2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica, introdutória e sintética, se faz necessária para facilitar o entendimento do que será descrito e analisado neste estudo.

2.1
CURVAMENTO

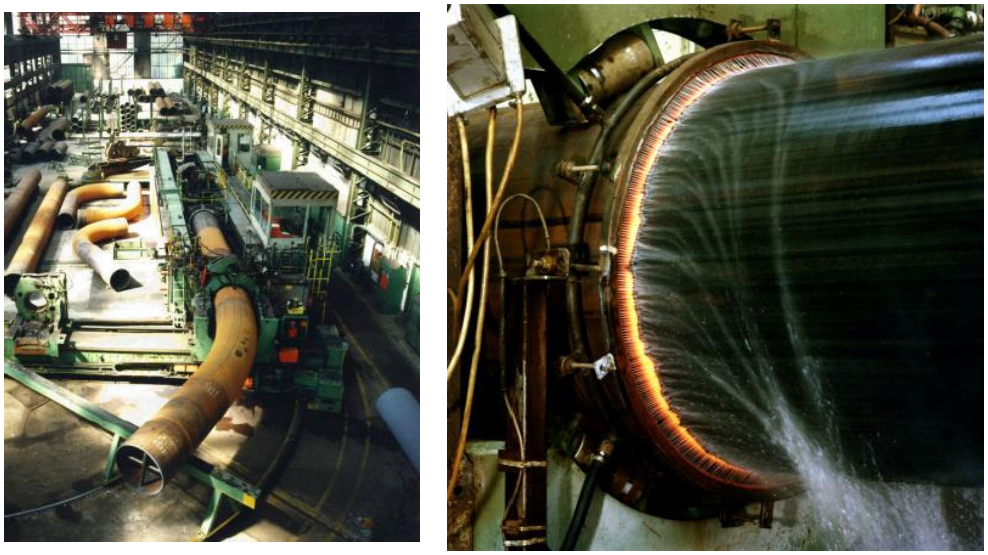
Neste segmento da revisão teórica serão descritos os métodos de curvamento a quente por indução e a frio, este último sendo o objeto de estudo desta dissertação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.1.1
CURVAMENTO A QUENTE POR INDUÇÃO

O curvamento a quente por indução é utilizado como uma opção ao curvamento a frio quando o raio de curvamento requerido é pequeno. Recentemente estas curvas têm chamado a atenção devido ao seu uso potencial em larga escala em gasodutos.

Na área de dutos, as curvas por indução, Figura 5 (a), são largamente usadas como importantes conexões para mudar a direção do transporte dos fluidos e para aliviar tensões térmicas, através da sua aplicação em *loops* ou liras de expansão. As técnicas de curvamento e as de fabricação de tubos para o curvamento a quente têm sido desenvolvidas para chegar-se a curvas de alta resistência mecânica, compatíveis com a alta resistência dos tubos.



(a) (b)

Figura 5 – Processo de curvamento a quente – (a) curva por indução a quente em tubo de 48", (b) detalhe da resistência para indução e do resfriamento com jato de água [23, 24]

No processo de curvamento a quente por indução, uma das extremidades do tubo é empurrada por um impulsor e a outra é fixada por um braço giratório que guia o tubo até a completa conformação da curva [16, 25, 26, 27]. O braço giratório é regulado com o raio de curvatura que se deseja obter e, dessa forma, força o tubo a mudar continuamente a direção enquanto é lentamente movimentado pelo impulsor [26, 27]. O tubo passa por uma bobina de indução de alta freqüência entre o impulsor e o braço giratório. Esta bobina cria um campo magnético altamente concentrado que induz um potencial elétrico no tubo criando um fluxo de corrente. A resistência do tubo ao fluxo provoca um aquecimento rápido e localizado. Imediatamente após passar pela bobina, o tubo é resfriado com jatos de água [26, 27], Figura 5 (b).

Muitas vezes o tubo fabricado para ser utilizado no trecho reto do duto é selecionado para ser curvado por indução. Como o curvamento por indução é um processo a quente, a microestrutura e as propriedades mecânicas da curva são diferentes do tubo original [16, 26]. E, se este for de alta resistência e tiver sido fabricado pelo processo de laminação controlada, a mudança de resistência entre o tubo e a curva pode ser grande [23, 24]. Além disso, a espessura original do tubo é reduzida devido ao afinamento que ocorre no extrado da curva [23, 24]. Por estes

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

motivos, é necessário otimizar as dimensões e a composição química dos tubos que serão curvados a quente por indução.

A norma Brasileira, NBR 15273 [28], estabelece condições técnicas de fornecimento de curvas feitas por este processo para uso em sistema de transporte por dutos para a indústria de petróleo e gás natural. Esta norma permite um ressalto (enrugamento) que é de natureza estética (aparência) e não é classificado como um defeito pernicioso. A norma lembra ainda, que este ressalto é uma característica deste processo e pode ocorrer em função da relação D/t em cada ponto da tangência (transição) de uma curva. Este enrugamento, para ser considerado aceitável, deve atender aos seguintes requisitos (parágrafo 8.4.1 – p. 18):

- as formas da ruga concordam com a superfície do tubo de forma gradual, com profundidade máxima crista-a-vale de 1% do diâmetro externo real;
- a razão entre a distância entre cristas adjacentes, I, e a crista-a-vale seja no mínimo 25.

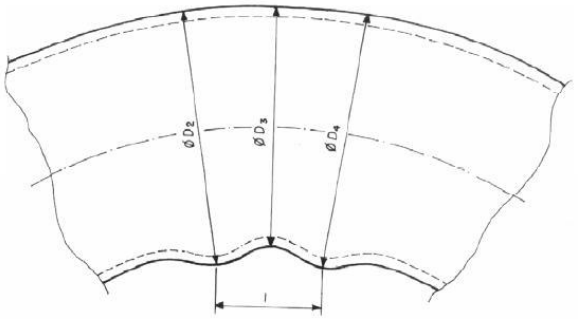


Figura 6 – Diagrama esquemático para medição de ondulações [28]

O custo relativamente alto do curvamento a quente por indução, em comparação com o curvamento a frio faz com que sua aplicação fique restrita aos casos em que o curvamento a frio não possa ser aplicado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.1.2
CURVAMENTO A FRIO

O curvamento a frio, Figura 7, como já explicado na introdução, é freqüentemente necessário por toda a extensão de qualquer duto, para que este tenha as mudanças de direção necessárias, conforme requerido pelo seu traçado ou pela topografia do terreno [5, 6].

Figura 7 – Curvadeira com Tubo Sendo Curvado

O curvamento a frio é realizado utilizando-se uma máquina curvadeira para curvar o tubo reto sem a necessidade de aquecimento. O curvamento a frio afeta as propriedades mecânicas do material do tubo, devido ao encruamento do material que sofre deformação plástica durante este processo. No tubo submetido a este processo pode ocorrer a formação de um padrão de deformações residuais e imperfeições, como mostrado na Figura 8, geradas por um mandril pneumático (*pneumatic wedge mandrel*) que é utilizado dentro do tubo durante o curvamento [6]. Estas marcas costumam ser desprezadas dadas suas pequenas dimensões.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

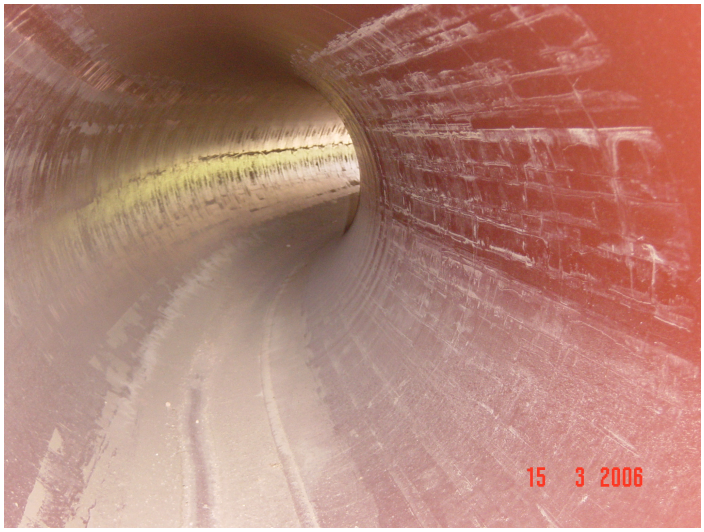


Figura 8 – Imperfeições, internas ao tubo, provocadas pelo mandril

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.2
MÉTODO DE CURVAMENTO A FRIO

A Figura 9 mostra uma curvadeira típica. É importante compreender o funcionamento de uma máquina de curvamento a frio para que haja o correto entendimento das condições e restrições do modelo de curvamento a frio realizado em FEM.

Figura 9 – Foto de uma típica curvadeira

A máquina de curvamento a frio mostrada na Figura 9 é uma curvadeira de mandril pneumático do tipo CRC-Evans, PWM 24-32 [29]. Ela é capaz de curvar tubos de diâmetros nominais variando entre 24 e 32 polegadas.

Durante a fase de construção do duto, os tubos a serem curvados são colocados na máquina antes do processo de soldagem de união (solda circunferencial). Na Figura 10 é possível ver um desenho esquemático de uma curvadeira com um tubo posicionado para ser curvado.

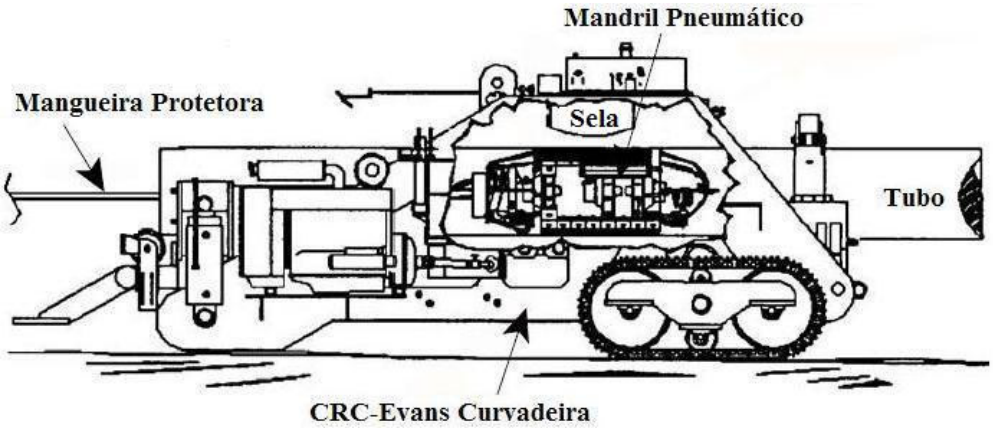


Figura 10 – Esquema de posicionamento do tubo na curvadeira [29]

O tubo é introduzido completamente na máquina, com a ajuda de um *side boom*, equipamento responsável por toda movimentação do tubo na fase de construção e montagem do duto. A geratriz superior do tubo deve ficar em contato com a sela da máquina e a geratriz inferior deve estar em contato total com o berço. Na extremidade do tubo, oposta ao início do curvamento, é colocado um imobilizador de forma a evitar ovalizações. O berço, onde o tubo é posicionado, é elevado para que seja efetuado o curvamento. O tubo é, então, curvado contra a sela, que pode ser vista na Figura 11.

Esta elevação causa deformação em uma pequena extensão do tubo, normalmente próximo à sela. Quando a força gerada para elevação do berço é retirada, o tubo retorna elasticamente para uma posição entre a original e a que estava com a aplicação da força do berço. O tubo é então movido pelo *side boom* ou pela própria máquina curvadeira, de modo que a região já curvada seja retirada da linha de centro da sela e um novo trecho do tubo seja posicionado abaixo dela, e todo o processo se repete ao longo da extensão do tubo. Um trecho no início e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

outro no fim do tubo são desprezados para o processo de curvamento devido à deformação de ovalização excessiva que poderia ocorrer.

Figura 11 – Detalhe da sela na curvadeira [10]

O tubo é curvado em intervalos medidos, de modo geral de 300 a 500 mm, dependendo do seu diâmetro e do ângulo desejado para a curva. Depois que o tubo é posicionado na máquina, o operador usa giz para marcar cada intervalo de curvamento na lateral do tubo. Uma pequena curva é feita depois que cada marca de giz é alinhada com a marca da curvadeira. Cada marca é então numerada, e estas são muitas vezes denominadas 'marcas de puxada'.

Um esquema do princípio do funcionamento de uma máquina de curvar é mostrado na Figura 12, utiliza o princípio de 3 pontos, mas com aplicação do carregamento em uma das extremidades [7, 30]. Esta máquina curva o tubo segurando-o em uma extremidade por um calço na geratriz inferior do tubo e aplicando o carregamento pelo berço, na extremidade oposta à fixação do tubo [30]. Entre estes dois pontos há a sela (fôrma) que é fixa. Assim, uma pequena parte do tubo é curvada e terá o perfil da sela, que possue o contorno da superfície externa do tubo, assim durante o curvamento evitam-se distorções, enrugamento, achatamento ou o colapso dos tubos [10] .

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

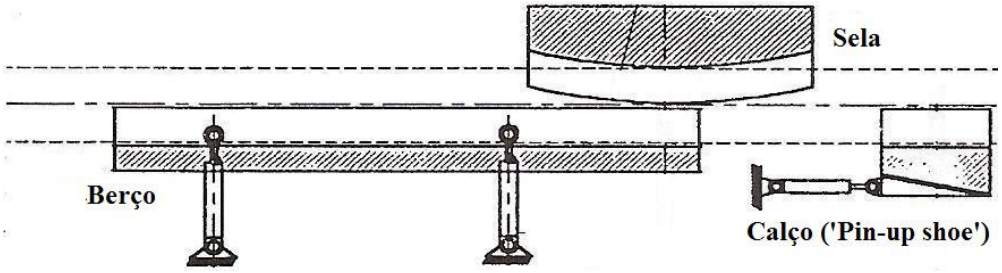


Figura 12 – Esquema do processo de curvamento [7]

Durante o processo de curvamento é posicionado um mandril, como o mostrado na Figura 13 (a), com sapatas pneumáticas (Figura 13 (b)) dentro do tubo. O mandril se expande no interior do tubo tocando a superfície interna de forma a manter o tubo na posição desejada (Figura 13 (c)) e evitar a ovalização durante o processo. Ele é desenvolvido de modo a manter o contorno radial do tubo e permitir flexibilidade longitudinal para que possa se curvar junto com o tubo.

(a)

(b)

(c)

Figura 13 – Figura de um típico mandril utilizado, (a) mandril [29], (b) detalhe das sapatas do mandril [30] e (c) mandril posicionado no tubo [30]

Para promover um adequado apoio das paredes internas do tubo, no local onde ocorrerá o curvamento, o mandril deve ser posicionado de maneira precisa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

abaixo da sela antes da execução do curvamento ou ‘puxada’, como também é chamada cada etapa de curvamento do tubo.

Durante o curvamento, o mandril é expandido para garantir suportação interna e a curva é feita pela curvadeira. Após o curvamento o mandril é retraído, depois avançado pelo tubo até atingir a próxima ‘marca de puxada’, por fim ele é reposicionado e tudo é programado novamente para a próxima curva.

Na prática, para evitar ovalizações nas extremidades do tubo, utiliza-se também um imobilizador na extremidade do tubo, Figura 14 (a) e (b) mostra o imobilizador posicionado no tubo, já a Figura 14(c) mostra o imobilizador sem estar sendo utilizado.

(a)

(b)

(c)

Figura 14 – Figura mostra o imobilizador usado na extremidade do tubo. (a) Imobilizador em uso visto de frente, (b) em uso visto lateralmente e (c) imobilizador.

Tradicionalmente a medição do ângulo a cada golpe é realizada por um clinômetro. Para realização da medição o curvamento é interrompido e o ângulo é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

medido nas duas extremidades do tubo. Na Figura 15 (a) pode ser observado o 'TruBend', aparelho digital também utilizado na medição do ângulo. Com este aparelho não é necessário interromper o curvamento. São utilizados dois sensores, um em cada extremidade do tubo, Figura 15 (b) , e um mostrador digital que exibe para o operador o ângulo obtido com o golpe, que pode ser visto na Figura 15 (c) [10].

(a)

(b)

(c)

Figura 15 – Aparelho utilizado na medição do ângulo de cada golpe durante o processo de curvamento (a) posicionado na extremidade do tubo, (b) em uso e (c) mostrador digital

O processo de curvamento a frio apresenta impedimentos de deformação e movimentação, tais como aqueles impostos pela sela, berço, madril interno e imobilizador. As restrições provocadas por estes componentes serão observadas no modelo realizado de forma simplificada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.3
MODOS DE FALHA

O curvamento de tubos de pequenas espessuras tem sido foco de estudo há muitos anos [7, 22, 31, 32, 33]. A construção de dutos de transporte envolve o processo de curvamento a frio, onde o tubo ao ser curvado é exposto a consideráveis restrições.

Quando um tubo longo, livre para ovalizar, é submetido a um momento de flexão pura, alguns tipos de colapsos são possíveis de ocorrer e estes são altamente dependentes da razão diâmetro espessura (D/t).

A literatura apresenta as relações D/t de forma qualitativa para cada tipo de modo de falha, assim, aqui os modos serão sempre associados a relação D/t alta, média ou baixa [5, 6, 7, 21, 22, 31, 32, 33].

As configurações de flambagem podem ser agrupadas em dois tipos que são chamados de modo diamante (*diamond*) e modo barril (*bulging*). Tubos com alta razão D/t falham por flambagem modo diamante, lembrando o modo de falha de mesmo nome para cargas compressivas axiais.

O modo diamante típico é mostrado na Figura 16 (a) onde a flambagem consiste em várias depressões na superfície regular do tubo. As depressões têm formas losangulares e a parede do tubo move-se em direção ao centróide da seção transversal [34].

O modo barril típico é mostrado na Figura 16 (b), neste modo uma saliência é desenvolvida e a parede do tubo nesta região se move para fora. Múltiplas rugas são formadas pela continuidade da análise, que após a primeira ruga atingir o amolecimento, as rugas subsequentes se formam de maneira similar a primeira [34].

Tubos com D/t moderados irão falhar inicialmente pelo desenvolvimento de flambagem circunferencial, que com o escoamento do material, se transforma em uma dobra.

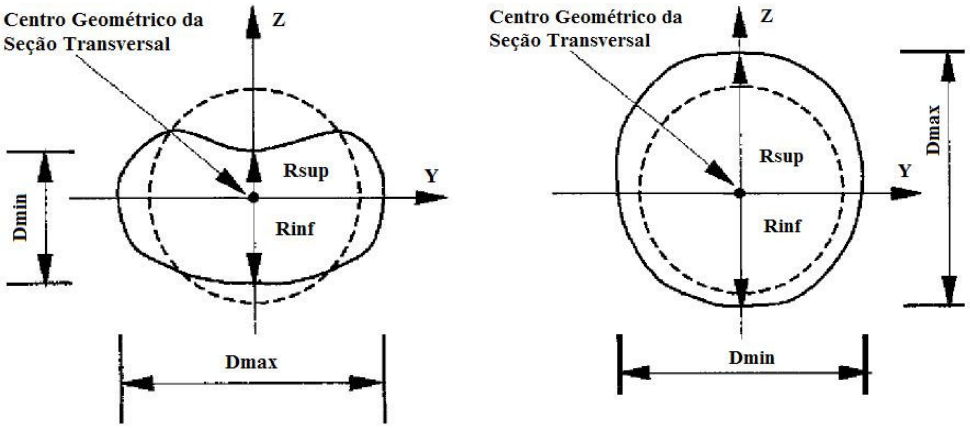
Baixas razões D/t não exibem um mecanismo distinto de falha, mas a capacidade de momento não reduz, ou se mantém constante para muito pequenas razões D/t, com o aumento da ovalização do tubo.

Quando tubos de pequenos comprimentos são restringidos de maneira a prevenir a formação de ovalizações, diferentes mecanismos se tornam

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

importantes. Tubos com alta D/t continuam a exibir o mecanismo de falha modo diamante, mas para tubos com moderada D/t é observado um enrugamento na superfície de compressão.

Nesta seção alguns aspectos dos mecanismos de colapso de um tubo sob flexão pura são examinados.



(a) Dimensões da seção transversal para o modo de falha diamante.

(b) Dimensões da seção transversal para o modo de falha barril.

Figura 16 – Representação da deformação transversal pós-flambagem [34]

O primeiro aspecto a se considerar é a exibição de uma teoria sobre ovalização do tubo durante o curvamento. A ovalização é chamada de Efeito Brazier [35]. Também é estudado o mecanismo de plastificação local que faz com que tubos de diferentes relações D/t falhem. E o último aspecto a ser considerado no comportamento durante a flexão pura é a formação de rugas na face compressiva quando tubos curtos são curvados com restrições.

Este estudo do comportamento do tubo durante flexão pura é similar ao curvamento a frio de campo, apesar de durante o curvamento a frio, o tubo ser submetido a consideráveis restrições, como as impostas pelas sapatas do mandril e imobilizador, por exemplo, que dificultam a ovalização do tubo.

Numa análise comparativa pode-se dizer que as máquinas de curvamento a frio são descritas como um curvamento em 3 pontos. Já na flexão pura o tubo é idealmente sujeito a um momento constante, com pouca ou nenhuma força longitudinal e nenhuma força cisalhante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.3.1
EFEITO BRAZIER

Quando um tubo fino e longo com seção transversal deformável é submetido a um momento de flexão pura, ocorre uma mudança no estado de equilíbrio, que irá induzir a uma mudança no formato da seção transversal. Esta mudança será um achatamento, comumente chamado de ovalização. É possível verificar uma diminuição da resistência e da rigidez à flexão ocasionada pelo aumento da curvatura que induz a uma diminuição do momento de inércia e a uma mudança na geometria. Brazier [35] foi o primeiro a descrever este comportamento não linear. Em seu trabalho são feitas considerações sobre esse efeito e apresentados valores para as curvaturas e momentos máximos suportados pela peça flexionada [35]. A Figura 17 ilustra o efeito.

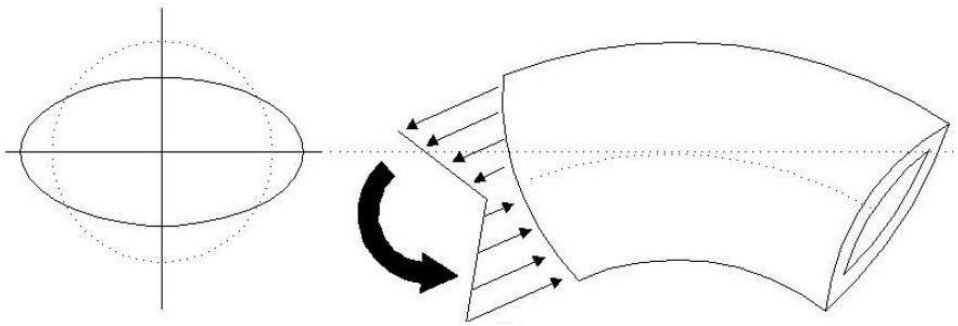


Figura 17– Efeito Brazier

Outros autores já reexaminaram alguns dos métodos usados por Brazier. Calladine [36] foi um deles, e chegou à conclusão de que as aproximações feitas por Brazier atingiam um bom resultado.

Os resultados da análise de Brazier só podem ser assumidos como válidos quando os tubos são longos e livres para fletir e ovalizar. Tubos são considerados longos quando o efeito do carregamento aplicado na extremidade do modelo não influencia o comportamento da seção transversal no centro. Machado [37] propõe que tubos longos devem ter comprimentos (C_0) superiores ao valor encontrado a partir da eq. (1).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

$$C_o = 2{,}5 \times \left(\frac{R^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{t}} \right) \tag{1}$$

onde R é o raio externo da seção transversal do tubo.

Em tubos longos o Efeito Brazier domina o comportamento não-linear em detrimento do aparecimento de deformações localizadas, como enrugamentos.

Para o processo de curvamento a frio o comprimento da seção de curvamento é pequeno e o tubo não é livre para ovalizar, pois está restringido pela sela, berço, mandril e imobilizador. Estas restrições são importantes, pois mostram que a determinação da ovalização de tubos durante o processo de curvamento não é a mesma proposta por Brazier ou Calladine.

Neste trabalho a ovalização não será avaliada, assumindo que após o processo de curvamento a ovalização existente terá pouca influência comparada ao enrugamento encontrado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.3.2
MECANISMO DE FALHA LOCAL

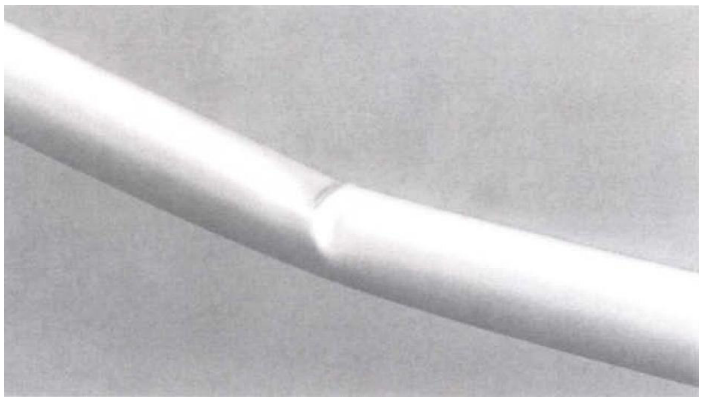
Os modos de falha local que podem ocorrer são comumente atrelados a uma função de D/t, mas a literatura não define uma exata relação D/t para qual se pode predizer a ocorrência de um ou outro mecanismo.

Tubos com relação D/t alta podem falhar pela formação de rugas localizadas na face de compressão que precedem a falha pelo efeito Brazier, situação esta que pode ser vista na Figura 18 (a). A flambagem lembra o modo de flambagem tipo diamante que se forma em altas razões D/t em tubos sujeitos à compressão axial [32].

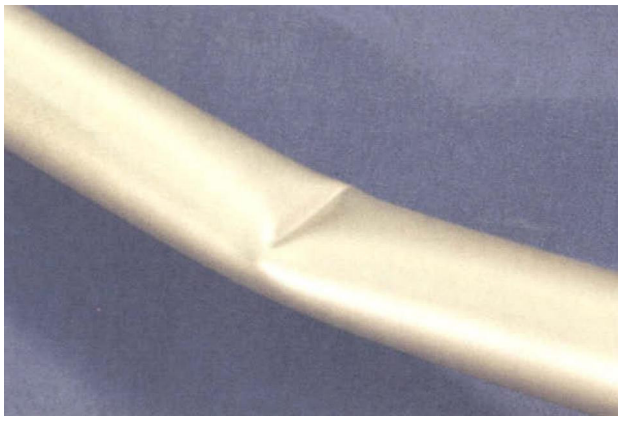
Para tubos com relação D/t moderada a falha ocorre pelo desenvolvimento de uma ruga circunferencial que cresce até finalmente formar uma dobra (Figura 18 (b)). Há na literatura trabalhos que tentam determinar o limite de falha por este tipo de mecanismo para tubos sendo curvados [38], que possui considerável aplicação para dutos *offshore*.

Durante a flexão pura, o mecanismo de falha não é distinto para tubos com baixa relação D/t (Figura 18 (c)). A ovalização do tubo cresce gerando uma progressiva redução na rigidez à flexão, ou seja, redução no momento de inércia de área [32].

(a)



(b)



(c)

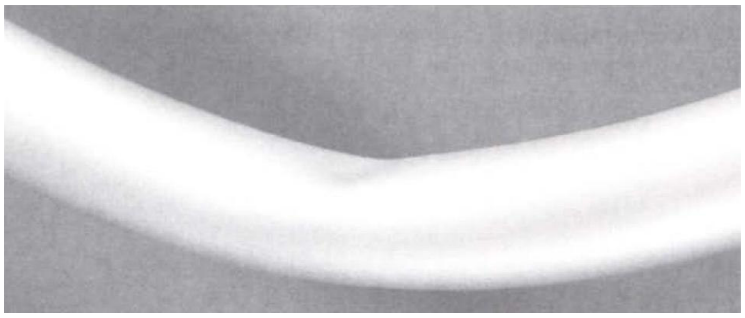


Figura 18 – Exemplos de colapso sob flexão pura: (a) Alto D/t – Modo diamante de falha, (b) Médio D/t – Dobra local e (c) Baixo D/t – Modo de falha difuso [32]

Existem, na literatura, estudos comprovando, por meio de testes físicos em tubos, os modos de falha para diferentes relações D/t [5, 31]. Há também estudos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

que se utilizam da simulação computacional para realização de trabalhos voltados para o entendimento da formação e falha, em curvamentos a frio, decorrentes da presença de enrugamentos [6, 39]. Na seção 3 serão discutidos alguns destes trabalhos.

2.3.3
COLAPSO

O colapso de uma estrutura pode ocorrer essencialmente de dois modos: pela ruptura do material ou pela instabilidade da estrutura [40]. A ruptura do material ocorre quando as estruturas atingem o limite de resistência do material, cujo estudo é objeto da Mecânica Estrutural e da Resistência dos Materiais. Já a instabilidade da estrutura constitui domínio da Estabilidade Estrutural.

Para muitas estruturas esbeltas, o colapso pode ocorrer por perda da estabilidade, sob níveis de tensão inferiores ao da resistência do material. Com o aumento da esbeltez, a não-linearidade geométrica e as imperfeições tornam-se cada vez mais importantes.

2.3.4
MOMENTO LIMITE À FLEXÃO

O momento limite é altamente dependente da quantidade de força longitudinal e carregamento de pressão [15]. A deformação na seção pouco antes da falha do tubo sujeito à carregamento simples de flexão e pressão, é mostrada na Figura 19.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

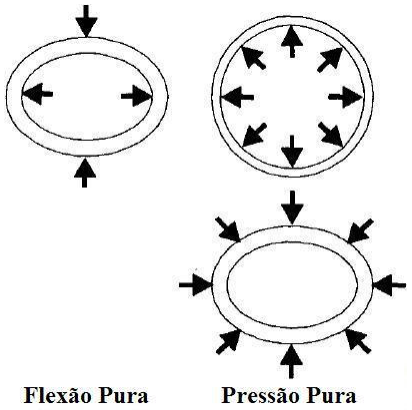


Figura 19 – Deformação da seção transversal de um tubo sujeito a carregamentos simples [15]

O momento na seção transversal do tubo devido à flexão é diretamente proporcional à curvatura do tubo [15]. O exemplo da Figura 20 ilustra um tubo inicialmente reto, com baixa relação D/t (<60), sujeito a um carregamento onde a pressão interna e externa e a carga axial são mantidas constantes, enquanto a curvatura é aumentada. A resposta local da tubulação pode ser descrita pela relação momento-curvatura mostrada na Figura 20.

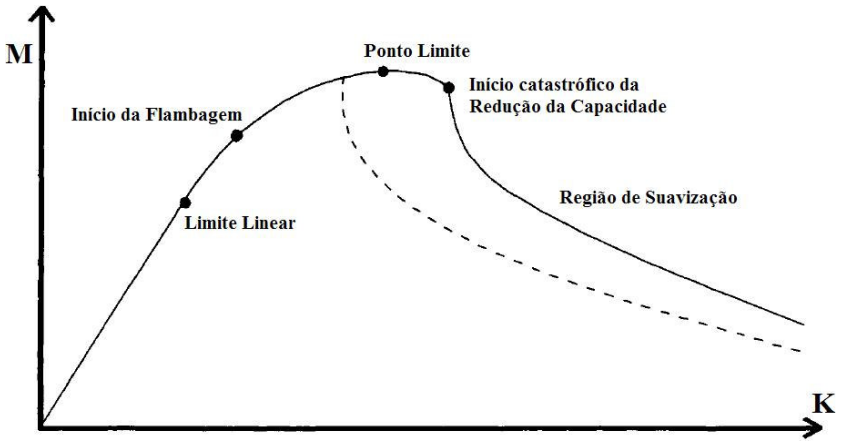


Figura 20 – Exemplo de momento a flexão versus relação de curvatura [15]

Diferentes pontos podem ser identificados a partir da relação momento fletor-curvatura. Os pontos significativos são [15]:

- limite elástico;
- ponto de início da flambagem;
- ponto limite;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

- início catastrófico;
- região de suavização.

Quando a curvatura do tubo é aplicada/aumentada, o tubo, primeiramente, vai estar sujeito a deformações globais dentro do domínio elástico do material, sem que nenhuma deformação plástica ocorra. Depois que o limite linear do tubo é atingido, o tubo não irá retornar para sua posição inicial após o descarregamento, mas a deformação continua sendo caracterizada como global. Se continuar o aumento da curvatura, imperfeições de material ou de geometria irão iniciar a flambagem local. Estas imperfeições irão influenciar em que curvatura e onde, ao longo do comprimento do tubo, irá ocorrer o início da flambagem. Mas como são pequenas, as imperfeições não irão influenciar o momento limite [15, 41].

Depois do início da flambagem, a deformação global continua, porém a energia aplicada no momento, mais e mais, vai se acumular na região da flambagem local, até que o ponto limite é atingido. Neste instante a resistência à flexão máxima do tubo é atingida e o colapso geométrico irá ocorrer se a curvatura for aumentada [15, 41].

Até que o ponto de início catastrófico de redução da capacidade seja atingido, o colapso geométrico será devagar e as mudanças na seção transversal são negligenciáveis. Depois deste ponto, a perda de resistência à flexão do material se inicia e a seção transversal do tubo irá colapsar até que as paredes superior e inferior do tubo entrem em contato [15].

Além do ponto limite, a capacidade de carga começa a decrescer com o aumento da curvatura. Como resultado disto, momentos em segmentos adjacentes à rótula plástica formada também decrescem e descarregam elasticamente. O efeito deste descarregamento é o de concentrar a curvatura no segmento de menor resistência à flexão, assim realçando ainda mais o modo de colapso. A forma do tubo em colapso depende de vários fatores como: pressurização ou não durante o processo; nível de carga axial compressiva; e relações geométricas [15, 41].

O momento de flexão limite para tubos de aço é uma função de muitos parâmetros, como por exemplo [15]:

- relação diâmetro espessura;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

- relação tensão-deformação do material;
- imperfeições do material;
- soldas (longitudinal e circunferencial);
- ovalização inicial;
- redução na espessura da parede do tubo, como por exemplo, corrosão;
- trincas;
- concentradores de tensão, como por exemplo, revestimento, mudança de espessura;
- cargas adicionais e suas amplitudes.

A relação momento curvatura fornece informação necessária para o projeto contra falha por flexão.

Dependendo da função do tubo, qualquer um dos pontos descritos anteriormente pode ser utilizado como limite de projeto.

A correta definição da região de perda de resistência à flexão é importante, e a razão fundamental disto é o conhecimento da capacidade de carregamento na presença de grandes deformações [15]. Além disso, o conhecimento do modo de colapso e sua amplitude são importantes, bem como a previsão da relação momento-curvatura.

Um tubo sujeito a aumento no momento fletor irá falhar como resultado da crescente ovalização da seção transversal e da queda da curva tensão-deformação. Até certo nível de ovalização, a queda no momento de inércia será contrabalançada pelo aumento da resistência do tubo gerado pelo encruamento da tubulação. Quando a perda no momento de inércia não puder mais ser compensada pelo encruamento, a capacidade limite de momento é atingida e um colapso catastrófico da seção transversal irá ocorrer se um aumento adicional na curvatura for dado [15].

Tubos com nível de pressão baixo ou nulo apresentam um modo de colapso chamado de modo diamante, enquanto que em tubos com nível de pressão médio ou alto, o modo de colapso se estende sobre a maior parte da seção transversal [15, 41].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Para baixas relações D/t, a falha se iniciará no lado de tração do tubo devido a tensões nas fibras externas ultrapassando o limite de tensão axial. Para razões D/t maiores que 30 a 35, a tensão nominal do tubo será tão pequena comparada com o SMYS do material que o modo de falha será uma flambagem local no lado compressivo do tubo [15].

A capacidade do momento (M_c) pode ser calculada pela eq. (2) proposta por Superb [42].

$$M_c = \left(1{,}05 - 0{,}0015 \times \frac{D}{t}\right) \times SMYS \times D^2 \times t \qquad (2)$$

O Gráfico 1 mostra curvas características de capacidade de momento para diferentes relações D/t para o material API X70 e para efeito de comparação são apresentadas as curvas dos materiais API X60 e X80 também.

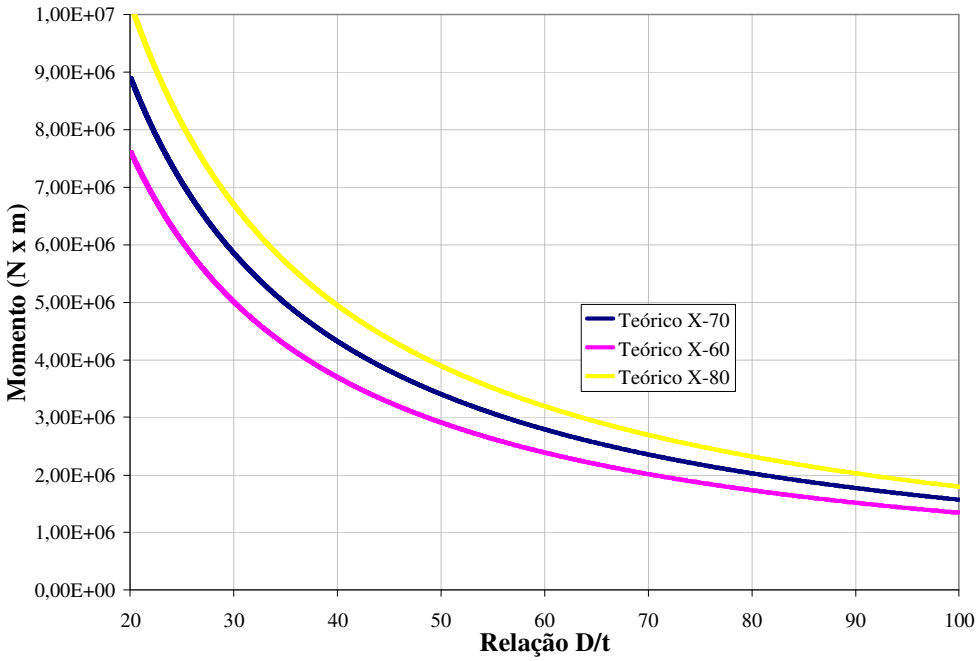


Gráfico 1 – Curvas segundo eq. (2) para diferentes relações D/t e diferentes SMYS

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Chakrabarti [43] descreve o API 1111 [44] e apresenta o critério para "flambagem devido à combinação dos efeitos de flexão e pressão externa" (4.3.2.2 – p. 9), onde para razões D/t limitadas a 50, a eq. (3) deve ser satisfeita.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{(P_0 - P_i)}{P_c} \leq g(\delta) \tag{3}$$

onde, P_0 é a pressão externa, P_i a pressão interna e P_c a pressão de colapso.

A eq. (4) é apenas uma reformulação da eq. (3) utilizando a equação para deflexão pura (eq. (5)).

$$\varepsilon \leq \left[g(\delta) - \frac{(P_0 - P_i)}{P_c} \right] \times \frac{t}{2 \times D} \tag{4}$$

$$\varepsilon_b = \frac{t}{2 \times D} \tag{5}$$

onde, ε é a deformação de flexão admissível pelo API, ε_b a deformação de flambagem sob flexão pura.

O fator de redução ao colapso, $g(\delta)$, é mostrado na eq. (6).

$$g(\delta) = (1 + 20 \times \delta)^{-1} \tag{6}$$

Ele é função da ovalização encontrada no tubo (δ), que pode ser calculada de acordo com a eq. (7).

$$\delta = \frac{D_{\max A} - D_{\min A}}{D_{\max A} + D_{\min A}} = ovalização \tag{7}$$

onde, $D_{\max A}$ e $D_{\min A}$ são o maior e menor diâmetros encontrados em qualquer seção transversal do tubo, respectivamente.

Como não existe diferencial de pressão durante o curvamento, a eq. (5) pode ser reescrita e é apresentada na eq. (8).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

$$\varepsilon \leq g(\delta) \times \frac{t}{2 \times D} \tag{8}$$

A deformação devido à flexão não deve ser maior que a mostrada na eq. (9), onde f_1 é um fator de segurança, sugerido como 2 pelo próprio API, e ε_1 a deformação máxima de instalação encontrada por cálculos analíticos ou por elementos finitos.

$$f_1 \times \varepsilon_1 \leq \varepsilon \tag{9}$$

A DNV (*Det Norske Veritas*), em seu código OS-F101 [45], diz que a flambagem local (flambagem da parede do tubo) implica grande deformação na seção transversal. A DNV determina duas condições de critério de carregamento que o projeto de um duto deve satisfazer como garantia da não ocorrência do colapso plástico. As equações possuem a particularidade de serem limitadas a $D/t<45$ e pressão interna maior que pressão externa ($P>P_0$). Para que os resultados de momento limite para flambagem local possam ser comparados com os resultados desta dissertação, essas equações serão extrapoladas para relações D/t maiores que 45. O resultado da extrapolação será apresentado na seção 5 (Resultados).

Para condição de carregamento controlado, tubos sujeitos à flexão, força axial efetiva e sobrepressão interna, o projeto dos tubos deve satisfazer a eq. (10) (parágrafo D500 – p. 36). Ela foi simplificada em relação à apresentada pela DNV OS-F101, pois no caso em estudo não há força axial e a variação entre pressão interna e pressão externa é inexistente. A partir desta equação é possível obter o momento máximo permitido em projeto (M_d) em função do momento plástico do material (M_p) e de fatores de segurança, como fator de classe de segurança (γ_{SC}) e fator de resistência do material (γ_m).

$$\gamma_{SC} \times \gamma_m \left(\frac{M_d}{\alpha_c \times M_p} \right) \leq 1 \tag{10}$$

onde, α_c é o fator de fluxo de tensão devido ao encruamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Os valores de γ_{sc} estão presentes na tabela 5-5 (p. 35) da DNV e será utilizado aqui com o valor de 1,138 (classe de segurança normal). Os valores de γ_m estão presentes na tabela 5-7 (p. 35), será utilizado com o valor de 1,00.

O momento plástico (M_p) resistente pode ser obtido a partir da eq. (11). Para a DNV, este momento é obtido em função da tensão de escoamento (f_y) e de fatores geométricos do tubo: diâmetro (D) e espessura (t).

$$M_p = f_y \times (D - t)^2 \times t \tag{11}$$

O fator de fluxo de tensão devido ao encruamento (α_c), pode ser obtido pelas eq. 12 e 13, e seu valor é dependente da relação D/t do tubo e da relação entre a tensão de ruptura do material (f_u) e a tensão de escoamento.

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y} \tag{12}$$

$$\beta = 0{,}4 \text{ para D/t} < 15$$

$$\beta = 0{,}4 \times \frac{\left(60 - \frac{D}{t}\right)}{45} \text{ para } 15 < \text{D/t} < 60 \tag{13}$$

$$\beta = 0 \text{ para D/t} > 60$$

Para a condição de deslocamento controlado os tubos sujeitos a deformações compressivas, momento fletor e força axial, e sobrepressão interna devem ser projetados respeitando a eq. (14).

$$\varepsilon_{dc} = \frac{\varepsilon_c}{\gamma_\varepsilon} \tag{14}$$

onde, ε_{dc} é a deformação compressiva admissível de projeto, ε_c é a deformação resistente característica e γ_ε fator de deformação resistente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A partir da eq. (15) pode-se obter o valor da deformação resistente característica (ε_c).

$$\varepsilon_c = 0{,}78 \times \left(\frac{t}{D} - 0{,}01 \right) \times \alpha_h^{-1{,}5} \times \alpha_{gw} \tag{15}$$

onde, $\alpha_h = \left(\frac{f_y}{f_u} \right)$ e α_{gw} é fator de solda.

Da mesma forma que a equação para carregamento controlado, a equação para deslocamento controlado só é válida para D/t<45 e P>P_0.

O valor para α_{gw} pode ser encontrado na Figura 21 (Figura 12-1 p. 131), sendo que ele varia conforme o aumento da relação D/t. Para valores de D/t maiores que 60, o decréscimo linear do gráfico será mantido. Para γ_ε é utilizado o valor 2,6 (classe de segurança normal e nível de inspeção não-destrutiva II), seus valores podem ser vistos na tabela 5-8 (p. 37) da DNV.

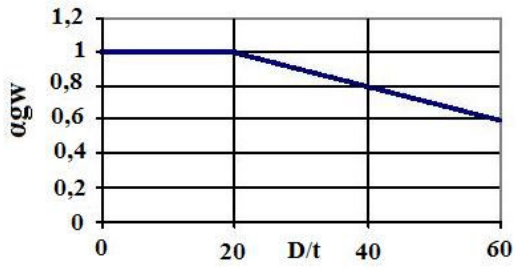


Figura 21 – Fator de junta soldada [45]

O Gráfico 2 mostra as equações para deslocamento controlado da DNV OS-F101 [45] e API 1111 [44]. Para elaboração deste gráfico foram considerados diferencial de pressão igual a zero e ovalização desprezível.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

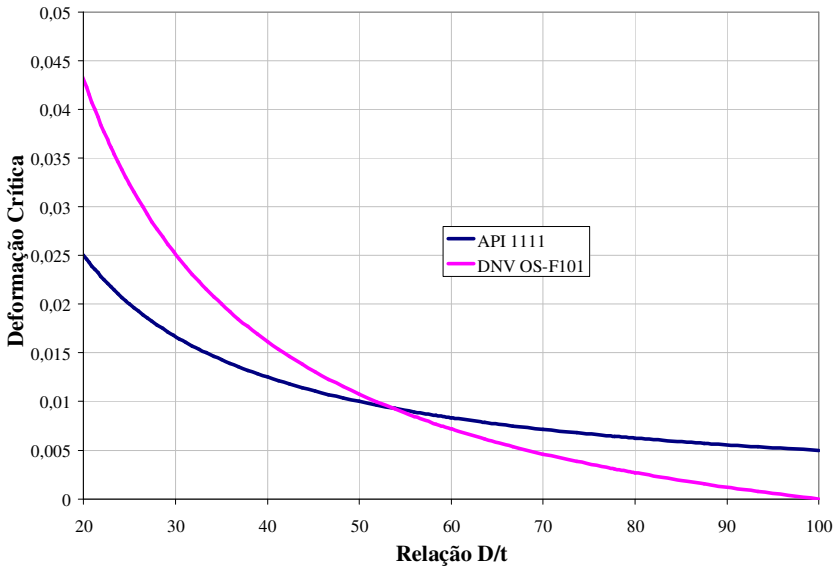


Gráfico 2 – Flambagem local sob deslocamento controlado para API [44] e DNV [45]

O gráfico foi gerado com os valores de fatores mencionados anteriormente.

Observa-se que, para baixas relações D/t, as equações do API mostram-se mais conservadoras que as da DNV para a deformação permitida sem que seja considerado colapso da estrutura. Para D/t aproximadamente igual a 55, as curvas se invertem. Mas deve ser lembrado que as equações do API só são válidas para D/t menores que 50 e as da DNV para D/t menores que 45 – a extrapolação para valores maiores do que isso levam a conservadorismos exacerbados – como se pode ver que para D/t igual a 100 a DNV não admite deformação alguma no tubo sem que seja considerada a ocorrência de colapso.

2.4 CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO OU DE REJEIÇÃO PARA ENRUGAMENTOS: CÓDIGOS UTILIZADOS

Nesta seção serão mostrados os critérios de aceitação ou de rejeição para anomalias e defeitos de geometria (rugas, vincos, dobras), em dutos, dos códigos mais utilizados. Estes definem as diretrizes básicas de projeto, materiais,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

construção, montagem, inspeção, testes e fabricação de tubulações e seus componentes, bem como requisitos de segurança aplicáveis.

Sempre serão exibidos, ao final de cada informação descrita, o parágrafo ou item e a página do código que contém a informação aqui apresentada.

2.4.1
NORMA PETROBRAS N-464 (2004) [9]

A norma interna Petrobras N-464 fixa as condições exigíveis para construção, montagem, teste, condicionamento e aceitação de dutos terrestres. Possui um item somente para requisitos de curvamento (6.8 – p. 22).

Nesse item diz-se que o tubo deve atender ao disposto nas seguintes normas (6.8.1 – p. 22):

a) para oleodutos: norma ASME B 31.4;

b) para gasodutos: normas ASME B 31.8 e ABNT NBR 12712.

Para adequação ao projeto de terraplenagem e abertura da vala, no que se refere aos raios horizontais e verticais, o raio mínimo de curvatura do tubo deve ser previamente verificado, através de um teste de qualificação, utilizando-se os tubos a serem aplicados (6.8.3 – p. 22).

O teste de qualificação deve ser realizado distribuindo, ao longo de um tubo revestido, golpes com valores progressivos de ângulo, até a ocorrência de enrugamento externamente visível ou danos observáveis no revestimento anticorrosivo. Posteriormente, o tubo testado deve ser examinado internamente, nas regiões mais tracionadas e comprimidas, para determinar o limite angular aceitável por golpe, sem que ajam danos ao revestimento, de maneira a atender aos critérios de enrugamento, ovalização e espessura de parede apresentados nesta Norma e nas normas ASME B 31.4 ou B 31.8 (6.8.3 – p. 22).

O método de curvamento deve ser previamente aprovado e satisfazer às seguintes condições mínimas de inspeção (6.8.4 – p.22):

a) a diferença entre o maior e o menor dos diâmetros externos, medidos em qualquer seção do tubo, após o curvamento, não pode exceder 2,5 % do seu diâmetro externo especificado na norma dimensional de fabricação;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

b) não são permitidos enrugamento e danos mecânicos no tubo e no revestimento;

c) a curvatura deve ser distribuída, o mais uniformemente possível, ao longo do comprimento do tubo;

d) em cada extremidade do tubo a ser curvado deve ser deixado um comprimento reto mínimo determinado na qualificação; nos curvamentos de tramos que contenham uma solda circunferencial deve ser deixado um comprimento reto mínimo de 1 m para cada lado da solda circunferencial;

e) nos tubos com costura, não é permitida a coincidência da solda longitudinal com a geratriz mais tracionada ou mais comprimida, devendo o curvamento ser executado de forma que a solda longitudinal seja localizada o mais próximo possível do eixo neutro do tubo curvado, com uma tolerância de ± 30°.

O curvamento a quente só pode ser empregado quando seu método de execução previr aquecimento uniforme por indução elétrica de alta-freqüência e resfriamento controlado. O raio da curva obtido deve atender à limitação definida pelo projeto básico, quanto ao raio mínimo para a passagem de *pig* instrumentado (6.8.6 – p.24).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.2
NBR 12712 (2002) – PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL [46]

A norma NBR 12712 fixa condições mínimas exigíveis para projeto, especificação de materiais e equipamentos, fabricação de componentes e ensaios dos sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível por dutos.

Dentes (ou mossas) e restrições quanto a tubos pré-curvados estão na seção de requisitos de qualidade industrial de fabricação (26.1.2 – p.45).

O tubo pré-curvado é obtido pelo curvamento a frio ou a quente do duto, curvamento este que produz uma deformação plástica do material (27.3.1 – p.46).

O tubo pré-curvado deve estar isento de enrugamentos, fissuras ou outras evidências de danos mecânicos (27.3.2 – p.46).

Quando no tubo pré-curvado houver uma solda circunferencial, esta deve ser inspecionada por um método não-destrutivo após o curvamento (27.3.3 – 46).

A ovalização da circunferência da seção transversal do duto pré-curvado deve ser controlada, de forma que não haja danos à integridade estrutural do tubo ou que possa provocar futuros problemas operacionais no gasoduto (27.3.4 – p.46).

A diferença entre o maior e o menor dos diâmetros externos, medidos em qualquer seção do tubo pré-curvado, não pode ultrapassar 5% do seu diâmetro externo especificado na norma dimensional de fabricação (27.3.5 – p. 46).

2.4.3
CÓDIGO DE REGULAMENTAÇÃO DOS EUA – *TITLE* 49 [47]

A seção 192 (p. 27) do código de regulamentação dos EUA rege sobre transporte de gás natural e outros gases por meio de dutos. A parte 192.313 versa sobre sobre restrições quanto a fabricação de curvas e joelhos (p. 53).

Para este código, toda curva de campo em tubos de aço que não seja um *wrinkle bend* deve estar de acordo com os seguintes requisitos:

- a curva não deve impactar na operação do tubo;
- toda curva deve possuir um contorno suave e ser livre de *buckling*, trincas, ou qualquer outro dano mecânico;
- tubos que possuam solda longitudinal devem ter sua solda posicionada o mais próximo possível da linha neutra da curva, a não ser que a curva seja produzida com um mandril interno ou que o tubo possua diâmetro nominal menor que 12” ou relação D/t menor que 70;
- as soldas circunferenciais existentes na região de deformação plástica durante o curvamento devem ser inspecionadas por ensaios não-destrutivos antes e depois do processo de curvamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Na parte 192.315 (p. 60) o código comenta sobre a permissão do uso de *wrinkle bends*, com as restrições de que sua pressão de operação não deve induzir a tensões circunferenciais (*hoop stress*) iguais ou maiores que 30% de SMYS. Além disso, não deve possuir dobras agudas e a distância entre um *wrinkle* e outro deve ser de no mínimo um diâmetro do tubo. Em tubo de diâmetro externo de 16" ou maior a curva não deve ter deflexão superior a 1,5° para cada *wrinkle* e, se houver solda longitudinal no tubo esta, deve estar localizada próxima à linha neutra da curva.

A seção 195 (p. 152) é voltada para transporte de líquidos perigosos por dutos. Na parte 195.212 (p. 173) fala-se sobre o curvamento do tubo. Os requisitos para curvamento de campo são os mesmos da seção 192, com exceção da permissão da existência de *wrinkle bends*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.4
AS 2885.1 (2007) – *PIPELINES GAS AND LIQUID PETROLEUM – DESIGN AND CONSTRUCTION* [48]

O código AS 2885.1 tem origem australiana e seu propósito é assegurar proteção ao público em geral, operadores de dutos e meio ambiente, e para garantir operação segura de dutos que trabalham em altas temperaturas com hidrocarbonetos. Este código atinge seus propósitos definindo princípios para projeto, construção e operação de dutos. Estes princípios estão expressos em regras práticas e guias para uso por pessoas e organizações competentes.

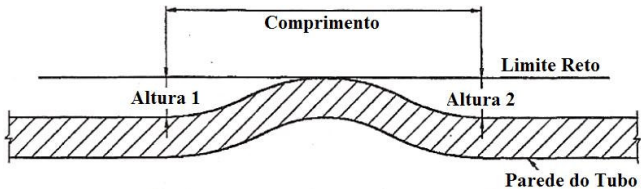
Por *buckle* entende-se uma irregularidade inaceitável na superfície do tubo causada por tensões compressivas (1.10.4 – p. 8).

Há uma seção só para curvas a frio de campo (6.6 – p. 61). Nela são descritas generalidades (6.6.1 – p. 61) e informações sobre a qualificação de procedimento de curvas a frio de campo (6.6.2 – p. 62). Nesta mesma seção existe um item para limite de aceitação de curvas de campo (6.6.3 – p. 61). Nela é dito que, baseado em um programa de testes específicos, os limites de aceitação de curvas de campo podem ser aprovados por uma autoridade de operação, caso contrário os limites de aceitação são:

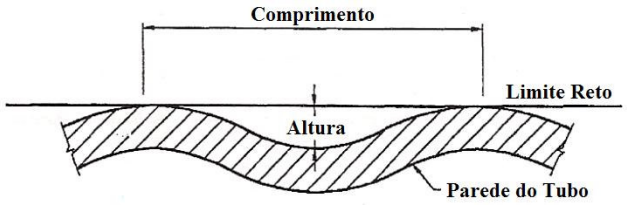
a. A altura de nenhum *buckle* deve exceder 5% do comprimento pico a pico mostrado na Figura 22;

b. A ovalização não deve exceder 5% do diâmetro interno do tubo;

c. A deformação superficial não deve exceder a deformação limite do revestimento em uso ou 10%, a que for menor.



(a)



(b)

Figura 22– Referência do código AS 2885. (a) para um *buckle* só, e (b) dimensões para dois ou mais *buckles* [48]

Na Figura 22 (a) a altura é a média entre a altura 1 e 2, medidas nos extremos do comprimento do enrugamento. E o comprimento é a medida que contém o enrugamento em toda sua extensão longitudinal.

Já na Figura 22 (b) a altura é a diferença de elevação entre pico-vale de dois enrugamento e o comprimento é a distância pico a pico do enrugamento ou a medida que contém o enrugamento em toda sua extensão longitudinal.

2.4.5
DNV OS-F101 (2000) – *SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS* [45]

A DNV (*Det Norske Veritas*) fundação norueguesa autônoma e independente fundada em 1864, apresenta o código OS-F101 que fornece critérios e guias para o projeto, materiais, fabricação, instalação, teste, comissionamento,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

operação, manutenção, requalificação, e abandono (alienação) de sistemas de dutos.

Os objetivos deste código são: prover um padrão de aceitação internacional de segurança para dutos submarinos, definindo requisitos mínimos para projeto, material, fabricação, instalação, teste, comissionamento, operação, manutenção, requalificação, e abandono; servir como documento de referência técnica em contratos; servir como guia para projetistas, contratantes e contratados.

A DNV OS-F101 define *local buckling* como *buckling* restrito a um pequeno comprimento do duto causando uma grande mudança na seção transversal do mesmo; colapso, *wrinkling* localizado na parede e dobras são exemplos (C205 – p. 3).

A ovalização máxima permitida é de 3%, incluindo as tolerâncias de fabricação e o achatamento provocado pela flexão do tubo, a eq. (16) mostra o método de cálculo da ovalização, segundo a DNV (D800 – p. 39).

$$f_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \tag{16}$$

onde, $D_{\max}$ e $D_{\min}$ são respectivamente o maior e o menor valor medido do diâmetro interno ou externo em uma mesma seção do tubo.

Para dutos que sofreram deformação de flexão, a ovalização final pode ser estimada pela eq. (17) (F1400 – p. 132).

$$f_0' = f_0 + \frac{\left(0{,}0015 \times \left(1 + \frac{D}{120 \times t}\right)\right)\left(\frac{2 \times \varepsilon_c \times D}{t}\right)^2}{\left(\frac{1 - P_e}{P_c}\right)} \tag{17}$$

onde, D é o diâmetro externo nominal, ε_c é a deformação, t é espessura nominal do duto, P_e é a pressão externa e P_c é a pressão característica de colapso.

Curvas gomadas e *wrinkle bends* não são permitidas (G106 – p. 79).

Os métodos aceitáveis de curvamento são: a frio, a quente, indução ou por forjamento. Mas é preferível a utilização do método por indução (G105 – p. 79).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Curvas a frio devem sofrer alívio de tensões quando a deformação total exceder 3% (G505 – p. 81).

Deve ser realizada 100% de inspeção visual da área externa e regiões acessíveis da parte interna do tubo (G804 – p. 83).

Os tubos devem ser livres de *gouges*, indentações, *dents*, *wrinkles*, *bulges*, *kinks* e descamamento de superfície. Trincas não são permitidas.

Buckles menores no raio interno do tubo podem ser aceitáveis, se a altura e a profundidade (pico-vale) do *buckle* não exceder 1% do diâmetro interno e a razão comprimento/profundidade do *buckle* for maior que 12. As distâncias entre os *buckles* menores devem ser maiores que 1 (um) diâmetro interno do tubo (G805 – p.83).

Define *dent* como uma depressão que produz uma distorção na curvatura da parede do tubo e que resulta numa variação do seu diâmetro nominal maior que 2%. A análise de integridade com remoção ou o reparo de *dents* deve ser considerada quando afetar a solda longitudinal ou circunferencial.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.6
API 1160 (2001) – *MANAGING SYSTEM INTEGRITY FOR HAZARDOUS LIQUID PIPELINE* [49]

O código API 1160 é aplicado a sistemas de dutos utilizados para o transporte de líquidos perigosos. Seu uso não está limitado aos fluidos perigosos listados, isto é, os princípios existentes em seu conteúdo de gerenciamento de integridade são aplicáveis a todos os sistemas de dutos. Este código foi especificamente desenvolvido para prover ao operador uma descrição das comprovadas práticas em gerenciamento da integridade de dutos.

No seu apêndice A (p. 43) são exibidas definições sobre tipos de anomalias, causas e preocupações que podem ocorrer em um sistema de dutos. Neste apêndice é dito que *wrinkle bends / Buckles* é uma deformação local na parede do tubo causada por tensões longitudinais compressivas no tubo, caracterizada por uma pequena flambagem externa ou uma assimetria interna. *Buckle* é um *wrinkle* que avançou no regime pós *wrinkle*. O *Buckle* é caracterizado por uma grande deformação da parede do tubo com amplitudes superiores a 1 polegada (A.2.5 – p.

45). Esta determinação de um valor para o *Buckle* não se caracteriza como aceitação, apenas como classificação do que vem a ser considerado como *Buckle*. Neste código não são descritos critérios de aceitação ou rejeição para *wrinkle*, *wrinkle bends* ou *Buckles*.

Marcas de mandril de curvas de campo são associadas ao curvamento do tubo. Curvas de campo podem conter marcas de mandril de até 1/8 polegada sem afetar a vida em serviço da grande maioria dos dutos (A.2.9 – p. 46).

2.4.7
API 1163 (2005) - *IN-LINE INSPECTION SYSTEMS QUALIFICATION STANDARD* [50]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

O API Standard 1163 cobre o uso de sistema *in-line inspection* para dutos *offshore* e *onshore* de gás e líquidos perigosos.

É um código que fornece requisitos baseados em desempenho para sistemas *in-line inspection*, incluindo procedimentos, pessoal, equipamentos e software.

Em seu corpo a norma possui definições para os termos *buckle*, *ripple*, *wrinkle* e *wrinkle bend* (4 – p. 2).

Buckle é definido como a condição onde o duto passou por suficiente deformação plástica a ponto de causar *wrinkle* permanente ou deformação da parede do tubo ou ainda, deformação na seção transversal do tubo (4.10 – p. 2).

Wrinkle é um *bulge* suave e localizado, visível na parte externa da parede do tubo. O termo wrinkle é muitas vezes restrito a *wrinkle* ou *bulges* com altura maior que uma espessura de parede do tubo (4.124 – p. 6).

Ripple é um *wrinkle* suave ou *bulge* suave, visível na parte externa do tubo. O termo *ripple* é muitas vezes restrito a *wrinkle* ou *bulges* com altura inferior a 1,5 vezes a espessura de parede do tubo (1,5t) (4.105 – p. 5).

2.4.8
ISO 13623 (2000) – *PETROLEUM AND NATURAL GAS INDUSTRIES PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS* [51]

O padrão internacional ISO 13623 especifica requisitos e fornece recomendações para projeto, materiais, construção, teste, operação, manutenção e abandono (alienação) de sistemas de duto usados para transporte da indústria de petróleo e gás natural.

Pode ser aplicado a dutos em terra e *offshore*, conexões de poços, plantas de produção, plantas de processo, refinarias e instalações para armazenamento. Somente tem validade para dutos metálicos rígidos.

O padrão diz que curvas podem ser feitas a partir de tubos por curvamento a quente, a frio ou por indução. Os requisitos para tais curvas são, entre outros listados na norma (8.3.2 – p. 34):

- o material do tubo deve ser 100% acalmado;
- a ovalização não deve exceder 2,5% do diâmetro externo;
- *wrinkling* não são permitidos;
- todas as áreas da curva devem obedecer aos requisitos de espessura de parede mínima do tubo adjacente.

Este documento menciona que mudanças na geometria da parede do tubo, tais como ovalização e *wrinkles* não são considerados deterioração do duto.

É definido que um dos modos de *buckling* que deve ser considerado no projeto é o *buckling* local do tubo devido à pressão externa, tensão axial ou compressão, curvamento e torção ou combinação destes carregamentos.

Para execução de curvas, o tubo pode ser curvado a frio no campo de forma a adequar a linha do tubo com as condições topográficas da região. Curvas de campo devem ser feitas em curvadeiras que promovam apoio suficiente à seção transversal de maneira a prevenir o aparecimento de *buckling* ou *wrinkling* na parede do tubo e para manter a integridade do revestimento. A norma fornece, ainda, algumas condições mínimas para raio de curvatura (10.6.2 – p. 49):

- 20D para tubos com diâmetro externo menor que 200 mm;
- 30D para tubos com diâmetro externo de 200 mm a 400 mm;
- 40D para tubos com diâmetro externo maior que 400 mm;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Existe a ressalva de que os raios podem ser menores que os anteriormente descritos se, após o curvamento, a ovalização não for grande e a espessura de parede não for menor que a permitida pelo projeto, e as propriedades do material se enquadrarem nos requisitos de tenacidade especificados para o duto.

A curva deve ser livre de *buckling*, trincas e outras evidências de danos mecânicos. Quando tubos com diâmetros acima de 300 mm e com relação D/t menor que 70 são utilizados no curvamento a frio, deve ser considerada a utilização de um mandril interno ao tubo durante o curvamento (10.6.2 – p.50).

2.4.9
ASME *CODE FOR PRESSURE PIPING*, B31

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

É subdividido em seções aplicáveis a uma área específica da indústria. Cada uma das seções possui seu respectivo comitê responsável. O projeto B31 foi criado em 1926 a pedido do ASME pela *American Standards Association* (ASA). O primeiro código de tubulações foi publicado em 1935 com o nome de *American Tentative Standard Code for Pressure Piping*. A intenção inicial era publicar um código que atendesse ao tema Tubulações. Posteriormente cada seção passou a ser emitida de forma independente, devido à dificuldade em se criar um consenso para avaliação de criticidade das tubulações. Neste momento então, decidiu-se por separar os códigos em seções especializadas (1955) [52]. A seguir serão vistos comentários sobre enrugamento nas seções do código ASME B31.

2.4.9.1
ASME B31.3 (2006) – *PROCESS PIPING* [20]

A seção B31.3, *Process Piping*, foi desenvolvida considerando tubulações tipicamente encontradas em refinarias de petróleo, plantas químicas, farmacêuticas, têxteis, para celulose e criogênica, e também plantas de processo correlatas e terminais.

No tópico para Tubos sob Altas Pressões, é mencionado que o tubo pode ser curvado a quente ou a frio, de acordo com o procedimento, em qualquer curvatura desde que o processo resulte em uma superfície livre de trincas e *buckles* (K.332.1 – p. 126).

2.4.9.2

ASME B31.4 (2006) – *PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS* [53]

O código B31.4 prescreve requisitos para projeto, materiais, construção, união, inspeção e teste de tubos transportando óleo cru, condensado, gasolina, gás natural líquido e liquefeito de petróleo, dióxido de carbono, álcool líquido e produtos líquidos de petróleo entre a armazenagem de produção (*producers' lease facilities*) e pontos de entrega ou de recebimento. Os requisitos para dutos *offshore* podem ser encontrados no capítulo IX.

Esta norma apresenta uma definição para *buckle*, que é uma condição na qual o duto passou por suficiente deformação plástica, a ponto de existir a formação permanente de *wrinkling* na parede do tubo, ou excessiva deformação causada por esforços atuando sozinhos ou combinados com a pressão hidrostática (400.2 – p. 4).

Na parte de projeto diz-se apenas que *wrinkle bends* não devem ser utilizadas (406.2.4 – p. 22).

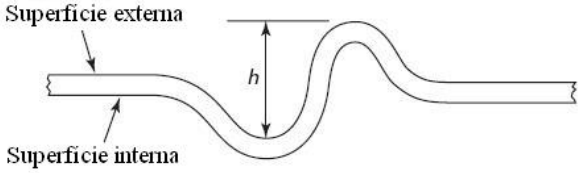
No capítulo de operação e manutenção é dito que para pequenos *ripples*, isto é, incipientes *buckles* ou *wrinkles*, que não exibirem trincas, o reparo não é necessário desde que a dimensão pico-vale, h, não ultrapasse um dos critérios para a tensão circunferencial máxima de operação (MOHS – *maximum operating hoop stress*), S. Os critérios podem ser vistos na Figura 23. Quando um grupo de *buckles*, *ripples*, ou *wrinkles* localizados próximos uns aos outros for encontrado, a limitação de 'h' deve ser atribuída ao maior pico-vale encontrado (451.6.2.8 – p. 60).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

(a)

Tensão Circunferencial Máxima de Operação, S	$\left(\frac{h}{D}\right) \times 100$ Não pode ultrapassar
≤ 20,000 psi (138 MPa)	2
> 20,000 psi (138 MPa) but ≤ 30,000 psi (207 MPa)	$\left(\frac{30{,}000 - S}{10{,}000} + 1\right)$
> 30,000 psi (207 MPa) but ≤ 47,000 psi (324 MPa)	$0.5\left(\frac{47{,}000 - S}{17{,}000} + 1\right)$
> 47,000 psi (324 MPa)	0.5

(b)



onde,

D = Diâmetro externo do tubo, polegada (mm)
h = Altura pico-vale do ripple, polegada (mm)
S = Tensão circunferencial máxima de operação, psi (145 S, MPa)

Figura 23 – Critério para enrugamento – B31.4 [53]

2.4.9.3
ASME B31.8 (2007) - *GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEMS* [54]

O código ASME B31.8 cobre o projeto, fabricação, instalação e teste de facilidades de dutos usados no transporte e distribuição de gás. Este código também cobre aspectos de segurança de operação e manutenção destas facilidades.

Neste código, a curva deve ser livre de buckling, trincas, ou outra evidência de dano mecânico (841.231 (a) – p. 36).

O código apresenta ainda um limite máximo de ângulo que a curva a frio de campo deve possuir. Devem ser respeitados os dois limites, de deflexão longitudinal do eixo e de raio mínimo de curvamento, apresentados na Tabela 1 (841.231 (b) – p. 36)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Mas, no item 841.231 (c) diz que o raio da curva pode ser menor que o permitido pela Tabela 1 se a curva cumprir todos os outros requisitos da norma.

Tabela 1 – Determinação do ângulo máximo da curva

Diâmetro nominal do tubo	Deflexão longitudinal do eixo (°)	Raio mínimo da curva em diâmetro de tubo
< 12	-	18D
12	3,2	18D
14	2,7	21D
16	2,4	24D
18	2,1	27D
> 20	1,9	30D

Segundo este código as *wrinkle bends* são permitidas somente em sistemas que operam sob tensões menores que 30% do SMYS (841.231 (g) – p. 36). A presença de *kinks* como *wrinkle bends* não são permitidas. O espaçamento entre os *wrinkles* deve ser medido no tubo ao longo de seu comprimento. A distância pico a pico entre *wrinkles* deve ser maior que um diâmetro do tubo. Para tubos com diâmetro nominal superior a 16", inclusive, cada *wrinkle* formado não deve produzir um ângulo superior a 1,5 graus.

Não é aceita a permanência/utilização de *wrinkle bends* para serviço com gás ácido (*sour gas*) (B841.231 – p. 36).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.9.4

ASME B31.8S (2004) - *MANAGING SYSTEM INTEGRITY OF GAS PIPELINES SUPPLEMENT TO ASME B31.8* [55]

O ASME B31.8S é aplicada a sistemas de gasodutos *onshore* constituídos de material ferroso.

Este código descreve um processo que um operador de um sistema de dutos pode utilizar para julgar e mitigar riscos de forma a reduzir a probabilidade e as conseqüências de um acidente. Foi especialmente desenvolvido para prover o

operador com a informação necessária para desenvolver e implementar um programa efetivo de gerenciamento da integridade, utilizando práticas e processos comprovados pela indústria.

Neste código, *wrinkle bend* é definido como uma curva produzida por uma máquina de campo ou por processo controlado que pode resultar em descontinuidades de contornos abruptos no raio interno de um tubo curvado (13 – p. 36).

Wrinkle ou *Buckles* são causados por carregamentos compressivos e também pelo assentamento do duto (6.2.3 – p. 17). O método de reparo a ser empregado é a substituição (table 4 – p. 22).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.10
PDAM (2003) [56]

O PDAM descreve procedimentos e práticas para avaliação de anomalias e defeitos em sistemas de dutos.

Este manual possui uma seção com definições sobre *wrinkle* (19.1 – p. 55). Nele *wrinkle* é definido como um pequeno cume ou *ripple* na suavidade da superfície do tubo. Um *wrinkle* é um pequeno, *buckle* local.

A seção 19.6 (p. 59) afirma que *buckling* é um tipo de falha estrutural. *Wrinkles* e *buckles* causam concentração local de tensão e deformação.

A seção 28.1 (p. 245) define *wrinkle* da mesma forma que a seção 19.1, mas complementa dizendo que *wrinkle* é formado quando o tubo é curvado. Também define *wrinkle bend* como uma curva formada a frio onde ocorre deformação plástica (*buckling* local), produzindo *wrinkles* superficiais.

Possui uma seção (28.22 – p. 255) exclusiva para tratar sobre *wrinkles* (*buckles*) e *wrinkle bends*. Esta seção possui alguns itens em sua abordagem:

- *wrinkles* e *buckles* são associados a altas deformações e são fontes de concentração de tensão e deformação;
- refere-se à definição de *wrinkle* do API 1160;
- *wrinkles* ocorrem em grupo. *Wrinkles* adjacentes podem interagir. Carregamentos cíclicos axiais podem ser mais

significantes que ciclos de pressão interna, devido à orientação do enrugamento;

- *wrinkles* estarão associados à ovalização da seção transversal do tubo e é importante assegurar que o efeito da ovalização está sendo levado em consideração;
- descreve considerações de *wrinkles bends* dos códigos ASME B31.4 e B31.8;
- *wrinkles* podem afetar a integridade estrutural da linha, quando esta é vista sob uma perspectiva de longo prazo, principalmente se o duto for submetido a carregamentos cíclicos.
- usar a referência Rosenfeld *et al*. [21] para orientação sobre uma forma alternativa de avaliação de *wrinkles* e *ripples* em curvas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.4.11
CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Nesta seção são unificados os conceitos dos defeitos que serão vistos nesta dissertação. Também é apresentado um quadro resumo com as considerações sobre os defeitos de cada norma já apresentada.

As traduções para os termos definidos nas normas são mostrados no Quadro 1 [57].

Quadro 1 – Tradução de Termos

Termo em Inglês	Termo Traduzido Através de Referência [57]	Termo segundo a autora
Ripple e mild ripple	Ondulação, ruga, prega, encrespado	Enrugamento suave
Wrinkle	Ruga, crespo, vinco, prega	Enrugamento
Wrinkle bending	Curvatura por rugas	Curva que possui enrugamento
Buckle	Flambagem, empenamento, distorção, deformação	Flambagem
Kink	Dobradura, dobra, volta, prega, beirada	Dobra

O Quadro 2 apresenta um resumo dos critérios de aceitação do enrugamento contidos nos códigos já descritos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Quadro 2 – Resumo da Aceitação de Enrugamento nos Códigos

Código	Enrugamento
N-464	Não são permitidos.
DNV OS-F101	Aceitáveis no raio interno se: • profundidade < 1% diâmetro interno; • razão comprimento diâmetro maior que 12:1; • distância entre enrugamentos > 1 diâmetro nominal.
API 1160	Não define aceitação/rejeição.
ISO 13623	Não são permitidos.
NBR 12712	Não são permitidos.
B31.3	Não são permitidos.
B31.4	Permitidos para: • S ≤ 20.000 psi se $\left(\frac{h}{D}\right)\times 100 \le 2$ • 30.000 ≤ S > 20.000 psi se $\left(\frac{h}{D}\right)\times 100 \le \left(\frac{30.000-S}{10.000}+1\right)$ • 47.000 ≤ MOHS > 30.000 psi se $\left(\frac{h}{D}\right)\times 100 \le \left(\frac{47.000-S}{17.000}+1\right)\times 0{,}5$ • S > 47.000 psi se $\left(\frac{h}{D}\right)\times 100 \le 0{,}5$
B31.8	Permitidos em sistemas com MAOP < 30% SMYS se: • passo pico-a-pico ≥ D; • para D ≥ 16” cada enrugamento não deve produzir ângulo > 1,5°.
B31.8S	Não define aceitação/rejeição.
API 1163	Não define aceitação/rejeição.
AS 2885.1	Permitidos se: • a altura deve ser inferior a 5% do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Código	Enrugamento
	comprimento pico a pico; • a ovalização não deve exceder 5% do DI; • deformação superficial não exceder a deformação limite do revestimento ou 10%, a que for menor.
CÓDIGO DE REGULAMENTAÇÃO DOS EUA – *TITLE* 49 Seção 192	Permitidas *wrinkle bends* se: • MAOP induzir tensões circunferenciais (hoop stress) menores ou iguais a 30% de SMYS. • não deve possuir dobras agudas; • a distância mínima entre wrinkle deve ser de um diâmetro do tubo; • em tubo de diâmetro externo de 16" ou maior a curva não deve ter deflexão superior a 1,5° para cada wrinkle.
CÓDIGO DE REGULAMENTAÇÃO DOS EUA – *TITLE* 49 Seção 195	Não são permitidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.5
FALHAS DECORRENTES DO ENRUGAMENTO

Um duto que tenha curvas apresentando enrugamento poderá sofrer redução em sua vida útil devido a 3 modos de falha em serviço: corrosão, ruptura estática e fadiga. Nesta seção são apresentados e discutidos estes modos de falha.

2.5.1
CORROSÃO

O dano por corrosão que pode vir a ser significativo, além da perda localizada de espessura, é a corrosão sob tensão (CST), em inglês *stress corrosion cracking* (SSC). Este dano ocorre em virtude da introdução de tensões residuais provenientes do processo de curvamento. Nesta seção será explicado de forma sintética este mecanismo de dano, uma vez que não será objeto de estudo do presente trabalho.

A corrosão sob tensão considera o efeito combinado das tensões mecânicas e do meio corrosivo que leva o material metálico ao trincamento, porém a uma tensão muito inferior a que o metal resistiria em meio não corrosivo [58, 59]. Somente a tensão ou o meio corrosivo, isoladamente, não é suficiente para causar o trincamento.

Neste fenômeno, as tensões podem ser residuais ou atuantes. As residuais são, geralmente, oriundas de operações de soldagem e deformação a frio, como estampagem e dobramento, tal qual o curvamento de campo. As tensões atuantes resultam da aplicação de esforços sobre a peça, como por exemplo, tração e flexão. Uma característica importante da CST é que não se observa praticamente perda de massa do material, que permanece com bom aspecto até a ocorrência da fratura. A CST não apresenta nenhum tipo de produto da corrosão. Normalmente apresenta forma de microtrincas ramificadas, intergranulares ou transgranulares [60, 58].

O tempo necessário para ocorrer a fratura por CST em um material metálico depende de vários fatores: tensão, concentração ou natureza do meio corrosivo, temperatura, estrutura e composição do material. Geralmente o material com microestrutura de grãos refinados é mais resistente à CST do que o mesmo material com grãos maiores [60].

A estrutura cristalina também influencia a CST. O aço inoxidável ferrítico (estrutura cúbica de corpo centrado) é muito mais resistente à corrosão sob tensão, quando exposto a soluções aquosas de cloreto, do que o aço inoxidável austenítico (cúbica de face centrada) [58, 60]. Metais puros são geralmente imunes à corrosão sob tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Vale ressaltar que o mecanismo de CST está associado ao meio corrosivo onde o duto se encontra (região por onde passa o duto), às tensões presentes no tubo e a suscetibilidade do material. A influência do meio corrosivo está relacionada à presença de falhas no revestimento e limitações no sistema de proteção catódica [61]. A CST é reconhecida como mecanismo de falha em dutos de óleo e gás de alta pressão desde a década de 1960 [59].

Por ser uma região de grande tensão residual e sujeita a concentração de tensão o enrugamento torna-se um ponto favorável ao desenvolvimento da CST.

2.5.2
RUPTURA ESTÁTICA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Entende-se por ruptura estática a falha por ruptura de um segmento de duto quando este é solicitado, por incrementos monotônicos de pressão interna. A ruptura ocorre quando as tensões superam o limite de tração do material [62].

A aplicação, para verificar a resistência a uma determinada carga, pode ser uma única vez, como o caso do teste hidrostático, em que uma sobrepressão à pressão de projeto é aplicada no tubo.

O enrugamento, por ser um concentrador de tensão, fará com que localmente as tensões sejam superiores ao restante do tubo. Assim, o enrugamento torna a região, em que se encontra, propícia para ocorrência da falha por ruptura estática. A falha irá ocorrer a pressões inferiores a pressão que provocaria ruptura no tubo sem enrugamento.

2.5.3
COLAPSO PLÁSTICO PROGRESSIVO

Colapso plástico progressivo ou *ratcheching* é a falha provocada por cargas que produzem deformações plásticas a cada vez que são aplicadas. Nesta seção, este mecanismo de dano será explicado de forma sintética, uma vez que não será objeto de estudo do presente trabalho.

O fenômeno *shakedown* ocorre quando um carregamento é aplicado pela primeira vez em um equipamento e alguma deformação plástica é experimentada, mas nos carregamentos subsequentes apenas deformação elástica é observada.

Quando nas aplicações de carga subsequentes continua-se a observar deformação plástica, em cada ciclo haverá uma deformação plástica adicional acumulada, a este comportamento dá-se o nome de *ratcheching*.

Durante a fase de projeto evita-se trabalhar com tensões que provoquem o *ratcheching*, mas durante a fabricação de dutos curvados a frio é possível criar uma condição para que o duto passe a operar em *ratcheching*.

2.5.4
FADIGA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Cargas ou deformações que não causam falha em uma única aplicação, e que são inferiores aos limites de escoamento ou resistênciaà tração do material, podem resultar em fratura quando aplicadas repetidamente. Este processo de fratura sob cargas cíclicas, ou variáveis no tempo, é chamado de fadiga [63, 64, 65, 66, 67]. A fratura pode ocorrer após alguns poucos ciclos ou após milhões de ciclos. A fadiga é conseqüência de esforços alternados, que induzem o nascimento e causam a propagação de trincas. Estas trincas são geralmente iniciadas na superfície dos materiais.

Para análise de fadiga são necessárias tensões variáveis e número de variação (ciclos). Cada variação de tensão pode ser dividida em duas componentes: uma tensão média, σ_m (eq. (18)), e uma componente alternada, σ_a (eq. (19)).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \tag{18}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{19}$$

onde, $\sigma_{\max}$ e $\sigma_{\min}$ representam as tensões alternadas máxima e mínima, respectivamente.

A gama de tensões é representada por $\Delta\sigma$ e pode ser vista na eq. (20).

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 \times \sigma_a \tag{20}$$

A razão entre as duas tensões mínima e máxima ($\sigma_{\min}$ e $\sigma_{\max}$) é simbolizada por Ra , eq.(21).

$$Ra = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{21}$$

A fadiga é chamada de alto número de ciclos quando o número de ciclos até a fratura ultrapassa valor determinado, por exemplo, 10^4 ou 10^5 ciclos. A fadiga de baixo número de ciclos ocorre para tensões e deformações predominantemente plásticas, com fratura ocorrendo com menos de 10^4 ou 10^5 ciclos [64]. As tensões máximas na fadiga de "baixo ciclo" são geralmente maiores, o que aumenta a importância dos efeitos não lineares. Nesta situação o principal parâmetro controlador da resistência à fadiga é a tenacidade do material [68].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.5.4.1
MÉTODO SN

As curvas de Wohler ou SN, representam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseiam-se no registro da tensão aplicada (S) em função do número de ciclos para a ruptura (N) [63, 64, 65, 66, 67, 69].

O método SN serve para prever a iniciação de trincas ou fratura por fadiga sob tensões macroscópicas elásticas. Assim, sua utilização se restringe a quando as tensões máximas forem menores que o limite de escoamento do material [68, 69].

Wohler descobriu que a resistência à fadiga (S_f) decresce com vida N (número de ciclos), e na maioria das vezes seguindo uma relação exponencial, como pode ser observado na eq. (22) [68].

$$N \times S_f \times B = C \tag{22}$$

Uma típica curva SN é mostrada na Figura 24. A resistência a fadiga é mostrada no eixo das ordenadas e seu número de ciclos é mostrado no eixo das abscissas [69].

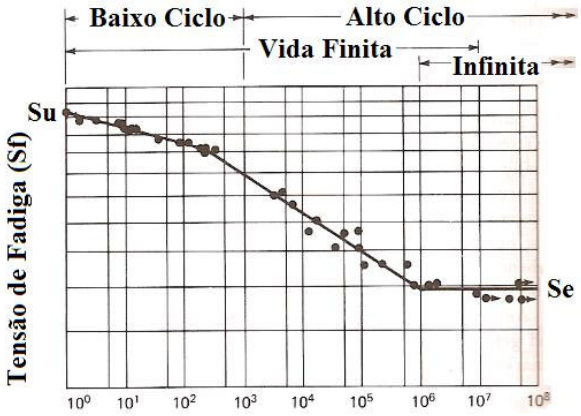


Figura 24 – Típico diagrama SN [69]

Os fatores que afetam as tensões macroscópicas no ponto crítico, como entalhes e acabamento superficial, devem ser levados em consideração. Fatores que atuam microscopicamente, como microestrutura, não atuam como modificadores das tensões macroscópicas [68].

A causa primária da iniciação de uma trinca por fadiga é a variação das cargas de serviço, mas o valor da tensão média também pode influir significativamente no processo. As tensões médias compressivas são consideradas benéficas para a preservação da vida em fadiga, já as tensões médias trativas influenciam de forma maléfica a vida em fadiga [68]. Gerber, Goodman e Soderberg desenvolveram modelos teóricos para incluir o valor da tensão média na vida, que podem ser observados na Figura 25 [68, 69].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

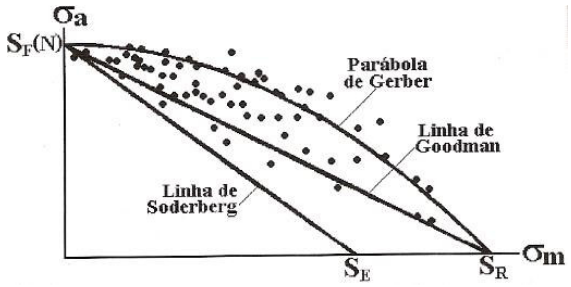


Figura 25 – Diagrama de Gerber, Goodman e Soderberg [68]

Goodman é a proposição mais utilizada, eq. (23), mas tende a ser conservadora, o modelo de Gerber, eq. (24), tem bom ajuste a testes experimentais e a proposta de Soderberg, eq. (25) é extremamente conservadora.

$$\frac{\sigma_a}{S_f(N)} + \frac{\sigma_m}{f_u} = 1 \tag{23}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_f(N)} + \left(\frac{\sigma_m}{f_u}\right)^2 = 1 \tag{24}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_f(N)} + \frac{\sigma_m}{f_y} = 1 \tag{25}$$

onde, f_u é a resistência à ruptura, f_y é a resistência ao escoamento e $S_f(N)$ é a resistência à fadiga para um número de ciclos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

2.5.4.2
MÉTODO εN

O método εN de projeto à fadiga correlaciona $\Delta\varepsilon$ – a gama das deformações que atuam no ponto crítico da peça – com N, o número de ciclos referente ao início de uma trinca ou fratura por fadiga [68].

Toda modelagem εN baseia-se numa análise elastoplástica de tensões e em quatro relações semi-empíricas que visam quantificar [68]:

- os laços de histerese elastoplástica associados ao encruamento cíclico do material (relação $\Delta\sigma \times \Delta\varepsilon$);

- o efeito dos entalhes (concentradores de tensões), relacionando as tensões e as deformações elastoplásticas nominais ($\Delta\sigma_n$ e $\Delta\varepsilon_n$) com as máximas tensões e deformações, que ocorrem nas raizes dos entalhes ($\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$);
- a vida em fadiga N (em número de ciclos) associada à gama de deformações $\Delta\varepsilon$ (relação $\Delta\varepsilon \times N$);
- o dano em fadiga provocado por uma causa real.

As principais vantagens do método εN são [68]:

- usar um parâmetro diretamente mensurável;
- prever qualquer vida em fadiga, inclusive as curtas (alto e baixo ciclo);
- Quantificar efeitos plásticos induzidos por sobrecargas;
- Quantificar os efeitos de sequência da carga induzidos por plasticidade.

As principais desvantagens do método εN são [68]:

- usar equações não-inversíveis, só solúveis por métodos numéricos;
- requerer a aplicação seqüencial e corrigida das equações $\Delta\sigma\Delta\varepsilon$ na modelagem dos laços de histerese, a qual deve respeitar os limites físicos do comportamento do material.

O método εN só difere do SN porque trabalha com deformações e quantifica os eventos elasto-plásticos.

Neuber provou que, na torção de peças prismáticas, elásticas não-lineares e sob deformações pequenas, o produto do fator de concentração de deformação elasto-plástico e do fator de concentração de tensão elastoplático é constante [68]. Para cargas cíclicas a regra de Neuber é mostrada na eq. (26).

$$SCF^2 = \frac{\Delta\sigma\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma_n\Delta\varepsilon_n} \tag{26}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

Nesta equação é proposto um fator de concentração de tensão (SCF), de ordem 2. O SCF^2, ou P_{Neuber}, é obtido a partir da razão entre o produto da gama de tensão ($\Delta\sigma$) e gama de deformação ($\Delta\varepsilon$), encontrada na região de concentração de tensão, pelo produto da gama de tensão nominal ($\Delta\sigma_n$) e gama de deformação nominal ($\Delta\varepsilon_n$), sem a presença do concentrador de tensão.

A eq. (27) é apenas uma modificação na eq. (26), substituindo o $\Delta\varepsilon_n$ pelo produto $E\times\Delta\sigma_n$.

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon = P_{Neuber} = SCF^2 \times \frac{\Delta\sigma_n^2}{E} \tag{27}$$

Uma maneira simples de modelar o encruamento da curva σε real é assumir que qualquer deformação ε tem uma componente elástica (ε_{el}) e outra plástica (ε_{pl}). Um dos modelos mais simples e úteis é o de Ramberg-Osgood, que assume que ε_{el} é linear e ε_{pl} é exponencial, eq. (28) [68].

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{h}} \tag{28}$$

Este modelo se ajusta bem às curvas σε de vários materiais estruturais [68].

Em geral pode-se descrever a amplitude pelos laços de histerese, de muitos materiais, por $\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{2}$ pelas mesmas constantes H_c e h_c da curva $\sigma\times\varepsilon$ cíclica, conforme eq. (29) [68].

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2\times E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2\times K_c}\right)^{\frac{1}{n_c}} \tag{29}$$

onde, K_c e n_c são, respectivamente, coeficiente e expoente de encruamento cíclico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A relação entre a gama de deformações, $\Delta\varepsilon$, imposta nos corpos de prova e a vida em ciclos, N, para iniciação de uma trinca por fadiga em geral é medida sob tração-compressão em testes idênticos aos usados na medição dos laços.

Para muitos materiais, $\Delta\varepsilon_{el}$ e $\Delta\varepsilon_{pl}$ correlacionam-se com N através das funções parabólicas da relação de Coffin-Manson, dada pela eq. (30) [63, 68, 69].

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = \frac{\sigma_c}{E} \times (2 \times N)^b + \varepsilon_c \times (2 \times N)^c \tag{30}$$

onde o Módulo de Elasticidade (E), os coeficientes σ_c e ε_c e os expoentes b e c são propriedades do material e devem ser medidos experimentalmente.

Manson propôs o método das Inclinações Universais para estimar a curva εN a partir do limite de ruptura de engenharia do material, S_u, e da redução de área, RA, medidos num teste de tração uniaxial. A eq. (31) é a equação proposta por Manson [68, 69].

$$\Delta\varepsilon = 3{,}5 \times \frac{S_u}{E} \times N^{-0{,}12} + \left[\ln\left(\frac{1}{1 - RA} \right) \right]^{-0{,}6} \times N^{-0{,}6} \tag{31}$$

2.5.4.3
DANO ACUMULADO

Na maioria das vezes o componente mecânico sofre cargas variáveis, de amplitude não necessariamente constantes ao longo da vida, dificultando a análise de fadiga do próprio componente. O estudo da variação real do carregamento no tempo permite avaliar a vida estrutural do elemento, na Figura 26 pode-se observar uma variação do carregamento no tempo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

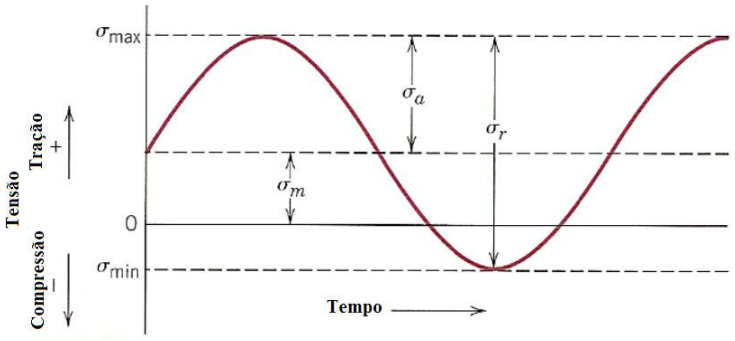


Figura 26 – Exemplos do Carregamento Cíclico Simples [66]

Em muitos casos a seqüência com que a magnitude da carga varia é aleatória. Se o carregamento, além de variável, é irregular, a contagem do número de ciclos para cada nível de tensão pode ser feita pelo método *rainflow* [62].

A contribuição de cada um destes carregamentos cíclicos para a falha do material pode ser calculada por uma teoria de danos cumulativos, também chamada de deterioração gradual [62, 66, 69, 70]. O conceito de que a deterioração gradual de certo material submetido à carregamento cíclico se comporta de maneira linear [70] é conhecido como a regra de Palmgren-Miner ou regra linear de acúmulo de dano. Outras teorias de dano acumulado [64] foram propostas após Palmgren-Miner, mas por possuírem variações apenas no equacionamento matemático, no espectro de carga considerado ou nos parâmetros utilizados para avaliar o dano, não serão aqui descritas.

A regra de Palmgren-Miner diz que o dano que a peça sofreu sob a ação de uma dada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos atuantes daquela amplitude de tensão. O dano provocado por esta solicitação cíclica segundo a regra de Palmgren-Miner pode ser visto na eq. (32) [69, 70].

$$\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}+\ldots+\frac{n_i}{N_i} \tag{32}$$

sendo n_i, o número de ciclos aplicados, para certa amplitude de tensão (σ_i), e N_i a vida que o material teria se submetido ao carregamento de mesma amplitude (σ_i), atuando isoladamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A falha ocorrerá no elemento estrutural ou componente mecânico quando o somatório dos danos relativos for igual a 1, eq. (33) [69, 70].

$$\sum_{\infty}^{i=1} \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{33}$$

Apesar de haver algumas limitações (como variações em resultados tanto menor do que 1 como maior que 1, o dano em fadiga muitas vezes não ser linear, entre outros), a regra de Palmgren-Miner é muito usada como uma orientação preliminar.

2.5.4.4
CURVAS DE FADIGA

No código ASME seção VIII divisão 2 [71] é proposta uma curva de fadiga, onde deve ser inserido o valor de tensão alternada máxima que pode ocorrer no sistema. Na curva $S_a \times N$, vista na Figura 27, S_a é a amplitude admissível da componente alternada de tensão e N é o número de ciclos.

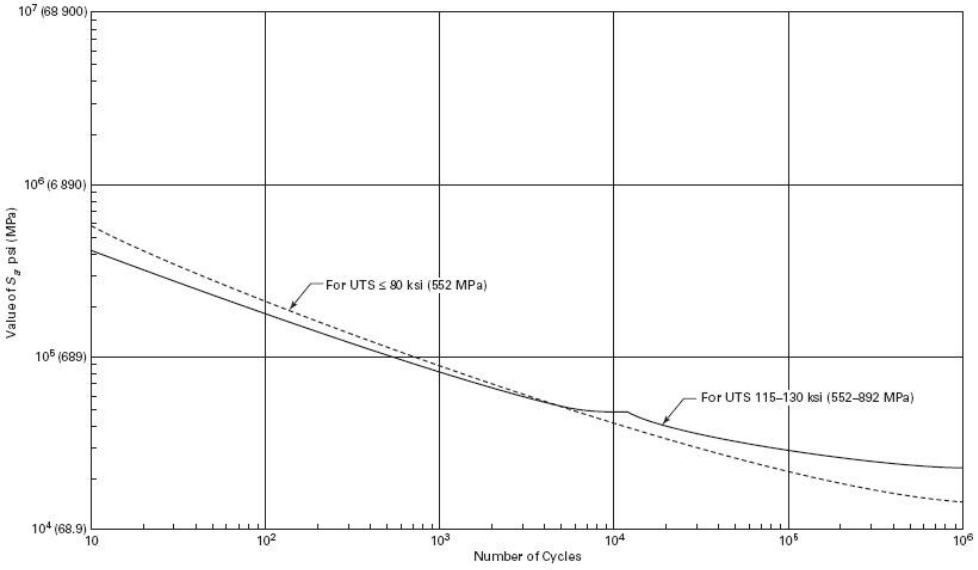


Figura 27 – Curva de Fadiga para Projeto de Aço Carbono [71]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A amplitude de tensão a ser comparada com S_a, para uma dada vida N, é calculada considerando o comportamento elástico, mas o comportamento inelástico é aceitável. Assim, pode-se utilizar as mesmas curvas para análise inelástica, desde que a tensão seja obtida como mostrada na eq. (34). O encruamento do material não é levado em consideração.

$$S_a = \frac{1}{2} \times \Delta\varepsilon_t \times E \tag{34}$$

onde, $\Delta\varepsilon_t$ é a gama de deformação efetiva total.

Para obtenção do valor de S_a somente valores de tensões cíclicas alternadas devem ser considerados. Tensões produzidas por qualquer carregamento ou condição térmica que não variam durante o ciclo não devem ser considerados, pois são tensões médias, e o máximo efeito produzido pela tensão média já está incluído nas curvas de fadiga do ASME.

No código há uma correção na tensão para variações no módulo de elasticidade utilizado (E_u) e o de referência na curva mostrada (E_{ref}). A eq. (35) mostra essa correção, onde S_{alt} é a amplitude de tensão encontrada e S_a a tensão a ser introduzida no gráfico.

$$S_a = S_{alt} \times \frac{E_{ref}}{E_u} \tag{35}$$

Para a Figura 5-110-1 do ASME, que é a curva a ser utilizada para equipamentos de aço carbono, já mostrada na Figura 27, o E_{ref} é de 30 x 10^6 psi (206 x 10^3 MPa).

Para a obtensão de S_{alt} é necessário o cálculo da diferença entre as tensões principais, como mostrado na eq. (36).

$$S_{ij} = \sigma_i - \sigma_j \tag{36}$$

onde, i e j são subíndices que representam as direções principais 1, 2 e 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA

A eq. (37) mostra como deve ser obtido o valor de S_a.

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \times S_{ij\max} \tag{37}$$

onde, $S_{ij\max}$ é o maior valor encontrado na diferença entre as tensões principais.

Os efeitos provocados por danos acumulados devem ser levados em consideração. Os efeitos provocados descontinuidades estruturais locais devem ser avaliados para todas as condições usando fatores de concentração de tensão determinados de forma teórica, experimental, por estudos fotoelásticos ou por técnicas de análises de tensões pelo método de elementos finitos.

O API 1156 [72], informa que as curvas de fadiga do ASME são orientadas para projeto e são conservadoras. O coeficiente de segurança usado, nestas curvas, tem valor igual a 2 para as tensões e 20 para o número de ciclos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521476/CA