3
ESTUDOS SIMILARES

3.1
DEVELOPMENT OF ACCEPTANCE CRITERIA FOR MILD RIPPLES IN PIPELINE FIELD BENDS [21, 22]

Rosenfeld desenvolveu um critério de aceitação para tubos com a presença de rugas após o curvamento a frio de campo. É lembrado que diferentes códigos tratam de diferentes maneiras a presença do enrugamento, assim a aceitação de tais descontinuidades tem sido feita de forma inconsistente.

Rosenfeld realizou uma extensa compilação de trabalhos anteriores que tratam do mesmo assunto. Um deles é o trabalho de Bilston e Murray, também utilizado como referência nesta dissertação, que propõe a determinação do comprimento da ruga com base numa teoria elástica de flambagem [73]. Um modelo de formato de ruga foi proposto com base em experimentos de forma a permitir uma análise pós-enrugamento, conforme pode ser observado na Figura 28. A geometria proposta foi utilizada para obter relações entre deformação, encurtamento de flexão, altura de enrugamento, razão entre altura máxima do enrugamento com raio da forma, e ângulo final. Os resultados obtidos da geometria proposta se aproximavam dos resultados de ensaios realizados em corpos de prova.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

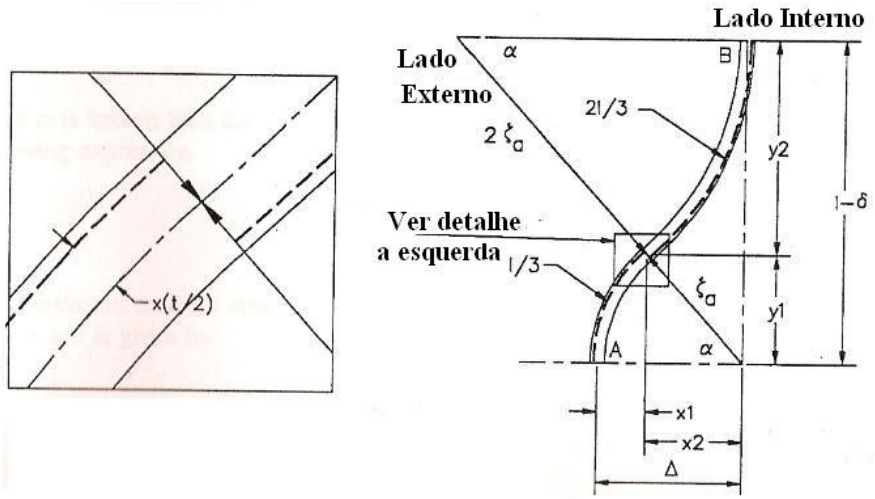


Figura 28 – Perfil de ruga utilizado por Bilston e Murray [73]

Os autores fazem uma extensa compilação de códigos, padrões e regulamentações que falam sobre a presença do enrugamento. São citados os códigos canadense (CSA Z662), australiano AS 2885 [48], norueguês DNV OS-F101 [45], ASME B31 seções 4 [53] e 8 [54] e a regulamentação americana [47].

Durante uma inspeção *in-line*, para dutos em operação, enrugamentos podem ser encontrados na superfície do tubo. O operador necessita de um critério de avaliação para que a decisão a ser tomada seja adequada em relação ao reparo a ser realizado.

Neste trabalho é utilizado o método dos elementos finitos para estimar o efeito da magnitude do enrugamento e das tensões devido à pressão e à flexão. Foi utilizado um modelo elástico simples, de pequenos deslocamentos e análise de casca, como base para avaliação do comportamento da geometria de um enrugamento representativo. Optou-se por este tipo de modelo devido à complexidade e tempo de processamento necessários em um modelo elasto-plástico sólido.

O procedimento de análise envolveu especificar a geometria do tubo enrugado como entrada para o modelo de casca de FEM e submetê-lo a situações que simulassem as condições de operação (pressão interna e momento).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

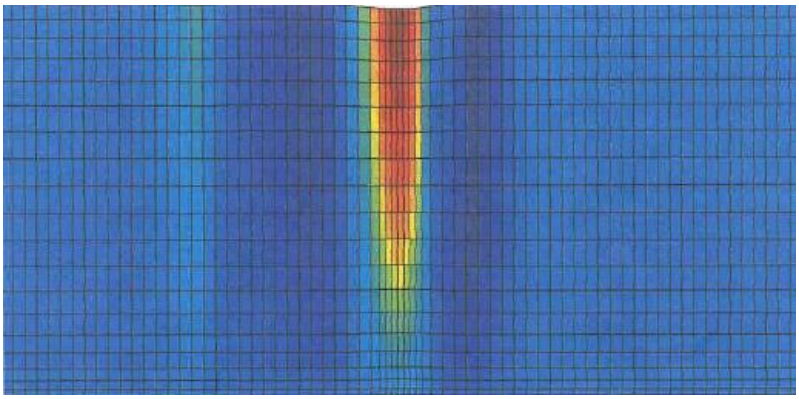


Figura 29 – Tensão efetiva, face externa [21]

As tensões locais obtidas nestas análises foram usadas para definir o SCF para uma dada geometria de ruga. As análises assumiram que o material teria um comportamento elástico e que o escoamento plástico do material não era relevante. O foco do trabalho torna-se então a validação da análise elástica simples com base nos testes de fadiga disponíveis. Para esta validação, os resultados encontrados na realização de testes físicos foram comparados com os resultados encontrados no trabalho por elementos finitos.

Os testes experimentais foram realizados em 5 tubos, 3 para testes de ciclo de pressão e 2 para testes de ciclo de flexão, com a presença de enrugamentos em sua superfície. Os enrugamentos foram criados em laboratório a partir de um curvamento a frio real realizado em uma máquina curvadeira do tipo CRC-Evans, sem a utilização de um mandril interno, para que o enrugamento presente fosse severo. Os tubos eram de material X52 e tinham diâmetro de 36” e 0,281” de espessura (relação D/t igual a 128). Os enrugamentos encontrados possuíam razão d/D de 1,7%, 3,7% e 6,9%, e altura pico-vale de 0,6, 1,32, 2,5 polegadas respectivamente. Foram realizadas inspeções geométricas e testes de fadiga nestes tubos. Com os resultados destes ensaios foram realizados testes em FEM para que o modelo final de elementos finitos a ser utilizado no trabalho tivesse resultados próximos dos resultados encontrados por meio dos testes físicos.

Nos modelos de elementos finitos, as tensões e deformações avaliadas foram longitudinal, circunferencial, cisalhante e de von Mises para 72 casos com diâmetro nominal de 36”, diferentes espessuras e 36 tipos diferentes de geometria da ruga. Para cada caso, foram aplicados pressão de 1.000 psi e momento de 5.000

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

kip-pol, para estudar a ação de cada um sobre a ruga independente da ação do outro.

O trabalho considerou ainda que o tubo curvado é um segmento reto, dado o grande raio de curvatura exigido pelos códigos internacionais. Desta forma, o enrugamento foi caracterizado como um desvio de um formato cilíndrico puro, apenas uma mudança na geometria.

Com base nestes 72 casos, os autores encontram uma relação entre a geometria do enrugamento e o SCF proposto, que é a razão entre a máxima tensão efetiva encontrada em FEM e a tensão circunferencial para um tubo sem ruga e reto. O resultado pode ser visto na Figura 30 (a) para relação d/D e (b) para relação d/t. A partir destes resultados de SCF e de geometria do enrugamento os autores propõem um SCF em função da geometria encontrada para cada enrugamento. Para isso, o autor utilizou um método de regressão não-linear para encontrar uma relação entre os fatores geométricos d/D, d/t, D/t, a/C e L/d e o SCF.

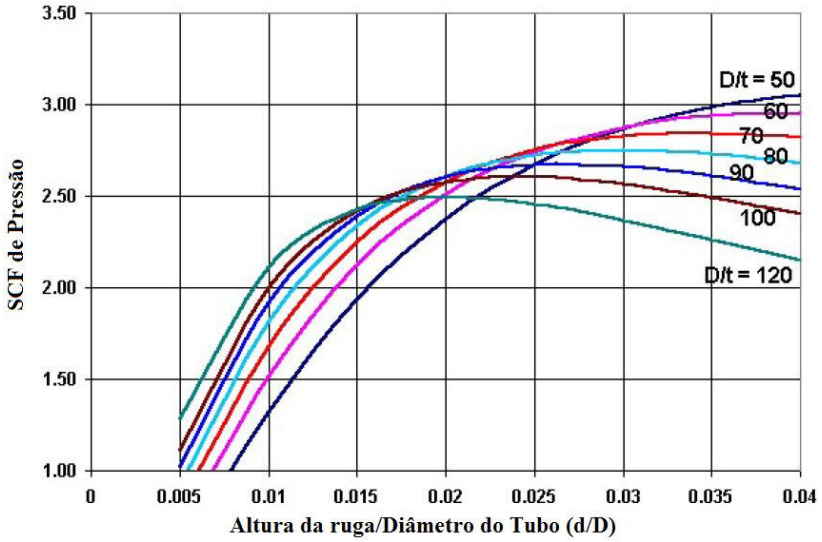
Observa-se pela Figura 30 (a) que o SCF aumenta rapidamente com o aumento de d/D, mas a partir de certo valor, para D/t maior que 60, seu aumento não muda ou ainda reduz o SCF.

O mesmo ocorre com o aumento da relação d/t, em que o SCF cresce rapidamente, mas a relação possui um ponto de inflexão a partir do qual seu aumento reduz o SCF, de forma mais suave que o crescimento.

Rosenfeld conclue no trabalho que a extensão circunferencial do enrugamento possui uma significante influência nas tensões locais de uma dada geometria da ruga, dimensão esta desprezada em todos os códigos estudados [20, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55]. Este fato é explicado pelo conservadorismo dos mesmos já que a extensão circunferencial do enrugamento age como um fator diminutivo no SCF proposto por Rosenfeld, seja para tensões oriundas de pressão interna, flexão ou temperatura. O autor propõe uma relação entre altura e comprimento circunferencial do enrugamento, onde quanto maior a altura, maior o comprimento do enrugamento encontrado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

(a)



(b)

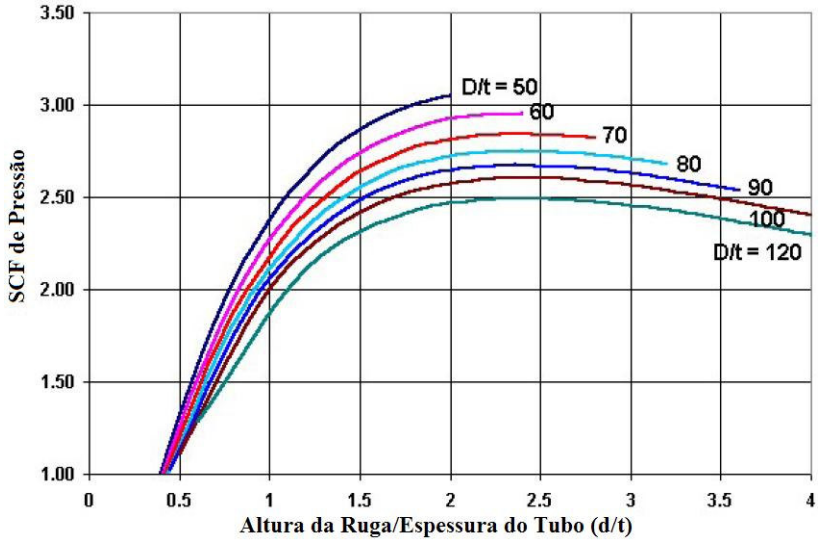


Figura 30 – Relação entre geometria da ruga e SCF (a) para relação d/D e (b) para relação d/t

Com base nos testes de laboratório, Rosenfeld desenvolveu uma equação de vida em fadiga modificada a partir da equação clássica proposta por Markl [74]. No trabalho, os autores discutem suas considerações para as alterações realizadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

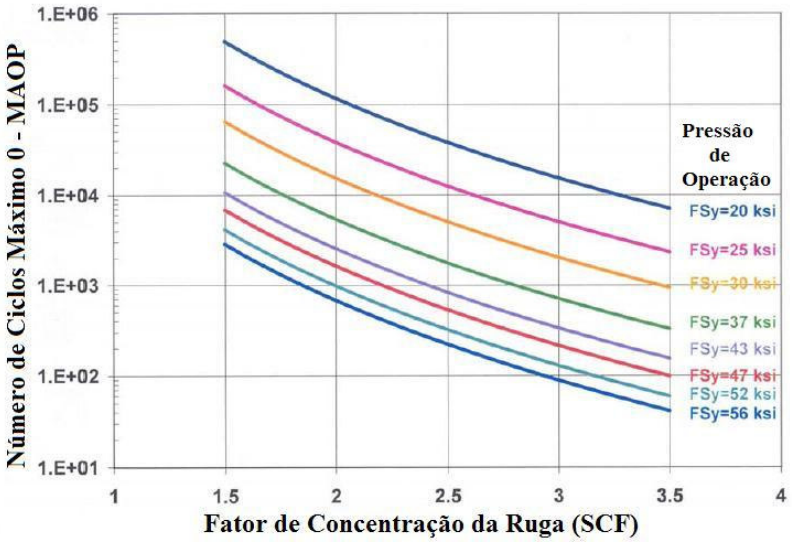


Figura 31 – Vida em fadiga para enrugamento presente [21]

Para finalizar a análise dos resultados as informações de SCF, obtidas a partir de FEM, e da geometria do enrugamento, foram relacionadas por regressão não-linear. Foi obtida uma equação da qual se obtém o SCF a partir das relações geométricas do enrugamento (D/t, d/D, d/t, a/C e L/d). Com esta equação o SCF foi generalizada para qualquer caso, conforme pode ser visto na seção 4.5.3. Também é discutido qual relação geométrica do enrugamento que mais influencia no SCF encontrado (d/D).

Por fim é proposto um gráfico, mostrado na Figura 32, com valor máximo de tensão de operação cujo o fator geométrico de ruga d/D existente não limita a vida em fadiga do componente, que é de 100 anos. Foi escolhido 100 anos pois há na história dutos que operaram por cerca de 100 anos, e espera-se que os que estão em operação hoje e os futuros projetos devam operar por igual período. Em oleodutos, que prevêem em projeto um ciclo por dia, isto significa um projeto de 20.000 ciclos ao longo dos 100 anos e para gasodutos, que prevêem em projeto um ciclo por mês, que irá gerar 1.400 ciclos para uma vida de 100 anos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

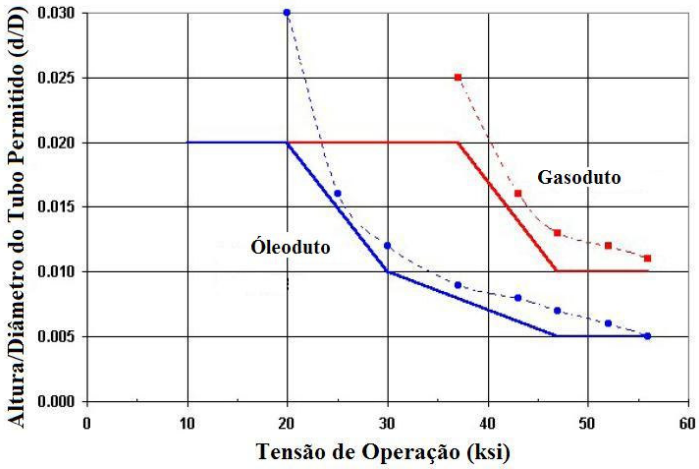


Figura 32 – Enrugamento permitido recomendado para dutos de transporte de gás e líquidos [21]

Os resultados deste estudo indicam que os enrugamentos permitidos, listados a seguir, não causam danos em dutos operando sob condições normais encontradas na indústria de transporte por dutos para vida útil de 100 anos. São eles:

- enrugamentos suaves que possuem altura com dimensão inferior a 1% do diâmetro externo, para gasodutos operando com tensões circunferenciais que podem ultrapassar 47 ksi;
- enrugamentos suaves que possuem altura com dimensão inferior a 2% do diâmetro externo, para gasodutos operando com tensões circunferenciais de até 37 ksi;
- enrugamentos suaves que possuem altura com dimensão inferior a 0,5% do diâmetro externo, para dutos operando com líquidos perigosos e com tensões circunferenciais que podem ultrapassar 47 ksi;
- enrugamentos suaves que possuem altura com dimensão inferior a 2% do diâmetro externo, para dutos operando com líquidos perigosos e com tensões circunferenciais de até 20 ksi.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A geometria de enrugamento permitida para líquidos se assemelha ao admitido pelo código B31.4 [53], mas o código possui ainda limitações para tensões circunferenciais intermediárias a 20 e 47 ksi.

O comprimento da ruga que se limita a estas alturas, aparenta não requerer limitações específicas. Os autores fazem a ressalva de que enrugamentos com alturas superiores aos limitados no trabalho, podem ser permitidos desde que realizada uma análise detalhada do caso. Da mesma forma limites de rugas mais restritivos devem ser usados para dutos sujeitos a condições mais severas de operação, como ciclos intensos de operação, grandes diferenciais de temperatura e grandes cargas axiais.

Os trabalhos apresentados por Rosenfeld *et al.* [21, 22] foram os primeiros a apresentar um estudo voltado para o dano causado pelo enrugamento que pode implicar uma redução de vida em fadiga. O estudo possui resultados práticos e por elementos finitos que guiaram os autores até uma equação. Nesta equação o fator de concentração de tensão de qualquer tubo com a presença de enrugamento pode ser encontrado a partir de relações geométricas do enrugamento. O SCF deve ser utilizado em um cálculo de vida em fadiga que o usuário prefira. Os autores também apresentam dois gráficos. No primeiro gráfico, para um dado SCF e uma tensão de operação, encontra-se uma relação para a vida em fadiga do componente. O segundo gráfico associa a relação geométrica mais crítica do enrugamento (d/D), para vida em fadiga, com uma tensão de operação máxima para uma vida prolongada (100 anos). Com as informações desta equação e destes dois gráficos é possível tomar a decisão sobre a permanência ou não da curva que possui o enrugamento, e este é o maior ganho do trabalho, um resultado prático a ser utilizado como tomada de decisão. Cabe apenas a ressalva de que o trabalho possui simplificações, como utilização de elementos elásticos na análise de FEM, que tornam severamente conservadores os resultados finais propostos pelos autores. Assim, um tubo com enrugamento terá vida em fadiga superior àquela proposta pelos autores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

3.2
LOCAL BUCKLING, STRAIN LOCALIZATION, WRINKLING AND POSTBUCKLING RESPONSE OF LINE PIPE [41]

O artigo trata da previsão do comportamento de dutos enterrados como estruturas de casca e submetidos a curvaturas que excedem seus pontos limites.

É um trabalho desenvolvido na Universidade de Alberta. O artigo considera o desenvolvimento de uma flambagem local e sua suavização, e a deformação e o enrugamento que caracterizam o comportamento de dutos e a relação entre estes fenômenos.

Oferece, também, uma explicação fenomenológica do mecanismo de formação do enrugamento no comportamento pós-flambagem de estruturas.

A observação de campo de dutos enterrados indica que não é incomum movimentos geotécnicos imporem deslocamentos no duto, o que resultaria em grandes deformações.

Rotineiramente a deformação no tubo resulta em uma flambagem local. A deformação é amplificada no pós-flambagem com o surgimento de enrugamentos com magnitude significativas. Isto ocorre sob condições de carregamento que podem ser idealizadas como pressão interna constante, força axial constante e aumento monotônico da curvatura.

O estudo é modelado como um problema de interação entre estrutura e solo (Figura 33). O duto age essencialmente como uma barra e o solo é modelado como uma série de molas que são por natureza não-lineares.

Se um duto enterrado está sujeito a um aumento na curvatura, cedo ou tarde, irá flambar localmente.

Assumindo que o momento perceptivelmente decresce depois do pico na curva momento-curvatura local (a resistência do tubo diminui), quando o tubo ultrapassa este pico em qualquer ponto ao longo de seu comprimento, ele não mais poderá manter o momento naquele ponto específico. O resultado é que o momento começa a decair a partir deste ponto com o contínuo aumento na curvatura.

O equilíbrio dita que o decaimento do momento neste ponto resulta na queda do momento em todos os outros pontos ao longo do tubo na vizinhança da suavização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

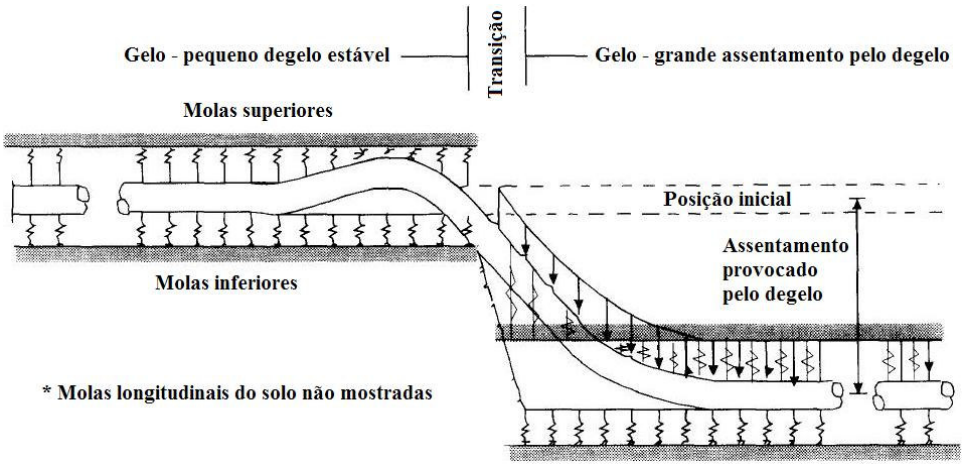


Figura 33 – Interação solo-estrutura para análise do modelo [41]

O resultado é que a curvatura e a deformação continuam a aumentar no ponto de suavização ao mesmo tempo que diminui em todos os outros pontos. Isto se deve à localização da deformação na região de suavização.

A localização da deformação produz uma amplificação da deformação na região de suavização, e resulta no desenvolvimento de um enrugamento neste local, enquanto em outros locais as ondas formadas pela flambagem diminuem e até desaparecem.

O ponto de suavização na curva momento-curvatura identifica o limite, que é o onde ocorre a localização da deformação e o inicio do enrugamento.

O trabalho examina, também, as características comportamentais de dutos sob cargas compressivas, pressão interna e flexão.

Duas séries de testes físicos, em tubos de diâmetros similares aos utilizados em dutos e sob carregamentos reais de serviço, foram realizados para obter informação sobre grandes deformações no pós-flambagem.

O tubos são de 20”OD X 0,312” de espessura, DSAW, X56, e 12,75”OD X 0,250” de espessura, ERW, X52.

Os tubos foram cortados nas seguintes relações comprimentos-diâmetro (Lh/D): 0,5, 1,0, 2,36, 3,0 para ensaios de compressão pura. Os resultados podem ser vistos na Figura 31.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

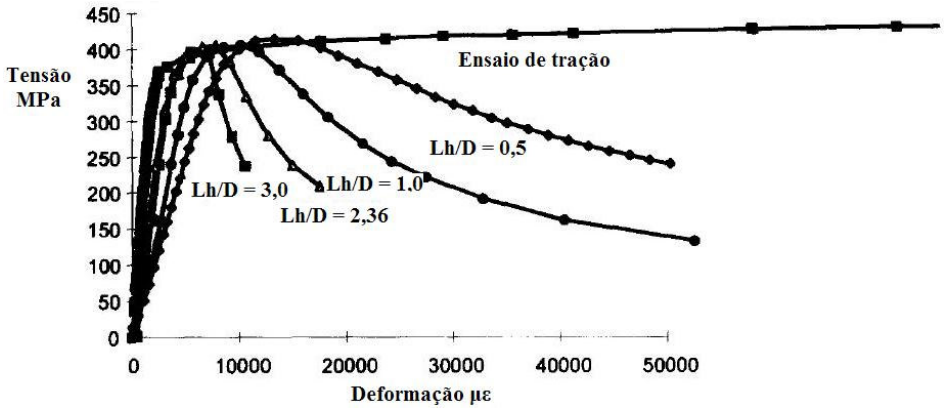


Figura 34 – Curvas tensão-deformação para tubos carregados axialmente [41]

As principais características associadas ao enrugamento foram:

i) todos os testes desenvolveram apenas uma ruga com extensão em apenas uma parte do tubo;

ii) de acordo com o aumento do enrugamento no pós-flambagem, a capacidade de enrugamento decresce e conseqüentemente, a relação carga-deformação suaviza;

iii) enquanto a deformação nas proximidades da ruga continua a aumentar, a deformação em regiões remotas ao enrugamento diminui porque o carregamento cai;

iv) as relações entre tensão-deformação para comprimento medido que abrangem a região do enrugamento são dependentes do comprimento e não mais representam as propriedades do material ou da seção transversal.

Estas características também são típicas de enrugamento em situações mais complexas de carregamento.

Os resultados experimentais para carga combinada mostraram que os tubos sem pressão interna formaram rugas no modo diamante, enquanto os casos com pressão interna formaram rugas no modo *bulging*.

Cada caso formou apenas um enrugamento localizado.

Para o caso de pressão total (σ_c = 0,72 SMYS) uma onda periódica inicialmente se forma e se desenvolve ao longo da fibra de máxima compressão. Mas quando o tubo começa a entrar na região de suavização, uma das ondas se transforma no enrugamento e as restantes desaparecem.

O trabalho analítico é baseado em FEM. O tubo é analisado como uma estrutura cilíndrica de casca e pode assumir um comportamento elasto-plástico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A análise em FEM utilizou o programa Abaqus. Foi utilizado o elemento S4RF, que é um elemento de casca. O material modelado é elasto-plástico isotrópico e com uma curva tensão-deformação verdadeira baseada em um ensaio de tração. Tensões residuais e geometria foram computadas como o primeiro estágio da análise. Elas vieram de uma simulação do processo de soldagem, utilizando um ciclo específico de temperatura, propriedades de material dependente da temperatura e da malha utilizada, ver Figura 35.

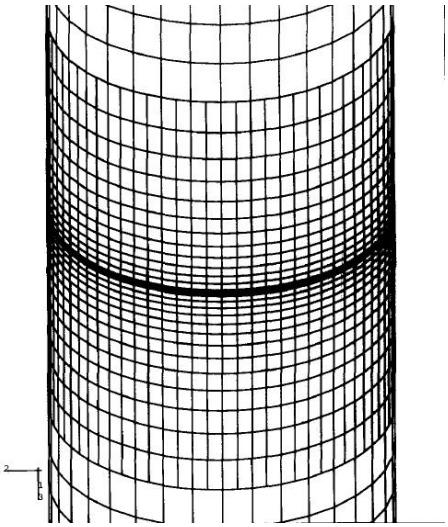


Figura 35 Malha de elementos finitos utilizada na análise [41]

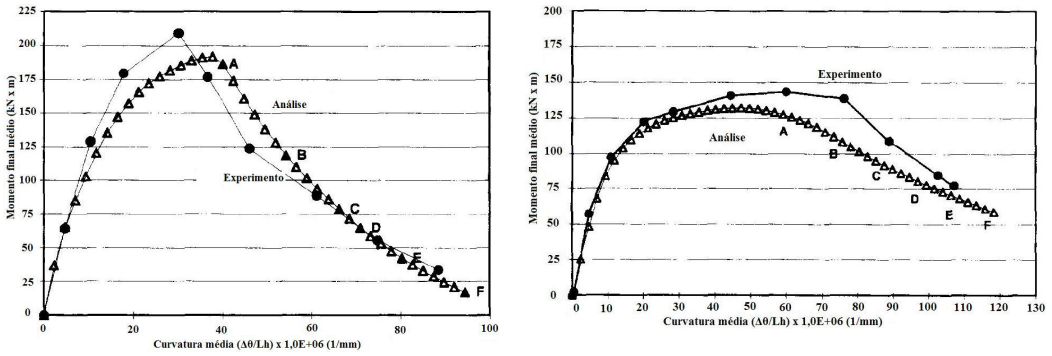
A Figura 36 (a) mostra o momento-curvatura para o caso sem pressão e a Figura 36 (b) para o caso com pressão. Observando-se os resultados do trabalho, nota-se que o formato pós-flambagem do tubo continua a mudar conforme a suavização e o enrugamento progridem.

O trabalho conseguiu obter resultados em FEM muito próximos daqueles encontrados nos ensaios experimentais.

As soluções apresentadas no trabalho demonstram a capacidade de se obter resultados confiáveis na predição do comportamento do tubo além do ponto limite, na região de suavização. O momento limite, da parte descendente da curva momento-curvatura, tanto do modelo experimental como do analítico, não resulta em um colapso catastrófico para o caso de deformação controlada. A evolução da configuração pós-flambagem pode ser interpretada como uma solução de grande e suave deformação, de uma estrutura que, na ausência de resposta não-linear, pode

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

estar passando por uma seqüência de bifurcações associadas a diferentes modos de forma. Saber que este tipo de comportamento do enrugamento não é catastrófico, permite ao controlador do duto tomar decisões racionais com respeito à quantificação do dano e sua operação.



(a) (b)

Figura 36 – Curvas curvatura-momento para tubos (a) não pressurizados e (b) pressurizados [41]

Este trabalho apresenta considerações sobre o comportamento de tubos que tenham enrugamento; um estudo em laboratório da formação e resistência do enrugamento para diferentes casos; e interação entre o solo e o tubo que apresenta enrugamento. Tem a particularidade de focar seus esforços em tubos já em operação e não mencionar qualquer consideração para a fase de projeto. Não apresenta um critério ou limites de curvatura e momento para estes tubos.

3.3
CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DE ENRUGAMENTOS EM CURVAS DE DUTOS FORMADAS POR CONFORMAÇÃO DE TUBOS RETOS [75]

Este trabalho apresentado por Freire [75] considera que por causa das grandes razões diâmetro/espessura usadas nos projetos modernos e o uso cada vez mais freqüente de materiais que possuem alta resistência ao escoamento, os tubos retos ao serem curvados a frio frequentemente apresentem enrugamentos difíceis de serem evitados. Freire cita Rosenfeld *et al.* [21, 22], que menciona que as

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

normas e recomendações existentes diferem no tratamento destes enrugamentos, indo da ausência de citação a sua proibição, dependendo de interpretação.

O trabalho apresentou como objetivo descrever a seleção e análise da literatura existente sobre dutos, no que se refere a curvas com enrugamento e sua influência na integridade de dutos. E ainda, apresentar um critério que estabelecesse limites quantitativos para a aceitação ou rejeição de curvas que contenham enrugamento e que fazem ou farão (projeto e operação) parte de sistema de transporte por dutos, para as indústrias de óleo e gás natural.

O trabalho teve origem em uma consulta feita pela empresa CCDL – Construções de Dutos Ltda. sobre a aplicação de critérios que estabelecessem limites de aceitação para anomalias de superfície, definidas como enrugamentos. As anomalias são ocasionadas pelo processo de curvamento a frio de tubos API 5L X70 com diâmetro de 28" e espessuras de 0,4; 0,5"; e 0,625", que farão parte do gasoduto Campinas-Rio.

O trabalho apresenta uma verificação do critério proposto pelo PRCI [22] através de um cálculo independente para a resistência à fadiga. O autor faz algumas considerações sobre as condições usadas para os cálculos de vida em fadiga, são elas:

- "a verificação do critério proposto é baseada na resistência à fadiga da região curvada que contém a ondulação;
- o número de ciclos mínimo é igual a 2×10^3 para transporte de gás e 10^4 para transporte de líquido. Estas vidas são majoradas por um fator de 10 e 20 para gás e líquido, respectivamente, para levar em conta ciclos não contabilizados de outros eventos tais como ciclos extras de pressão, e ciclagens por solicitações combinadas de temperatura-flexão. Caso ocorra solicitação de vibração induzida pelo fluido, o número de ciclos poderá ser insuficiente para garantir que a vida da curva atinja a vida em fadiga esperada;
- a gama de pressão interna que solicita a curva é dada pela variação de tensão circunferencial nominal máxima igual a F x SMYS. A verificação foi feita para dutos de transporte de gás com F = 0,80;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

- o cálculo de fadiga deve usar, preferencialmente, curvas reais (levantadas experimentalmente) tensão-deformação cíclica e ε ×N para o material do duto".

A comparação entre as curvas apresentadas no relatório, sugere que tanto estas quanto a curva de Markl e a curva genérica mínima para dutos podem representar as curvas ε×N para o material de um duto, caso estas não esteja disponíveis, se as vidas desejadas estão acima de 10^3 ciclos, Gráfico 3.

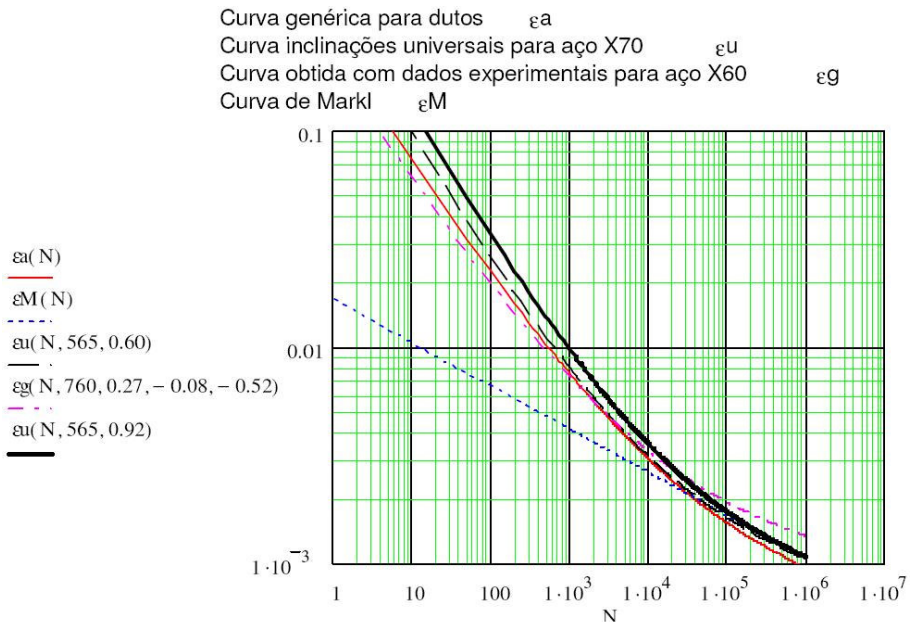


Gráfico 3 – Curvas ε×N para os aços API X60 (dados experimentais) e X70 desenvolvida a partir do método das inclinações universais [75]

Para a verificação da vida em fadiga desenvolveu-se um fator de concentração de tensão alternativo ao do PRCI [22], que é normalizado pela tensão circunferencial, caso não houvesse a presença do enrugamento. "A tensão na ondulação depende da tensão longitudinal nominal do tubo reto enterrado, da razão entre a altura da onda e espessura do tubo, d/t, e da razão entre altura da onda e seu raio de curvatura mínimo, R_d /d". O fator de concentração de tensão proposto pode ser visto na eq. (38) e não pode ser menor que 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

$$SCF = 1 - 6 \times \frac{d}{t} \times \left[\frac{t}{6 \times R_d} \times \left(1 - \frac{1}{-1 + \frac{R_d}{t} \times \ln\left(\frac{R_d + \frac{t}{2}}{R_d - \frac{t}{2}} \right)} \times \frac{\frac{t}{2}}{R - \frac{t}{2}} \right) \right] \qquad (38)$$

A Tabela 2 fornece valores de SCF calculados segundo a eq. (38) e segundo as equações propostas pelo PRCI [22] para ciclo de pressão, SCF_P, e para ciclo de momento fletor, SCF_M, expostas no item 3.1. Observa-se que, quando as restrições geométricas de ruga do critério de aceitação proposto por este trabalho são respeitadas, o SCF encontrado é igual a 1,0. Como conseqüência, pode-se dizer que as resistências à fadiga dos tubos com ondulações suaves, que passam no critério de aceitação, não são afetadas pela presença do enrugamento.

Tabela 2 – Fatores de concentração de tensões [75]

Condições geométricas	SCF*	SCF_P
D/t=50 d/D=0,005 d/t=0,25, R_d/t=5	1,0	1,0
D/t=50 d/D=0,01 d/t=0,50, R_d /t=5	1,26	1,32
* Não considera D/t, d/D e L/d		
** Não considera R_d/t e usa L/d=10		

O trabalho apresenta diversas visões e critérios de aceitação de ondulações em curvas tubulares feitas a partir de um tubo reto pelo processo de curvamento a frio. "O critério proposto na publicação de Rosenfeld *et al.*, desenvolvido através de uma metodologia racional, apoiado em resultados experimentais e análises de fatores de concentrações de tensões numéricas pelo método de elementos finitos, foi tornado mais rígido, acrescido de restrições presentes em outros critérios e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

depois verificado por um cálculo de resistência à fadiga que usou um procedimento independente".

O critério de aceitação mais rígido e estendido, proposto no relatório é o seguinte: "O enrugamento ou ondulação suave pode ser admitido quando:

1. Não for constatada a presença de trincas, sulcos ou ranhuras na região com ondulação.

2. A camada de proteção superficial estiver íntegra e aderente.

3. A razão entre altura da ruga ou onda (a maior existente na curva) e o diâmetro externo da curva, d/D, não ultrapassar 0,5%.

4. A razão entre altura da ruga ou onda (a maior existente na curva) e a espessura do tubo, d/t, não ultrapassar 25%.

5. A razão entre raio mínimo de arredondamento (superfície externa ou interna) de uma ondulação e a espessura de parede do tubo, R_d /t, deve ser maior que 5.

6. A distância entre dois picos ou dois vales de uma ondulação deve ser maior que 20 vezes a altura de uma ruga ou onda.

7. A ovalização máxima do tubo medida na região de ondulação, ou desvio de circularidade localizado, deve ser menor que 3,0%, tomando como base o diâmetro externo nominal do tubo".

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados da literatura, códigos internacionais e trabalhos publicados, e possui a particularidade de não ter sido realizado nenhum ensaio prático ou simulação computacional. Apesar disso, possui fundamentação em códigos internacionalmente aceitos e apresenta uma metodologia de cálculo para vida em fadiga, uma vez encontrado o fator de concentração de tensão. O trabalho propõe um critério para cálculo de fator de concentração de tensão a partir da geometria do enrugamento, assim como Rosenfeld [21, 22]. Também possui uma conclusão, onde são apresentadas considerações sobre a integridade da curva na presença de enrugamentos para que haja a liberação para uso da mesma. Estas considerações são mais abrangentes que as de Rosenfeld, pois determinam critérios máximos para d/D, d/t e a distância mínima entre dois picos ou dois vales. Apresenta grande conservadorismo para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

chegar às conclusões, pois restringe ainda mais o trabalho de Rosenfeld [21, 22] a partir de considerações presentes nos códigos internacionais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA