

2 Falhas nos Dutos

2.1. Introdução

As teorias de falha mais utilizadas para descrever a resistência do sistema de dutos são: *teoria das tensões principais máximas* e *teoria das tensões cisalhantes máximas*.

A teoria das tensões principais máximas é suportada pelo Código ASME B31 e Subseções NC e ND (Classes 2 e 3) da Seção III da ASME *Boiler and Pressure Vessel Codes*. Esta teoria estabelece que o escoamento de um componente ocorre quando uma das três tensões principais alcança valores maiores do que o limite de escoamento do material.

Esta teoria prevê a falha por escoamento e por fadiga em metais dúcteis. Esta teoria serve de base para a Subseção NB (Classe 1) da ASME Seção III.

A tensão cisalhante máxima em um ponto τ_{\max} é definida como a média da diferença entre a máxima e a mínima das três tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 . Se $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, então $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Esta teoria estabelece que a falha de um componente ocorre quando a tensão cisalhante máxima excede a tensão cisalhante no ponto de escoamento em um ensaio de tração. No ensaio de tração simples, o escoamento ocorre para $\sigma_1 = \sigma_y$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Pode-se então determinar a tensão máxima de cisalhamento τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_y}{2} \quad (2.1)$$

2.2. Classificação das Falhas

Segundo Thielsch, 1965 [1], apesar de vários aspectos causarem falhas nos dutos, a responsabilidade pela falha pode ser atribuída a uma destas cinco classificações:

- 1) Projetos (estrutural, localização de união, configuração de soldas);
- 2) Materiais (seleção e manuseio de materiais de base e solda)
- 3) Defeitos do Metal Base (apresentados durante a fabricação dos componentes do duto, como válvulas fundidas e etc.);
- 4) Fabricação (solda, tratamento térmico, limpeza dos vasos de pressão);
- 5) Serviço (condições de serviço excessivamente severas).

Em alguns casos, a responsabilidade pode ser atribuída a combinações destas classificações. Por exemplo, um duto com uma solda de raiz mal executada, pode não falhar em serviço até que uma fadiga térmica ou mecânica cause fissuração ou propagação de fissuras de defeitos existentes na espessura da parede do duto.

2.3. Mecanismos de Falha

As falhas nos dutos ocorrem por corrosão, erosão, danos físicos e fissuração, ou às vezes uma combinação entre elas.

A corrosão acarreta a perda de área da seção transversal devido a reações eletroquímicas entre o material do duto e o meio ambiente.

A erosão é o desgaste da superfície interna por abrasão, causado por partículas de vapor em suspensão ou mesmo pela ação do fluido.

Danos físicos ocorrem particularmente em sistemas de baixa pressão e com espessura da parede pequena, oferecendo assim baixa resistência a cargas externas.

A maioria das falhas ocorre gradualmente. Raras são as falhas onde existem fissuras parciais seguidas de uma ruptura súbita da parede do duto, ou quando uma súbita ruptura ocorre sem a prévia detecção de fissuras. Estes tipos súbitos de rupturas são vistos com bastante preocupação porque podem causar mortes,

além de se tornar um grande prejuízo para o projeto. A maioria destas falhas é devida ao comportamento frágil de certos aços.

Três estágios são definidos em falhas por fissuração: iniciação, crescimento e propagação da fissura.

2.3.1. Iniciação da Fissura

As fissuras podem ser microscópicas, ou até visíveis a olho nu. Três condições envolvem esta iniciação das fissuras:

- *Defeitos estruturais* que variam de microfissuras até grandes descontinuidades no metal. Muitos defeitos grosseiros provenientes do material-base, quantidade de porosidade na solda, ou escória perceptível em radiografia, podem não reduzir a vida em serviço de vasos de pressão, tanques ou dutos. Contudo, muitos defeitos visíveis ou não na superfície podem resultar em falhas;
- *Defeitos metalúrgicos* que representam diferença nas propriedades de magnitude suficiente a se tornar uma potencial causa de falha. Tensões residuais estão incluídas nesta condição;
- *Defeitos introduzidos em serviço* envolvendo fissuras e corrosões.

Geralmente, somente a primeira condição é pesquisada por meio de técnicas não-destrutivas.

2.3.2. Crescimento da Fissura

A iniciação e a extensão da fissura até um tamanho crítico são conhecidas como estágio de *crescimento inicial*. A extensão depende de fatores como propriedades mecânicas e metalúrgicas do material, a natureza e o defeito inicial, o tamanho e a espessura do duto ou vasos e o nível de tensões causado pelas tensões residuais e carregamentos externos. Em materiais frágeis este estágio de crescimento pode ser infinitesimal, já em materiais dúcteis esta fissura pode se estender pelas paredes em tamanhos significantes.

2.3.3. Propagação da Fissura

A propagação envolve um *estágio instável* através do estágio de crescimento quando a formação da extensão da fissura torna-se rápida, como geralmente ocorre em materiais frágeis. Em materiais dúcteis, esta propagação da fissura é geralmente lenta levando dias, meses ou anos antes de atravessar a espessura da parede dos vasos de pressão ou dutos. Às vezes a propagação da fissura em materiais dúcteis pode ocorrer de forma lenta no estágio inicial e depois ser bem rápida no estágio final. Desta forma, tais falhas têm aparências de falha frágil, mesmo que este modo de ruptura seja puramente de cisalhamento. Neste caso, um choque mecânico, térmico ou cargas externas provocam esta ruptura súbita.

Conhecendo-se os fatores responsáveis pela iniciação e propagação da fissura, corrosão ou condições de erosão que levam a falhas, é possível a realização de projetos que previnam estas de ocorrer, ou a criação de mecanismos que minimizem os perigos em caso de rupturas ou explosões perigosas.

2.4. Falhas em Serviço

Vasos de pressão, tanques e dutos que foram projetados corretamente, cuidadosamente fabricados e inspecionados não são supostos falhar em serviço. Porém, em alguns casos, estes são submetidos a pressões e temperaturas maiores do que as previstas originalmente.

Algumas condições externas podem levar à fadiga do material, inicialmente não prevista em projeto, ou são mais danosas do que o material possa suportar ao longo do tempo.

Desta forma as falhas consideradas neste tópico são aquelas em que as solicitações são mais severas do que os vasos de pressão, tanques ou dutos são capazes de resistir. Combinadas ou isoladamente, muitas são as causas que levam a estas falhas. Algumas das mais comuns incluem:

- Tensões excessivas;
- Pressões elevadas;
- Carregamentos externos;
- Fadiga e choque mecânico;

- Fadiga e choque térmico;
- Temperaturas elevadas;

Pode-se mencionar também que falhas podem ocorrer devido a erros de operação.

2.4.1. Tensões Excessivas

Apesar dos projetos normalmente evitarem que ocorram tensões excessivas, uma deficiência na montagem ou na suportação podem resultar em tensões excessivas e conseqüentemente em falhas em serviço.

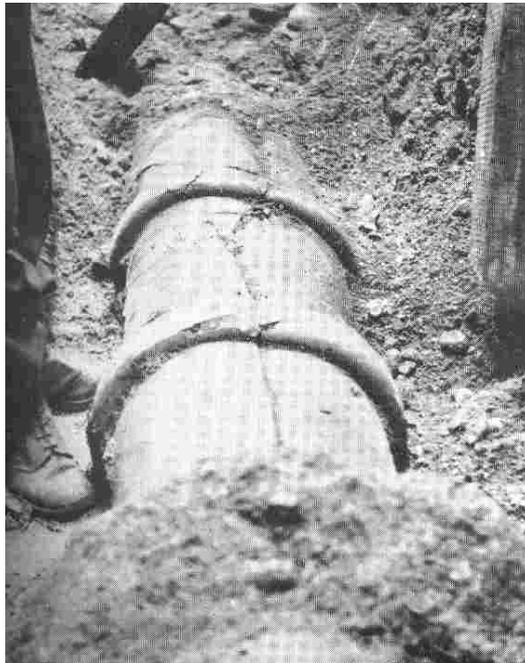


Figura 2.1 – Fissuras devido a sobrecargas (Ref. [7])

2.4.2. Pressões Elevadas

Falhas causadas por pressões elevadas ocorrem em alguns equipamentos envolvidos em processos químicos, quando as reações do processo não ocorrem de acordo com a previsão, resultando em aumento de pressão acima dos valores calculados. Outras falhas que ocorrem por altas pressões são devido ao congelamento de água no interior de dutos, e por teste de pressão hidrostática.

2.4.3. Carregamentos Externos

Os carregamentos externos podem ser causados por apoios, escoras, plataformas, escadas, movimentos e recalques do solo, etc. Ocasionalmente vento e neve também são carregamentos externos. Apesar de serem muitos estes fatores, eles raramente são as causas da falha e sim contribuem juntamente com outros fatores para iniciação ou propagação de fissuras.

2.4.4. Fadiga e Choque Mecânico

Fadiga mecânica e choque mecânico representam a condição que leva à ruptura sob ciclos de tensões máximas repetidas com valores inferiores à resistência de tração do material. As fraturas decorrentes de fadiga são progressivas e ocorrem devido à:

- a) Ciclos de pressão – envolvendo mudanças na pressão interna;
- b) Variação na vazão – associada à passagem do fluido por uma válvula redutora de pressão, por cavitação e etc.;
- c) Mudanças de sistemas – representados por ramais conectados a um duto ocasionando expansões diferenciais nestes componentes;
- d) Fatores externos – tais como vibrações produzidas por bombas e compressores, por variação da pressão do ar ou do fluido em dutos submersos ou ainda vapores passando por uma válvula de redução.

O *Limite de Fadiga* é a tensão máxima abaixo da qual o material pode suportar um número infinito de ciclos de tensão.

A *Resistência à Fadiga* de um material é a tensão máxima que o material suporta para um número específico de ciclos sem falhar.

O número de ciclos de fadiga que levam a falha pode variar de milhões a menos de um. Falha que ocorre em menos de um ciclo, ou em pequenos ciclos, é considerada como um *choque mecânico*.

Em situações de fadiga de baixo ciclos, a magnitude e a variação da carga é suficiente para causar deformação plástica no material. Os danos que levam à falha implicam em redução da ductilidade e formação e crescimento das fissuras.

Driver e Zimmerman, 1998 [15] descrevem uma aproximação do estado limite para o projeto de linhas de dutos para resistirem à punção devido a forças externas causadas por impactos acidentais provocados por dentes de uma escavadeira. Apesar de estudos experimentais e analíticos desenvolverem equações de resistência para este tipo de carga de impacto localizada, nenhum método foi utilizado em normas. Estas usam um método indireto em que para áreas de grande densidade demográfica aumenta-se a espessura da parede do duto. Isto aumenta a resistência do duto a ação de cargas externas, em locais onde a probabilidade de ocorrer atividades de escavação são maiores. A desvantagem desta aproximação é que ela pode levar a um aumento desnecessário da espessura da parede para dutos com grandes diâmetros, que já podem apresentar uma espessura suficiente para resistir a forças externas, ou no caso de dutos de pequenos diâmetros levar a um aumento insuficiente nas suas espessuras. Utilizando o método do estado limite obtém-se resistência adequada para o duto sem conservadorismo excessivo.

Os trabalhos de Hopkins et al., 1992 [16] e Chatain, 1993 [17] concluíram que a espessura de parede é o parâmetro mais significativo na determinação da resistência à punção nos dutos. Eles também chegaram à conclusão que para cargas estáticas, a pressão interna tem pouco efeito na resistência, embora esta tenha importante influência na profundidade de penetração do dente da escavadeira no momento do impacto.

Driver e Zimmerman propõem para o cálculo da resistência à punção a expressão:

$$R_p = \left[1,17 - 0,0029 \left(\frac{D}{t} \right) \right] (1 + w) t \sigma_u \quad (2.2)$$

Onde:

l = comprimento do dente da escavadeira (mm);

w = espessura do dente da escavadeira (mm);

σ_u = tensão última do material (MPa);

Esta expressão é válida para espessuras variando de 4 mm a 12.5 mm , diâmetros de 168 a 914 mm , aços com Graduação até X70 e para dentes de escavadeira de 70 x 5 mm .

2.4.5. Fadiga e Choque Térmico

Fadiga térmica e choque térmico são termos usados para denotar os efeitos causados pela mudança de temperatura ou exposição alternada por altas e baixas temperaturas na vida do material. A diferença entre fadiga térmica e choque térmico está relacionada com o número de ciclos e a taxa de variação de temperatura. Desta forma quando a vida de serviço é determinada principalmente pelo número de ciclos térmicos, a falha é descrita como fadiga térmica; quando a taxa de variação na temperatura for a principal causa de falha, esta é descrita como choque térmico.

Fadiga e choque térmico variam com o material. O mesmo ciclo térmico pode ter um efeito de fadiga térmica num material dúctil e um efeito de choque térmico num material frágil.

Fadiga e choque térmico podem envolver súbitos aquecimentos (*choque de calor*) ou súbitos resfriamentos (*choque de frio*).

Súbitos aquecimentos localizados terão resultados imediatos produzindo tensões de compressão na área aquecida, podendo resultar em uma perturbação permanente. Conseqüentemente, quando esta temperatura cair, podem permanecer as tensões residuais. Se expressivas, estas tensões podem realçar a falha por fluência envolvendo fissuras intergranulares.

Súbitos resfriamentos localizados irão produzir imediatamente tensões de tração e podem também resultar em deformações permanentes. Podem surgir fissuras por fadiga térmica se estes ciclos forem aplicados repetidamente.

2.4.6. Temperaturas Elevadas

As falhas em serviço devido a temperaturas elevadas normalmente são acompanhadas de deformação lenta. Estas falhas são identificadas pela considerável diferença na microestrutura do material.

Quando o sistema trabalha com temperaturas elevadas é desejável que este não tenha perdas de calor. Se a temperatura da superfície do sistema do duto for expressivamente diferente da temperatura externa, é necessário que exista um

sistema de isolamento. Um sistema de isolamento térmico tem a seguinte finalidade:

- Significativa redução da transferência térmica do duto para o sistema, e vice-versa, minimizando assim a perda de temperatura ao longo do sistema;
- Prevenção de formação de umidade na superfície do duto devido à condensação, que ocorre quando a temperatura na superfície do duto é menor do que a temperatura ao seu redor;
- Prevenção de acidentes decorrentes de contato com a superfície do duto, como queimaduras, garantindo assim a segurança das pessoas. Neste caso o isolamento deve manter temperaturas abaixo de 60° C.

Proteções feitas com argamassa de cimento ou concreto são bastante eficientes e representam também uma solução econômica. Além do efeito de proteção térmica este tipo de isolamento também protege o duto de corrosão.

Outro detalhe é que isolamentos térmicos feitos para reduzir a perda da temperatura podem contribuir para o superaquecimento nos períodos de verão.

2.5. Flambagem

A flambagem de dutos enterrados pode ocorrer no plano vertical (*upheaval buckling*) ou no plano horizontal (*lateral buckling*). Estas não ocorrem necessariamente no início de operação do duto, podem ocorrer gradualmente e mesmo anos após o sistema entrar em operação.

Segundo Zimmerman et al., 1999 [19] dutos enterrados estão sujeitos a grande movimentação de solo, causado por falha de inclinação, abalo sísmico e outros, induzindo tensões e deformações que provocam flambagem localizada ou enrugamento da tubulação levando à ruptura. Contudo é possível que uma tubulação se deforme de modo inelástico para se acomodar aos movimentos do solo sem romper. Em seus estudos Zimmerman et al. adotaram um critério que permite a formação de deformação plástica e de enrugamento até um certo limite de deformação na crista do enrugamento. Esta deformação crítica de flambagem é dada por:

$$\varepsilon_{cr} = 0,21 \left(\frac{t}{D_e} \right)^{0,55} + 110 \left(\frac{\sigma_h - 390}{E} \right)^{1,5} \quad (2.3)$$

Palmer e Baldry, 1974 [23] assumindo um duto de paredes finas com suas extremidades restringidas apresentam a pressão crítica de flambagem como sendo:

$$p_{cr} = \frac{2\pi^2 E D_i t}{(1 - 2\nu)L^2} \quad (2.4)$$

Onde:

p_{cr} = pressão crítica de flambagem (MPa)

2.5.1. Flambagem Vertical

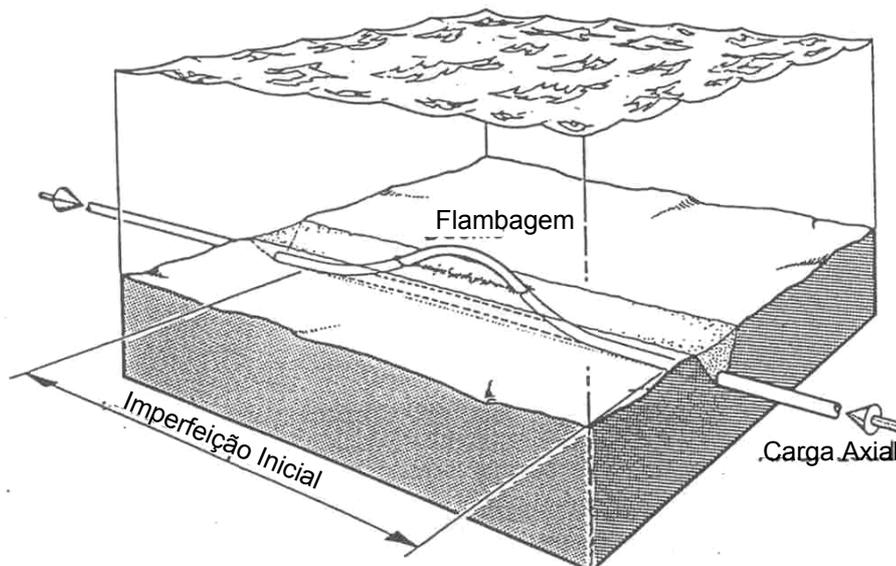


Figura 2.2 – Flambagem vertical de dutos enterrados

Flambagem vertical é um modo de falha que ocorre em dutos enterrados. Isto se deve à força axial induzida pela expansão do duto combinada com irregularidades do perfil, devido a ondulações do fundo do mar, formações rochosas ou áreas de solo mais denso (Figura 2.2). Quanto maior a imperfeição do perfil do solo menor é a força necessária para produzir a flambagem vertical. (Rich e Alleyne, 1998 [20])

Métodos de controle da expansão são apresentados a seguir:

- Flanges de ancoragem;

- Capa de concreto;
- Pipe-in-pipe;
- “Loops” de expansão;
- Duto *zig-zag*;
- Serpenteamento do duto durante a instalação.

A flambagem vertical pode ser controlada ou eliminada com depósitos de pedras ou enterramento adicional. Ambos os métodos acrescentam resistência na parte superior do duto impedindo seu movimento nesta direção. Os depósitos de pedras podem ser aplicados quando necessários, ou seja, após ocorrerem deslocamentos, ou aplicados ao longo de toda linha. Esta apesar de ser uma solução simples tem um custo muito elevado e não soluciona todos os problemas.

Segundo Palmer, 1994 [18] muitos dutos têm sido protegidos contra a flambagem vertical pela colocação de pedras sobre eles ao longo do seu comprimento. Para isto é necessário localizar as seções críticas para não haver desperdícios. Alguns estudos sugerem, que para uma maior eficácia, seja colocada uma manta geotêxtil sobre o duto antes que as pedras sejam depositadas, com isto aumenta-se a resistência ao cisalhamento (Figura 2.3). Pode-se afirmar que com uma modesta espessura desta manta a resistência ao “levantamento” é dobrada (Figura 2.4)

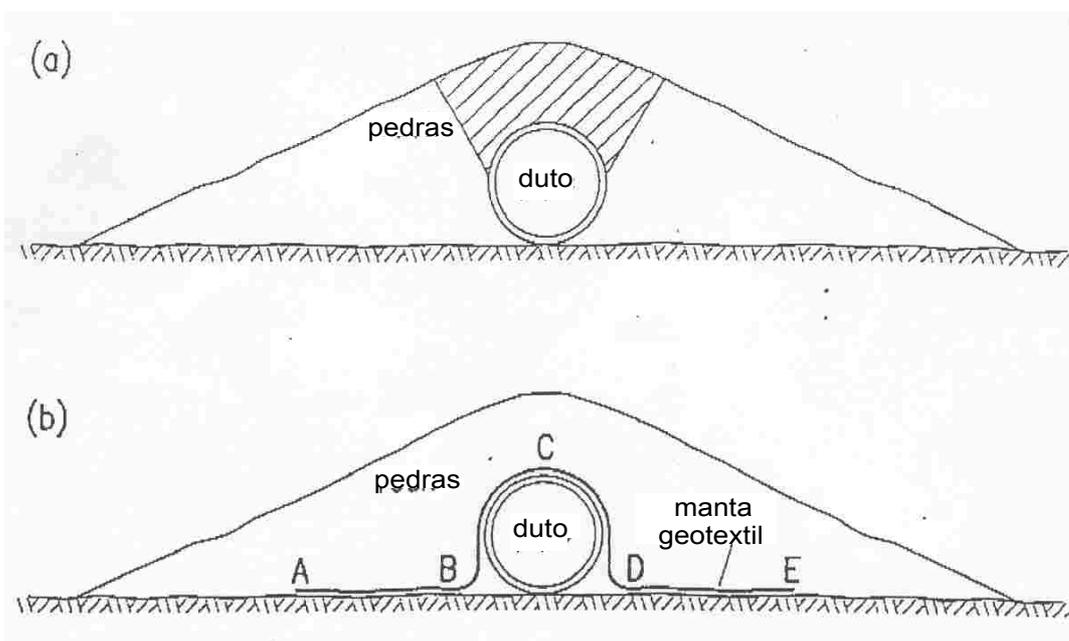


Figura 2.3 – Uso de pedras para aumentar a resistência (a); uso de manta geotêxtil (b)

(c)

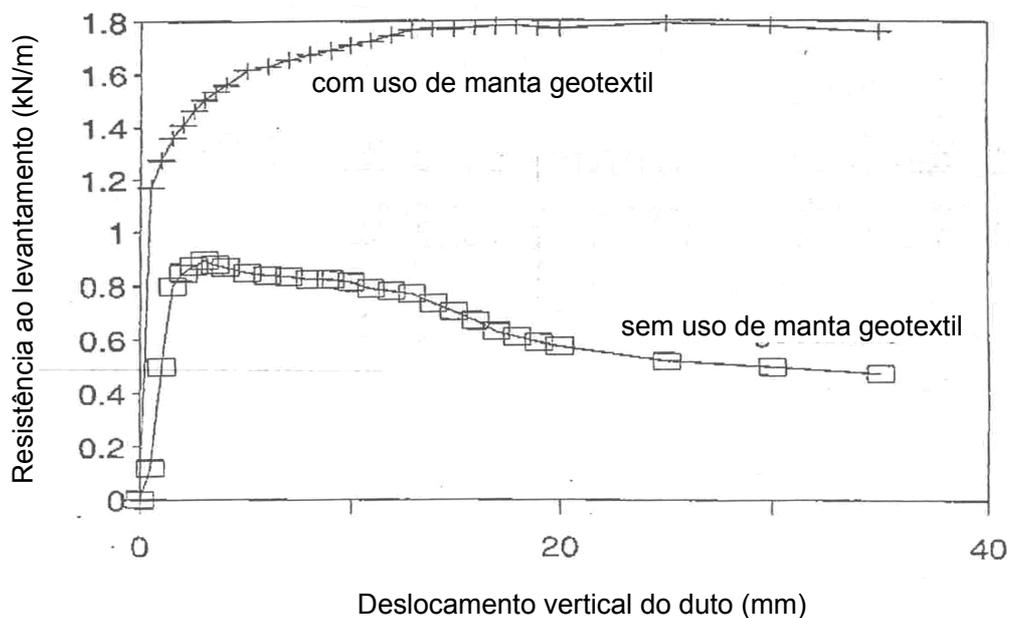
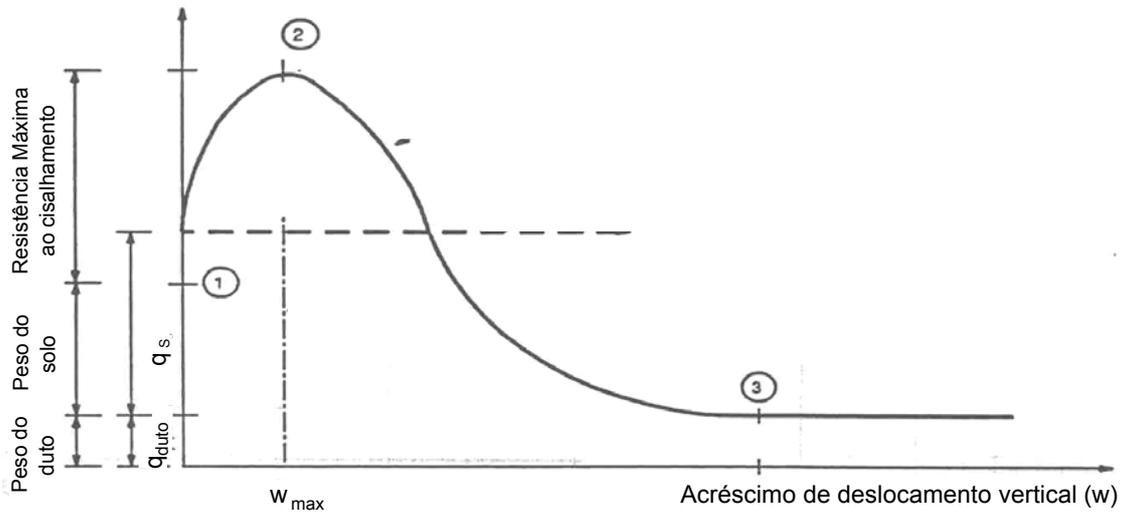


Figura 2.4 – Resistência ao “levantamento” sem e com o uso de manta geotêxtil

Segundo Pedersen e Jensen, 1998 [21] recentemente foi observado que durante o carregamento térmico um pequeno deslocamento do duto para cima pode ocorrer em locais com imperfeição inicial. Durante o descarregamento o trecho deslocado tenta fazer o mesmo caminho de volta para a configuração de imperfeição original. Mas, deve ser esperado que o solo se deforme para esta cavidade em baixo do duto, e também que uma pequena tensão residual de compressão surgirá no local da flambagem devido ao efeito de atrito axial. Estes efeitos irão impedir que o duto recupere a forma original de imperfeição. Em um carregamento subsequente do duto este movimento vertical ocorrerá a uma temperatura mais baixa do que a anterior devido ao aumento da amplitude da imperfeição.

Desta forma, se o tamanho da imperfeição inicial está acima de um certo limite, então o mecanismo é criado e, após um número de ciclos de carregamento e descarregamento, pode levar à flambagem vertical do duto a uma temperatura abaixo da temperatura de projeto para esta linha. Este “levantamento” final ocorre principalmente devido ao reduzido peso de cobertura e também do comportamento plástico do material do duto. A relação da força de resistência do

cobrimento de solo com o deslocamento vertical do duto (Figura 2.5), contém 3 pontos notáveis:



Peso do solo = peso do solo baseado no prisma vertical da coluna acima do duto

q_s = peso do solo baseado no prisma em forma de cunha da coluna acima do duto

Figura 2.5 – Força de resistência x deslocamento vertical

- O ponto 1 apresenta a resistência limite ao levantamento do duto submetido à carregamentos de pressão e temperatura associada ao peso do duto submerso e da coluna de solo acima dele;
- Do ponto 1 para o 2, a flambagem vertical do duto é impedida pela acréscimo de resistência (devido ao depósito de pedras ou enterramento adicional);
- Este acréscimo de resistência atinge seu pico no ponto 2, e então começa a cair rapidamente até o ponto 3 que já não existe solo para cobrir o duto. O deslocamento vertical correspondente à resistência máxima ao levantamento é dado por: (Palmer A., 1994 [18])

$$y_{max} = \left[0,02 + \frac{0,008H}{D} \right] D_e \leq 0,1D_e \quad (2.5)$$

Onde:

H = profundidade do enterramento até o eixo do duto;

Para o projeto contra a flambagem vertical, o deslocamento vertical no qual a camada de solo fornece resistência máxima pode servir como uma condição limitante, isto é, um deslocamento incremental não deve exceder y_{\max} como descrito acima.

Maltby e Calladine, 1995 [24] chegaram a uma aproximação da menor carga de flambagem vertical de dutos com imperfeição inicial como sendo:

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{EIq_0}{y_0}} \quad (2.6)$$

Onde:

q_0 = resistência máxima do solo;

y_0 = imperfeição inicial.

2.5.2. Flambagem Lateral

Segundo Hobs, 1984 [13] a flambagem lateral pode ocorrer segundo um dos modos apresentados na Figura 2.6:

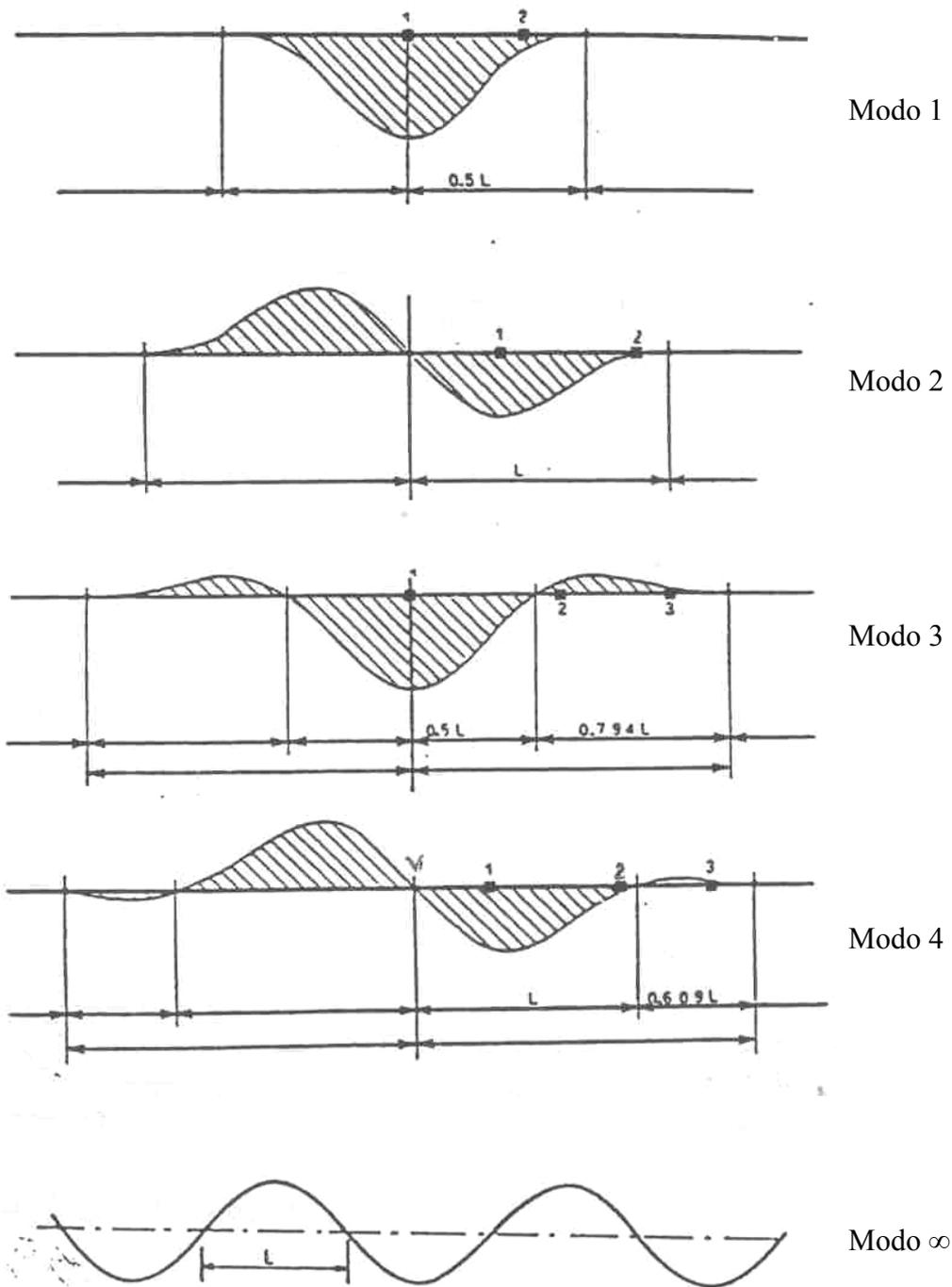


Figura 2.6 – Modos de flambagem lateral

Assume-se que dutos inicialmente perfeitos flambem em uma série de meias ondas como mostra a Figura 3.4 para o modo infinito. Desta forma têm-se para a carga axial reduzida:

$$P = 4\pi^2 \cdot \frac{EI}{L^2} \quad (2.7)$$

Para este modo de flambagem a carga de pré-flambagem é dada por:

$$P_0 = P + 1,4545 \times 10^{-5} AE \left(\frac{\phi w}{EI} \right)^2 L^6 \quad (2.8)$$

Onde:

ϕ = coeficiente de atrito do solo;

w = peso do duto por metro.

E a amplitude máxima de flambagem é igual a:

$$y = 4,449 \times 10^{-3} \frac{\phi w}{EI} L^4 \quad (2.9)$$

Para os demais modos tomando as meias ondas de comprimento L e usando as constantes do modo de flambagem lateral (Tabela 2.1), a carga axial reduzida no duto vale:

$$P = k_1 \cdot \frac{EI}{L^2} \quad (2.10)$$

A carga de pré-flambagem é dada por:

$$P_0 = P + k_3 \phi w L \left[\left(1.0 + k_2 \frac{AE \phi w L^5}{(EI)^2} \right)^{1/2} - 1.0 \right] \quad (2.11)$$

A amplitude máxima de flambagem em relação ao eixo original é igual a:

$$y = k_4 \frac{\phi w}{EI} L^4 \quad (2.12)$$

Tabela 2.1 – Constantes do modo de flambagem lateral

Modo	k_1 (eq 3.10)	k_2 (eq 3.11)	k_3 (eq 3.11)	K_4 (eq 3.12)
1	80,76	$6,39 \times 10^{-5}$	0,5	$2,41 \times 10^{-3}$
2	$4\pi^2$	$1,74 \times 10^{-4}$	1	$5,53 \times 10^{-3}$
3	34,06	$1,67 \times 10^{-4}$	1,29	$1,03 \times 10^{-2}$
4	28,2	$2,14 \times 10^{-4}$	1,61	$1,05 \times 10^{-2}$

Devido aos custos elevados de se abrir trincheiras para os dutos e/ou depositar pedras em certos locais, a instalação de linhas de dutos apoiadas diretamente no fundo do mar são economicamente atrativas.

Nessas condições a linha está sujeita a um esforço axial de compressão devido a carregamentos de pressão, de temperatura e de forças laterais, que pode dar início à flambagem global da estrutura. Isto implica em grandes deformações e excessiva flexão da linha. Portanto, tais eventos representam um perigo em potencial para a integridade estrutural do sistema.

Segundo Friedmann [26], mesmo sem qualquer carga lateral externa aplicada no duto, a flambagem lateral pode ser inicializada decorrente da alta temperatura e pressão desde que a carga de compressão a ser retida no duto seja limitada pela rigidez da interface solo-duto. Segundo Tavergaard e Needleman [27], quando a fundação tiver um comportamento plástico, em que a linha se apóia no fundo do mar, a flambagem tende a se localizar em alguns pontos. Isto é desfavorável, pois o momento fletor pode crescer a um nível tal que ocorra flambagem local do duto.

Observou-se que flexões laterais da linha com espaçamentos regulares seriam proveitosos para o sistema. Com tal configuração a força axial é significativamente reduzida comparada com uma linha de duto reta, e os momentos e tensões associadas que ocorrem são bem menores do que aqueles em situações de flambagem localizada.

Frederiksen et al. [25] estudam a possibilidade de se reduzir a força de compressão no duto por meio de sua instalação em ziguezague. O objetivo desta configuração é de reduzir os esforços gerados durante a operação do duto.

Quando uma força axial de compressão está presente em um duto *zig-zag*, a curvatura dá origem a uma força lateral que, quando supera a força de atrito, dá início ao deslizamento do duto. A flambagem inicia nas regiões de máximas curvaturas ao longo de toda linha e não em pontos localizados. Durante o processo de flambagem a carga axial é aliviada devida à expansão lateral da linha.

Em seu trabalho ele utilizou um duto de 1200 m de comprimento, e considerando as condições de simetria utilizou apenas $\frac{1}{4}$ de onda para modelagem em elementos finitos, como visto na Figura 2.7.

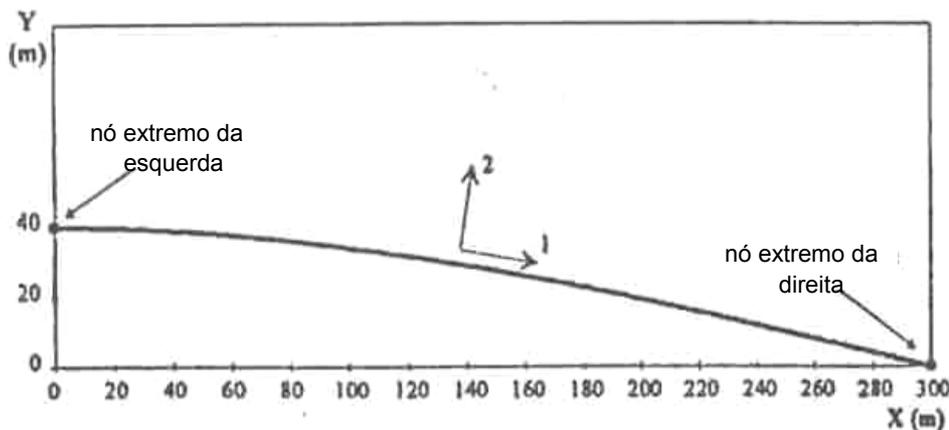


Figura 2.7 – Modelo em elementos finitos de $\frac{1}{4}$ de onda do duto em zigzague

Os carregamentos aplicados foram de pressão vertical, para simular o enterramento, pressão interna e variação de temperatura.

Com este modelo Frederiksen et al. [25] compararam 2 tipos de dutos metálicos: o primeiro revestido com uma capa de concreto uniforme de espessura igual a 80 mm; e o segundo revestido com capa de concreto não-uniforme de espessura variando de 50 mm a 80 mm, sendo que a espessura reduzida (50 mm) situa-se nos 100 m centrais.

O deslocamento lateral do duto é apresentado na Figura 2.8, onde se observa que a flambagem se concentra na curva (nó da esquerda). O movimento lateral se concentra a uma distância de aproximadamente 50 m do centro de flambagem, e o seu valor máximo para o duto com capa uniforme é de 2,06 m, menor do que para o duto com capa não-uniforme, 2,26 m.

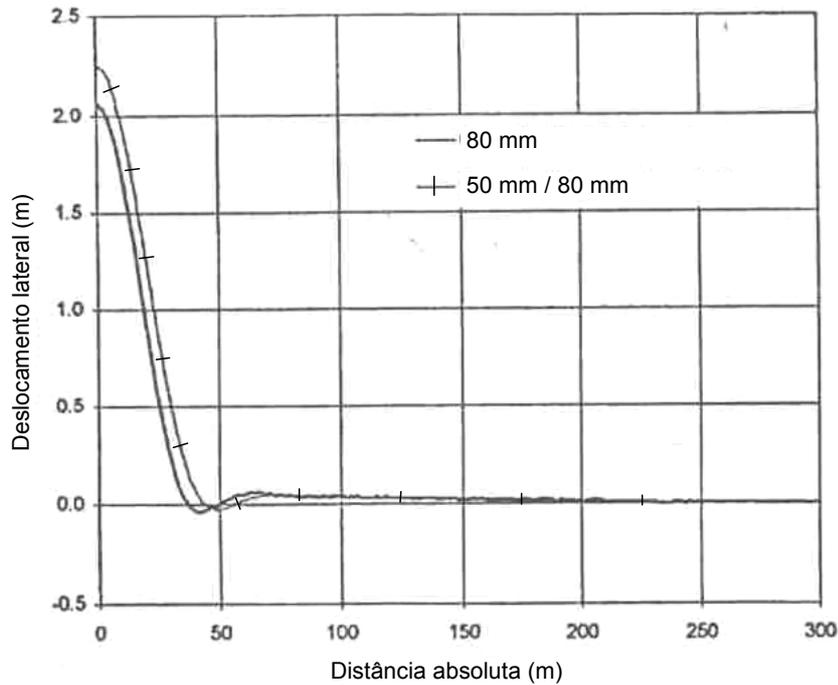


Figura 2.8 – Deslocamento lateral ao longo do comprimento

Na Figura 2.9 é apresentado o deslocamento lateral no centro de flambagem em função do tempo. O escorregamento ocorre por volta de instantes de 610 segundos e 420 segundos nos dutos de revestimento uniforme e não-uniforme, respectivamente. Uma vez iniciado o movimento lateral, o duto revestido uniformemente escorrega mais de 1 metro em um período curto de tempo. Como a curvatura no pico aumenta com a deformação lateral, a força transversal aumenta proporcionalmente. Então, a força transversal supera a força de atrito permitindo a aceleração do duto. Após este deslocamento lateral a força axial é reduzida, sendo necessário aguardar um novo aumento da força para que o deslocamento do duto continue. Para o duto com o revestimento reduzido na seção do pico, o deslocamento ocorre de forma contínua com o tempo.

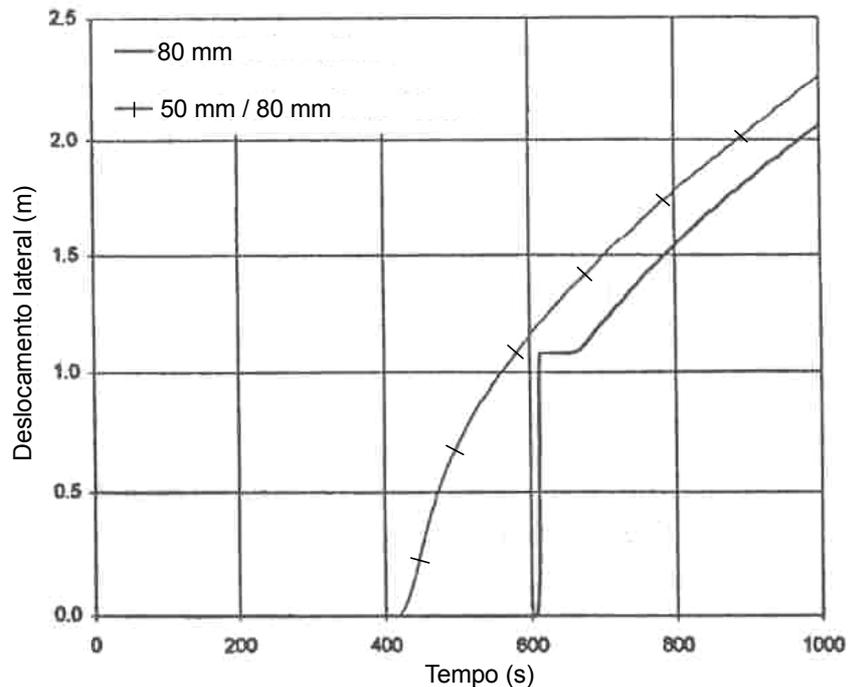


Figura 2.9 – Deslocamento lateral do nó a esquerda em relação ao tempo

A Figura 2.10 mostra a força axial nos nós da esquerda e da direita em função do tempo. Para o duto com revestimento uniforme, a força de compressão no nó da direita cai quase simultaneamente com a força do nó da esquerda. Isto significa que o escorregamento se estende quase que ao mesmo instante para o nó da direita quando a flambagem é inicializada. Para o duto de revestimento não-uniforme, observa-se que com o início da flambagem ($t = 420$ s) o deslizamento não se estende até o nó da direita e a força de compressão continua crescendo por algum tempo.

Concluindo, a redução no revestimento na seção de pico apresenta duas vantagens: a primeira é que com a flambagem o momento e as tensões são reduzidas; e a segunda é que isto possibilita uma maior tolerância na curvatura no pico, e assegura que a flambagem ocorra em cada curva de ziguezague ao longo do duto.

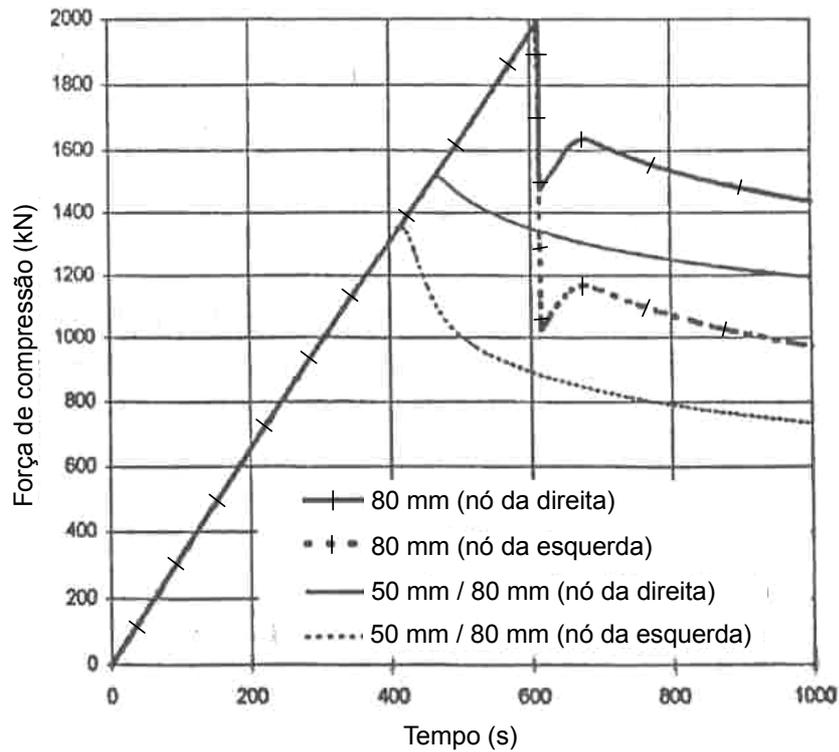


Figura 2.10 – Força axial x tempo para os nós da esquerda e da direita

Um exemplo de falha por flambagem lateral ocorreu no PE-2 (Figura 2.11), onde a fratura foi causada por deformação plástica excessiva da parede do duto. (Costa et al., 2002 [29])

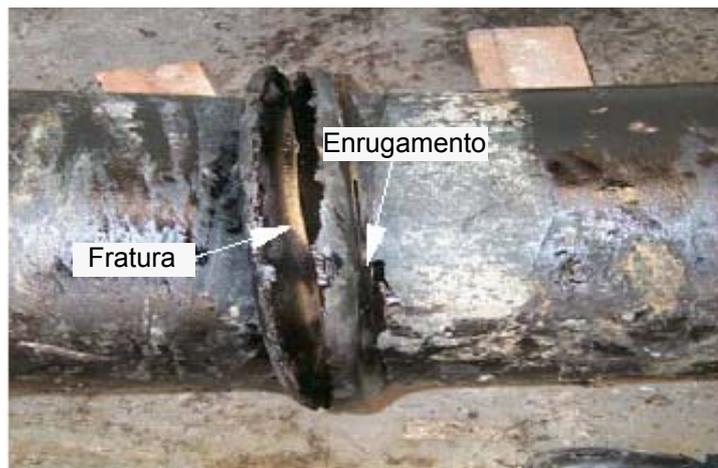


Figura 2.11 – Fratura na parede do duto PE-2