo de cálculo do ASME utilizando os valores de tensão encontrados por FEM ( $SCF_{FEM}$ ) não haveria problema para operação do duto com gás ou com óleo, pois as vidas em fadiga encontradas são superiores, com exceção do Caso II, a 36.500 ciclos. Para o Caso II, a vida para transporte de óleo seria

inferior a 100 anos, mas para transporte de gás (1.200 ciclos) a vida seria superior a 100 anos.

Utilizando o  $SCF_R$  introduziu-se os valores de amplitude de tensão na curva do ASME [71], que apresentou vida em fadiga superior a proposta por Rosenfeld ( $M_R$ ). Mas ainda assim muito inferior as encontradas pela própria curva do ASME a partir dos valores de tensão encontrados pelo estudo aqui proposto de elementos finitos. A exceção é o Caso II que apresenta vida em fadiga por FEM inferior. Apenas o Caso II poderia operar com óleo para vida de 100 anos (36.500 ciclos) e todos poderiam operar com gás (1.200 ciclos).

A vida em fadiga encontrada para  $Markl_{Padrão}$ , pela equação original proposta pelo próprio Markl [74], nenhum dos casos apresentaria problema para operar, vida de 100 anos no transporte de gás, e apenas o Caso II não poderia operar neste período para líquido. Já para a modificação na equação de Markl proposta por Rosenfeld (eq. (49) na seção 4.5.3) apenas o Caso II poderia operar com gás, e os outros casos apresentam vida inferior aos demais métodos analisados.

De forma a ilustrar os cálculos realizados, será apresentada nesta seção um exemplo de cálculo de vida em fadiga para o método de Manson, Caso VI.

- Cálculo da gama de tensão para o caso.

$$\Delta\sigma_c = 0,80 \times SMYS = 386 MPa$$

- A partir do método de cálculo para  $SCF_R$  proposto por Rosenfeld é calculado o  $P_{neuber}$ .

$$SCF_R = 0,122 \times \left(\frac{D}{t}\right)^{0,815} \times \left(\frac{d}{D}\right)^{1,055} \times \left(\frac{d}{t}\right)^{0,783} \times \left(\frac{L}{d}\right)^{-0,014} \times \left(\frac{a}{C}\right)^{-2,874} = 2,64$$

$$P_{Neuber} = SCF^2 \times \frac{\Delta\sigma_c}{E} = 0,729$$

- O cálculo da gama e da amplitude de deformação usando a curva do 'loop de histeresis' é feito a partir da solução do sistema de 2 equações, onde  $K_c$  e  $n_c$  devem ser determinados a partir de ensaios para cada material.

$$\Delta\sigma = \frac{P_{Neuber}}{\Delta\varepsilon} = 868MPa$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{K_c} \right)^{\frac{1}{n_c}} = 6,043 \times 10^{-3}$$

- O cálculo da vida é obtido pela aplicação da equação de Manson.

$$\Delta\varepsilon = 3,5 \times \frac{S_u}{E} \times N^{-0,12} + \left[ \ln \left( \frac{1}{1-RA} \right) \right]^{-0,6} \times N^{-0,6}$$

$$N = 1,364 \times 10^5 \text{ ciclos}$$

- Após obtido o número de ciclos o qual o componente resiste, este deve ser comparado com o valor da vida em projeto do equipamento. Se a vida encontrada for inferior ao do sistema, o tubo deve ser descartado. Se superior, o tubo pode fazer parte da construção e montagem do duto.

Como forma de verificar os resultados encontrados, foi realizado um teste no modelo, com relação D/t igual a 100. Após observado o ângulo de iniciação do enrugamento no modelo original, fez-se uma análise em que o ângulo imposto era pouco maior que o ângulo de iniciação do enrugamento, para que a geometria final do enrugamento fosse bem reduzida em relação aos casos estudados.

Os resultados encontrados foram confrontados com os de Rosenfeld *et al.* [21, 22]. A ruga encontrada possui as características mostradas na Tabela 23.

Tabela 23 – Características geométricas do enrugamento teste – unidades e mm

d	L	a	d/D	d/t	L/d	a/C	a/C <sub>R</sub>	% erro
0,0067	178,3	90°	0,0095	0,95	26,4	0,250	0,247	1,38

Observa-se que o percentual do erro na relação a/C encontrada com relação a a/C<sub>R</sub> é de apenas 1,38%.

Com estas características geométricas o  $SCF_R$  é de 1,89, o que leva a uma vida em fadiga, proposta por Rosenfeld, de 2.849 ciclos para variação de pressão de equivalente a 80% de SMYS. Segundo a curva do ASME, utilizando o  $SCF_R$  o material teria pouco mais de 1.000 ciclos. Por Markl teria mais de  $2,5 \times 10^6$  ciclos de vida e, finalmente por Manson, utilizando o  $SCF_R$  a vida em fadiga seria de  $10^5$  ciclos.

## 5.5

### PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO DE PERMANÊNCIA DE TUBO COM ENRUGAMENTO

Com base em todas as análises realizadas foi possível propor uma metodologia de ensaio não destrutivo como forma de avaliação do uso de tubos com enrugamento na operação de dutos.

Primeiramente foram avaliados os pontos críticos do tubo. Os pontos críticos externos estão sempre localizados na região de transição da geometria do tubo para a formação do enrugamento, Figura 49.

O teste foi desenvolvido com base nas análises realizadas em FEM. A aquisição de dados de tensão-deformação deve ser realizada submetendo o tubo a dois ciclos de pressão interna. Um ciclo de variação de pressão de pressão atmosférica a uma pressão equivalente a 100% SMYS e posterior aplicação de pressão igual a 80% SMYS. Neste momento os dados, que serão utilizados na análise de fadiga, devem ser adquiridos.

Extensômetros (*strain-gages*) devem ser posicionados na região de transição da geometria do tubo enrugado conforme Figura 49. Estes são os pontos críticos para concentração de tensão provocada pelo enrugamento, conforme visto na seção 5.4.

A partir da leitura de deformação realizada nestes pontos, provocada pela aplicação de pressão interna igual a 80% de SMYS, um método adequado deve ser utilizado para estimar a vida em fadiga.

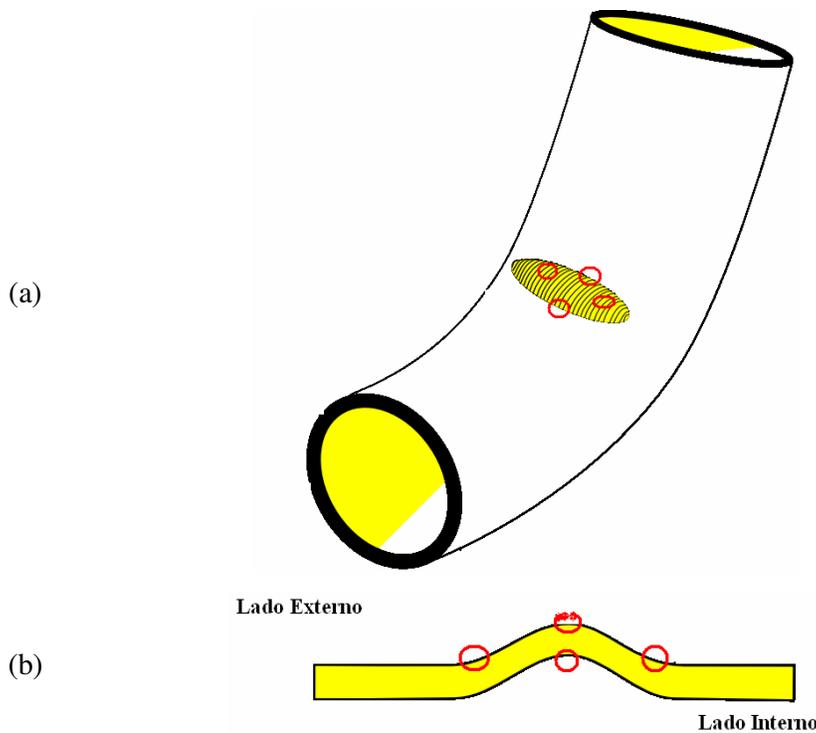


Figura 49 – Enrugamento com posicionamento de extensômetros marcados em vermelho, (a) tubo inteiro e (b) vista em corte na região do enrugamento

Neste trabalho foram avaliados 3 métodos de cálculo de vida em fadiga: Markl (seção 4.5.3, eq. (47)), inclinações universais de Manson (seção 2.5.4.2, eq. (26), (27) e (31)) e ASME (seção 2.5.4.4).

No Apêndice IV está apresentado um fluxograma com passo-a-passo da verificação aqui explicada. O Apêndice V apresenta o passo-a-passo para cálculo de vida em fadiga pelo ASME sec. VIII div. 2 [71].