

Análise da flexibilidade de sistemas de tubulações industriais

1. Introdução

As tubulações apresentam alterações dimensionais em função das variações de temperatura: dilatação, em casos de aumento de temperatura, e contração, quando há redução de temperatura.

Quando um tubo é submetido a uma mudança de temperatura, ele sofre uma variação de comprimento, se o tubo estiver livre, essa variação será também livre e não se desenvolvem tensões internas nem reações.

Mas, se o tubo estiver fixado de alguma forma, aparecem tensões internas na parede do tubo e reações nos pontos de fixação, em consequência da restrição imposta à livre dilatação ou contração do tubo.

Essas tensões e reações devem ser controladas e limitadas, isto é o tubo deve ser flexível, ter flexibilidade suficiente.

Os sistemas de tubulações devem ter flexibilidade suficiente para evitar que a expansão térmica ou contração e, ainda, os movimentos de suportes e das extremidades causem:

- Falha de tubulação ou de suportes por esforço excessivo;
- Vazamento nas juntas das ligações flangeadas;
- Tensões acima das admissíveis ou distorção em válvulas ou em equipamentos conectados (bombas e turbinas, por ex.), resultantes de forças e momentos transmitidos pela tubulação.

O objetivo é conseguir um traçado geométrico combinado com as restrições dos suportes, de forma a que os esforços e as tensões ao longo da tubulação, em seus componentes, nos locais de suportação e nas extremidades fixas, estejam entre valores admissíveis.

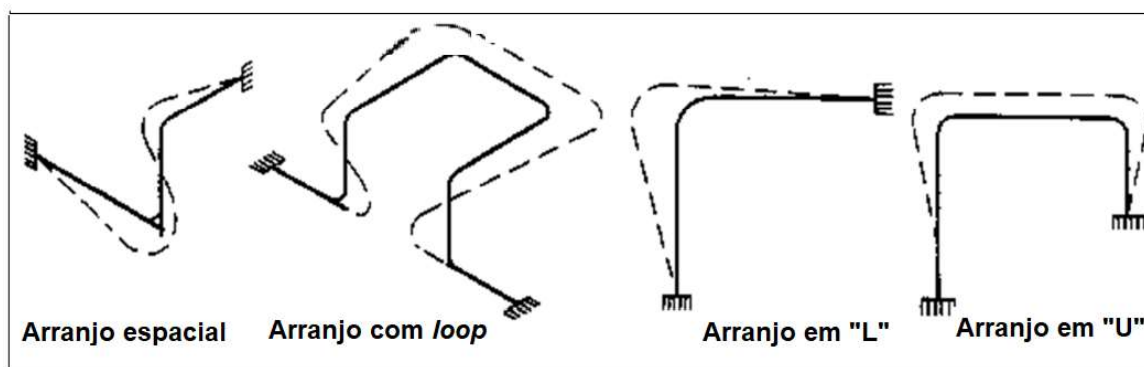
A tubulação será tanto mais flexível quanto:

- Maior for o seu comprimento desenvolvido, em relação à distância entre os pontos extremos;
- Mais simétrico for o seu traçado;
- Menores forem as desproporções entre a tubulação principal ou tronco *header* e os diversos ramais *branches*;
- Maior liberdade de movimentos houver.

Quanto maior for a flexibilidade da tubulação, menor será o nível das tensões e esforços nos componentes e nas extremidades.

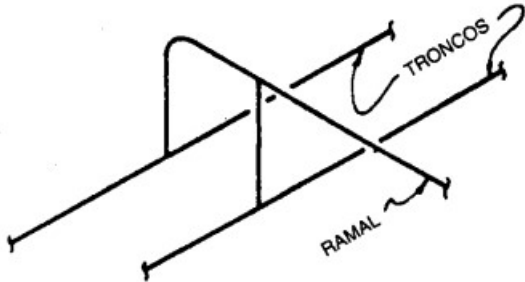
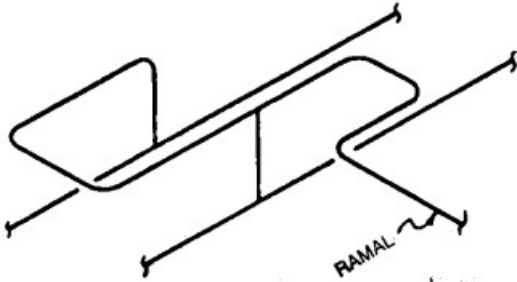
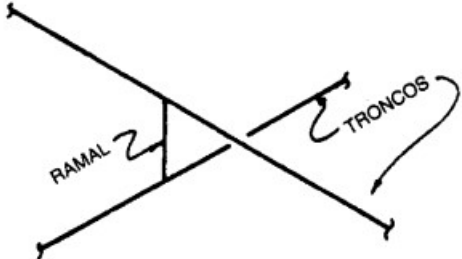
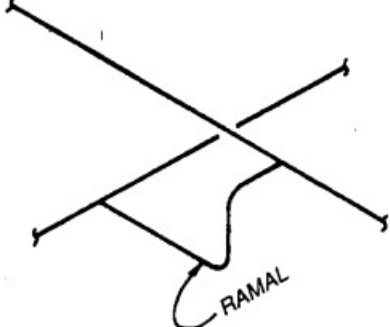
O conhecimento da dilatação ou da contração é essencial para determinação do leiaute *layout* ou arranjo a ser adotado para a tubulação, a necessidade de guias, de batentes e ancoragens, seleção de locais de suportação e de tipos de suportes, de modo a controlar e direcionar essa dilatação/contração, e evitar possíveis pontos de concentração de tensões e/ou esforços elevados, que podem ocasionar trincas e mesmo a perda de apoio.

Deve ser adotada uma configuração ou trajeto de tubulação afastando-se da linha reta, por meio de mudanças de direção, ângulos no plano ou no espaço, de maneira que a tubulação fique com flexibilidade própria, capaz de absorver as dilatações/contrações, por meio de deformações de flexão e/ou de torção, nos trechos retos e nos ângulos das curvas.



Exemplos de mudança de direção com curvas

Os arranjos de ramais ligados às linhas tronco devem permitir a livre dilatação/contração da tubulação principal.

Arranjos errados: sem flexibilidade	Arranjos certos: com flexibilidade
	
	

Arranjos típicos entre ramais e linhas tronco header

Para controlar essas dilatações também são empregadas configurações especiais, que permitam mais liberdade para a tubulação dilatar-se, tipo curvas de dilatação e dispositivos como juntas de expansão.

Em trechos longos e retilíneos, normalmente, são usadas curvas *loops* de dilatação e/ou juntas de expansão *expansion joints*, que absorvem a dilatação e a retração das tubulações, oriundas de variação de temperatura.

A adoção de curvas de dilatação, com um arranjo de traçado não retilíneo, é uma forma eficiente de permitir e controlar as dilatações/contrações, porém podem levar ao aumento de perda de carga, em função do maior comprimento e excesso de curvas, que transtornam o fluxo de escoamento do fluido na tubulação.

Em contrapartida, a utilização de juntas de expansão tem a desvantagem de se constituírem em pontos frágeis da tubulação, com resistência geralmente inferior à própria tubulação, além de pontos adicionais sujeitos a vazamentos, risco de ruptura súbita e constante cuidado de inspeção e manutenção.

A determinação da solução mais adequada depende de vários fatores como o espaço físico para o encaminhamento da tubulação, o diferencial de temperatura, a frequência na qual este diferencial ocorre, entre outros, ficando à cargo do projetista a escolha da melhor solução, em função das condições de contorno.

Porém, há casos específicos em que se faz necessário o uso de junta de expansão, por ex.:

1. Espaço disponível insuficiente ou muito compacto, que não permita uma configuração adequada.
2. Em tubulações para serviços de baixa responsabilidade, condensado, vapor de baixa pressão, água quente ou qualquer outra aplicação onde o emprego de juntas de expansão representam uma solução mais econômica, em relação ao traçado não retilíneo da tubulação.
3. Em tubulações com diâmetro nominal acima de NPS20 ou de material especial, onde um aumento no seu comprimento acarretaria um custo exagerado, além do aumento na quantidade de suportes e fundações.
4. Onde por exigência do processo, seja necessário a aplicação de tubulações retilíneas, como é o caso a interligação direta dois equipamentos.
5. Em casos em que não seja permitido transmitir a vibração de um equipamento para outro, como é o caso de ligações entre equipamentos rotativos com tanques de armazenamento e reatores de processo.

2. Referências

- Normas Petrobras

N-57 Projeto Mecânico de Tubulações Industriais

N-76 Materiais de Tubulação para Instalações de Refino e Transporte, para tubulação de Gás Natural

N-115 Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas

N-1693 Diretrizes para Elaboração de Padronização de Material de Tubulação para Instalações de Refino e Transporte

Portal das Normas públicas da Petrobras

<https://canalforneador.petrobras.com.br/pt/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao/#especificacoes-tecnicas>

- Normas ASME

As principais normas ASME aplicadas ao projeto e construção de tubulações industriais são as seguintes, porém este trabalho é baseado na Norma ASME B31.3, por ser a mais utilizada, principalmente, em plantas de processamento de petróleo:

Norma ASME B 31.1 - Power Piping

Para as tubulações de estações geradoras de energia elétrica, termoelétricas, caldeiras das plantas industriais, sistemas de aquecimento geotérmico e sistemas de refrigeração. Estabelece os requisitos para projeto, materiais, fabricação, montagem, teste, inspeção, operação e manutenção de sistemas de tubulação.

Norma ASME B 31.3 - Process Piping

Utilizada no projeto e construção de sistemas de tubulações em Refinarias, Terminais, Instalações Petrolíferas e Petroquímicas em geral e tubulações em Indústrias Químicas e Farmacêuticas.

Norma ASME B 31.4 - Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids

Para sistemas de dutos e tubulações de transporte de líquidos, como hidrocarbonetos, gás liquefeito de petróleo, amônia anidra, álcoois. e dióxido de carbono, entre plantas e terminais e dentro de terminais, bombeamento, regulação e estações de medição. O objetivo principal desta Norma é estabelecer os requisitos para o projeto seguro, construção, inspeção, testes, operação e manutenção de sistemas de tubulações de transporte de líquidos para a proteção do público em geral e pessoal da empresa que operam, bem como para a proteção do sistema de tubulação contra vandalismo e danos acidentais por outros e ainda de proteção do meio ambiente.

Norma ASME B 31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems

Abrange o projeto, fabricação, instalação, inspeção e teste de instalações de dutos e tubulações utilizados para coleta, transporte e distribuição de gás, predominantemente entre as fontes de produção e terminais, incluindo as estações de compressão e de medição.

- Norma EJMA

EJMA Standards - Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association

- Livro

Tubulações Industriais Cálculo - Pedro Carlos da Silva Telles

- Artigos

Tubulações industriais - UFPR

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM141/Conte%FAdos/aula10_USP.pdf

What is a Pipe Expansion Joint and Why do I need one?

<https://whatispiping.com/pipe-expansion-joint-details/>

When Expansion Bellow is Required in a Piping System?

<https://whatispiping.com/design-considerations-expansion-bellow/>

A Presentation on Expansion Loops

<https://makepipingeasy.com/a-presentation-on-expansion-loops/>

CAEPIPE-Basic Pipe Stress Analysis Tutorial

<http://www.sstusa.com/pipe-stress-analysis-tutorial.php#:~:text=Piping%20systems%20experience%20different%20loadings,insulation%2C%20cladding%2C%20lining%20etc>

3. Definições

- **Tubulação**

Conjunto de tubos, normalmente cilíndricos com seção transversal plena, destinados ao transporte de fluidos de processo ou de utilidades e controlados por válvulas, que incluem acessórios como: flanges, curvas, reduções, tês e conexões em geral.

- **Sistema de Tubulações**

Conjunto de tubulações utilizadas para escoamento de fluidos, interligadas entre si e/ou a equipamentos estáticos ou dinâmicos, sujeitas às mesmas condições de projeto: fluido, temperatura e pressão. O sistema é considerado como um elemento estrutural/mecânico submetido a esforços e transmitindo esforços aos suportes, aos bocais dos equipamentos interligados e aos pontos de fixação ou ancoragem.

- **Carregamentos em sistemas de tubulação**

Os carregamentos ou cargas geram esforços (forças e momentos) nas partes e componentes das tubulações e se dividem em dois grupos, que interagem juntos, mas com comportamentos diferentes:

- a. Grupo que gera tensões primárias.

Originárias de esforços primários ou mecânicos devido à pressão interna, peso próprio e do líquido transportado, vento e sobrecargas.

- b. Grupo que gera tensões secundárias.

Originárias de esforços secundários decorrentes da restrição à livre dilatação/contração térmica de trechos da tubulação, devido às variações de temperaturas ou por materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica.

- **Tensões primárias**

São provenientes de esforços mecânicos em uma tubulação:

- a. Tensão longitudinal: resultante de pressão; esforço de flexão; peso próprio, do fluido, de acessórios e de outras tubulações; atrito nos suportes; mudanças de direção: que pode levar à ruptura do tubo em forma de circular.

- b. Tensão circunferencial: resultante de pressão; deformações superficiais (por ex. achatamento) e de esforços de flexão: que pode levar à ruptura do tubo segundo uma geratriz.

- c. Tensão radial: resultantes de pressão ou de compressão longitudinal na parede do tubo.

- d. Tensão de cisalhamento: resultante de esforços de torção.

- e. Tensões devido às reações da junta de expansão: empuxo (força axial) da pressão interna e esforços provenientes da rigidez do fole.

- f. Tensões residuais de montagem da tubulação, por ex. retrações de soldas e desalinhamento entre componentes.

- **Tensões secundárias**

São causadas por dilatações/contrações térmicas impedidas, originadas de trechos com temperaturas diferentes, materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, e movimentos nas extremidades dos tubos provocados por equipamentos conectados.

As tensões secundárias no sistema de tubulação são decorrentes, principalmente, da dilatação ou contração térmica, devido às temperaturas dos trechos de tubos, que são impedidos de se dilatarem ou contraírem livremente, gerando esforços (forças e momentos) e se transformam em tensões, com a característica de se aliviarem, através de deformações localizadas, ao longo do tempo.

As tensões secundárias apresentam o fenômeno típico de relaxamento espontâneo (“*self-springing*”), pois tendem a reduzir de intensidade com as deformações permanentes que ocorrem com o tempo e são autolimitantes, se permanecerem dentro do *range* ou faixa de tensão admissível.

- **Range ou faixa de tensões atuantes**

As tensões secundárias, decorrentes da expansão ou contração térmica dos trechos de tubos de um sistema de tubulações, percorrem uma faixa (*range*) de valores, desde a condição fria até a condição quente e vice versa.

A cada ciclo (frio-quente-frio) essas tensões provocam deformações nos constitutivos do sistema, de modo que ao longo do tempo, na situação quente, o valor das tensões decai (pela deformação local), enquanto na situação fria o valor da tensão torna a aumentar, para conseguir um novo equilíbrio do sistema deformado.

Este comportamento é próprio de materiais dúcteis, como o aço carbono, aços ligas e aços inoxidáveis, usados nas indústrias petroquímica e petrolífera, além da maioria dos metais não ferrosos.

- **Tensões admissíveis em sistemas de tubulação**

A Norma ASME B 31.3 especifica tensões admissíveis diferentes para as tensões primárias e secundárias resultantes.

- a. **Tensões primárias admissíveis**

As tensões primárias são limitadas dentro do regime elástico, ou seja, inferiores ao limite de escoamento, e as secundárias limitadas no regime plástico, ou seja acima do limite de escoamento, dos materiais construtivos.

As tensões primárias não sofrem alívio com qualquer deformação permanente que ocorra e o valor destas tensões é sempre diretamente proporcional ao carregamento originário. A diferença básica entre a tensão primária e a secundária é que a primária não depende do tempo, não sofre relaxamento de tensões, e é função sempre do esforço que a origina. Já as tensões secundárias são aliviadas pelas deformações permanentes que ocorrem ao longo do tempo de operação. As tensões primárias devem ser inferiores à tensão admissível (S) fornecidas pelas normas ASME B31.1, B31.3, B31.4 e B31.8, respectivamente.

b. Tensões secundárias ou de flexibilidade admissíveis

As tensões secundárias ou de flexibilidade originadas a cada ciclo (frio-quente-frio) provocam deformações localizadas, que resultam no relaxamento do estado de tensões, ao longo do tempo, na situação quente.

Porém, ao esfriar o valor da tensão torna a aumentar, para reequilíbrio do sistema deformado.

Para as tensões secundárias, a Norma ASME B 31.3 permite valores de tensões admissíveis mais altas que as primárias, mas limitadas pelo *range* ou faixa de tensão admissível.

Em um sistema de tubulação, o *range* das tensões secundárias atuantes, SE, não deve exceder o *range* admissível, *Allowable Displacement Stress Range SA*, calculado pela equação:

$$SA = f (1.25Sc + 0.25Sh)$$

Sc= tensão de tração admissível do material na condição a frio (c=cold), isto é na temperatura da condição ambiente, conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*.

Sh= tensão de tração admissível de material na condição a quente (h=hot), isto é na temperatura da condição de projeto, conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*.

f = Stress Range Factor, “f” conforme Fig. 302.3.5 *Stress Range Factor, f* da Norma ASME B31.3.

- **Flexibilidade de uma tubulação**

É sua capacidade de absorver as variações, dilatações ou contrações, térmicas por meio de simples deformações nos diversos trechos de tubos e/ou elementos flexíveis como as juntas de expansão.

- **Cálculo de flexibilidade de um sistema de tubulações**

É a análise do efeito das tensões e esforços geradas pela dilatação ou contração térmica das tubulações, sobre:

- própria tubulação e seus acessórios,
- seus suportes,
- suas ancoragens e
- bocais de equipamentos interligados.

O cálculo é feito separadamente para cada trecho de tubulação entre pontos fixos ou ancoragens.

- **Pré-tensionamento de tubulação (“cold spring”)**

Pré tensionamento *cold spring* é a deformação intencional da tubulação, durante a montagem, para produzir deslocamento e tensão iniciais com o intuito de reduzir a magnitude das tensões e dos deslocamentos nas condições de operação.

É o processo de deformação elástica do sistema de tubulação, normalmente realizado por corte de comprimento de tubo entre duas ancoragens, durante a montagem, para produzir um deslocamento inicial desejado, reduzir o esforço devido à dilatação/contração e permitir reações e tensões mais favoráveis na condição de operação do sistema.

Também proporciona menos desvios do arranjo, como instalado, quando a tubulação entra em operação, prevenindo interferências com tubulações e/ou equipamentos vizinhos.

- **Curvas de expansão ou loops**

São arranjos de tubulação combinando-se trechos de tubos, horizontais e/ou verticais, com curvas para aumentar a flexibilidade do sistema de tubulação.

- **Juntas de expansão com foles *bellows expansion joints***

Juntas de expansão de tubulação ou foles de expansão são dispositivos mecânicos com um ou mais foles de metal ou borracha, usados para absorver mudanças dimensionais causadas pela expansão ou contração térmica de uma tubulação ou duto, enquanto contém a pressão do sistema.

- **Esforços transmitidos às ancoragens e bocais de equipamentos**

Os pontos de fixação do sistema de tubulações, a saber, engastes, ancoragens, bocais de equipamentos (turbina, bomba, compressor e vaso de pressão) integrados ao sistema, devem estar estruturalmente aptos a absorver as cargas transmitidas pelas tubulações.

O carregamento total resultante nos pontos de fixação do sistema é constituído, normalmente, pelas seguintes parcelas:

- a) Esforço de empuxo devido à pressão;

- b) Esforços decorrentes da flexibilidade da tubulação;
- c) Esforço de mola devido à reação do fole, no caso de existir junta de expansão instalada;
- d) Esforço devido ao atrito nas guias e nos suportes;
- e) Esforço ou força centrífuga devido às mudanças de direção do fluxo do produto circulante;
- f) Esforço devido a golpe de aríete, vento ou vibração.

- **Valores admissíveis para os esforços em bocais de equipamentos**

Para os valores máximos admissíveis dos esforços sobre os bocais dos equipamentos ligados às tubulações, devidos à dilatação/contração térmica, peso próprio ou de qualquer outra origem, deve ser adotado o seguinte critério:

- a. As forças e os momentos causados pela tubulação sobre os bocais das máquinas, como por ex. bombas, turbinas a vapor e a gás e compressores, em que o projeto e a construção obedeçam exatamente ao exigido, respectivamente, pelas Normas API Std 610, 611, 612, 617 e NEMA SM 23, assumir os valores máximos ou critérios admitidos pelas referidas normas;
- b. Para bombas, turbinas a vapor, compressores e outras máquinas não incluídas em (a), recomendam-se que sejam obtidos do fabricante da máquina os valores dos esforços máximos admissíveis sobre os bocais, sendo essa providência indispensável para todos os tipos de compressores e para bombas e turbinas de grande porte. Quando não for possível obter dados confiáveis, podem ser adotados como orientação os valores fornecidos pelas Normas API citadas em (a).

Nota:

Além de deformações e falhas nos bocais, há o risco de desalinhamento dos eixos entre a máquina e o acionador, quebra do acoplamento entre os eixos e deslocamento dos apoios da máquina.

- c. Para equipamentos de caldeiraria, como vasos de pressão e válvulas especiais de tubulações de grande diâmetro, devem ser verificadas as tensões nos bocais e no corpo de válvulas, através de métodos analíticos reconhecidos (ver Welding Research Council Bulletins WRC 107 e WRC 297) ou por análise de tensões pelo método dos elementos finitos, aprovados pelo Proprietário e em conformidade com as normas de projeto do equipamento ou da válvula.

Em casos não previstos devem ser solicitados os esforços máximos admissíveis do fabricante do equipamento.

WRC 107 - Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings;

WRC 297 - Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles.

4. Recursos para aumentar a capacidade de absorver as dilatações/contrações

Os recursos geralmente utilizados para prover a flexibilidade ao sistema de tubulações, em situações particulares como espaços exíguos, tubulações e dutos com trechos longos e de grandes diâmetros, são:

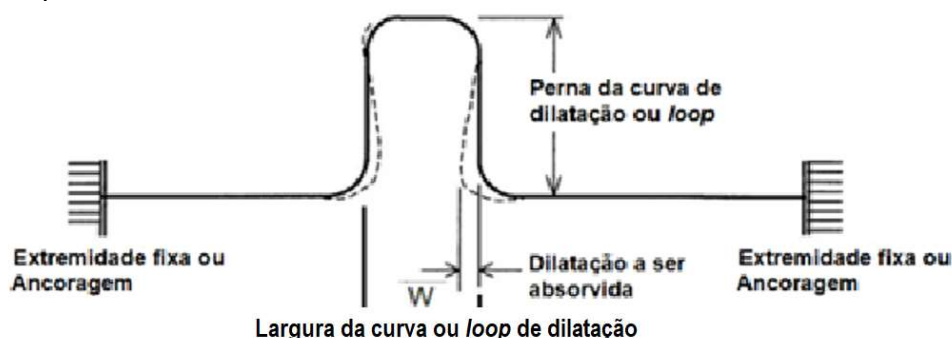
- a. Curvas ou *loops* de expansão;
- b. Juntas de expansão;
- c. Pré-tensionamento.

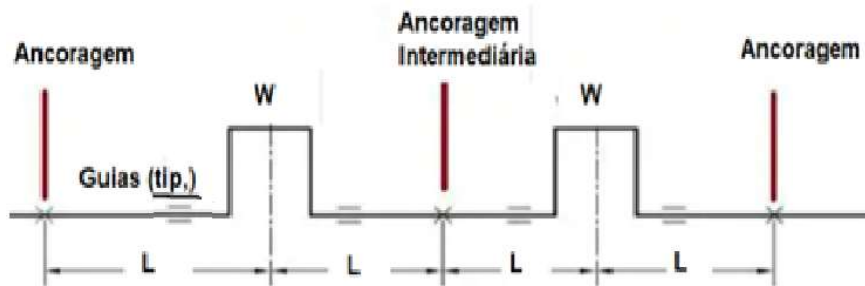
O emprego de juntas de expansão e do pré-tensionamento é restrito a casos especiais, sendo que para a grande maioria das tubulações industriais, o recurso usado é obter a flexibilidade necessária com um traçado não-retilíneo, espacial e com curvas, porém pode até acontecer que, em algumas situações, as juntas de expansão e o pré-tensionamento são usados simultaneamente.

4.1. Curvas ou *loops* de expansão

Para reduzir a tensão e o deslocamento gerados, devidos à dilatação ou contração térmica da tubulação, são projetadas curvas de dilatação ou de expansão, com pernas perpendiculares ao sistema de tubulação principal, conhecidas como *loop* de expansão.

Cada *loop* de expansão deve estar entre extremidades fixas ou ancoradas.





Quanto maior o comprimento da perna do *loop* de expansão, mais flexível é o sistema de tubulação, mas esse comprimento de perna é limitado pela viabilidade de espaço, de suporte, tendência à vibração e custo.

Os *loops* de expansão de tubulação são amplamente utilizados em longas extensões de tubos que passam sobre tubovias *pipereacks* de tubos ou suportes tipo dormentes.

Os *loops* de expansão podem ser dos tipos:

- Planar ou 2-D (*loop* bidimensional);
- Espacial ou 3-D (*loop* tridimensional);
- Na vertical.

Curva <i>loop</i> de expansão bidimensional	Curva <i>loop</i> de expansão tridimensional	Curva <i>loop</i> de expansão na vertical

Fonte: Expansion Loops on the Piping or Pipeline Systems
<https://whatispiping.com/expansion-loop-on-piping-system/>

Normalmente, onde há a possibilidade de fluxo bifásico, como em linhas de vapor, linhas de Tocha *Flare*, linhas de condensado e linhas inclinadas, os *loops* de expansão 2-D são os preferidos, para evitar que o fluido se acumule e bloqueie ou restrinja o fluxo normal.

Os arranjos de tubulação com *loops* espaciais trazem a vantagem de ocupar menos espaço na área da instalação e são mais eficientes, quanto à flexibilidade, que os *loops* planos.

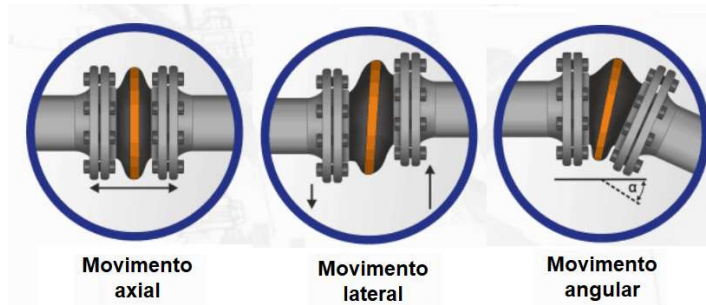
O *loop* na vertical é utilizado para o cruzamento de vias de acesso às áreas ou unidades da planta industrial ou mesmo sobre rodovias.

4.2. Juntas de expansão com foles

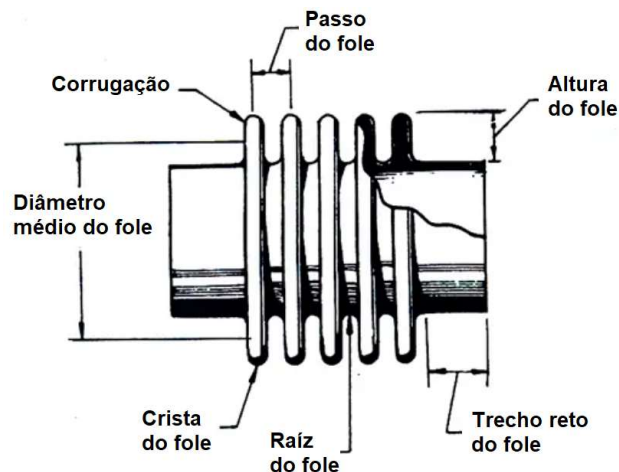
Os elementos deformáveis mais usados, para absorver as dilatações térmicas da tubulação, são as juntas de expansão com foles, metálicos ou de borracha.

As juntas de expansão são instaladas em um sistema de tubulação para absorver dilatações térmicas, vibração e também apresentam vantagens como redução do ruído e ajudam a compensar os desalinhamentos causados na montagem da tubulação.

O elemento flexível da junta de dilatação que se expande ou contrai para absorver o movimento térmico é chamado de fole, consiste em uma ou mais corrugações, com capacidade de absorver movimentos axial e/ou lateral e/ou angular.



As juntas de expansão são usadas com sucesso em refinarias, plantas químicas e petroquímicas, plantas criogênicas, usinas nucleares, automotivas, aeroespaciais e sistemas de aquecimento e refrigeração.



Fole metálico típico de Junta de Expansão

As juntas de expansão são empregadas, quando o espaço ocupado pelo sistema é muito reduzido, é prevista grande dilatação e em tubulação ou duto de grande diâmetro. As juntas de expansão não devem ser utilizadas em condições cíclicas e quando o fluido é tóxico e/ou letal.

Recomendações:

- O fole metálico da junta de expansão deve ser calculado de acordo com a Norma EJMA Standards - *Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association*.
- Prover dispositivos adequados para impedir a abertura exagerada do fole da junta.
- Levar em consideração a possibilidade de fechamento das corrugações do fole quando sujeito a vibrações, dilatação ou contração diferencial devido a ciclos de temperatura, ou por cargas mecânicas externas.
- Evitar juntas de expansão com limites de pressão inferiores aos da classe de pressão dos demais acessórios da tubulação.

Nos sistemas com junta de expansão, o projetista deve considerar como carga primária, sobre os pontos de restrição e/ou fixação, tais como, ancoragens e bocais de equipamentos, os esforços devidos à reação de empuxo da pressão interna, em regime permanente e transiente, e os devidos à rigidez, efeito de mola, dos foles.

O cálculo correto dos movimentos a serem absorvidos pela junta de expansão é essencial para a seleção e especificação do tipo adequado de junta.

Os movimentos determinados em uma junta de expansão devem ser os resultantes da composição dos movimentos de dilatação/contração das tubulações ligadas à junta, com os movimentos dos vasos, equipamentos e estruturas aos quais essas tubulações estejam interligadas.

Para o cálculo dos movimentos das juntas de expansão, além das situações normais de operação, também devem ser consideradas as condições extremas de temperatura, que possam ocorrer, ainda que sejam eventuais ou transitórias.

É importante adotar para os movimentos finais a serem especificados para a junta de expansão, uma margem de segurança sobre os movimentos totais calculados.

a. Forças de mola de fole de junta de expansão

O fole tem geometria particular e reage como mola aos movimentos impostos à junta de expansão.

Para cada fole é determinado o "fator de resistência elástica do fole ou fator de mola", que é função do material de fabricação do fole (módulo de elasticidade na temperatura de trabalho) e das suas características físicas (diâmetro médio e da corrugação, espessura do fole, número de ondas ou corrugações).

O fator de mola está associado ao movimento da junta, podendo ser fator de mola axial, fator de mola lateral e fator de mola rotacional ou angular.

A partir desses fatores da mola e dos movimentos a serem absorvidos, são calculados os esforços axial, cortante e de flexão.

b. Empuxo de pressão

Como o fole da junta de expansão é uma descontinuidade física introduzida no tubo do sistema, quando sob a ação da pressão, interna ou externa, a junta transmite forças de empuxo de pressão aos locais de fixação do sistema.

c. Resultante dos esforços no sistema

As cargas resultantes finais, devido à presença da junta de expansão, são um somatório combinado dos esforços de mola e de pressão.

As Juntas de expansão usadas na indústria são projetadas, fabricadas e testadas de acordo com os seguintes Códigos e Normas

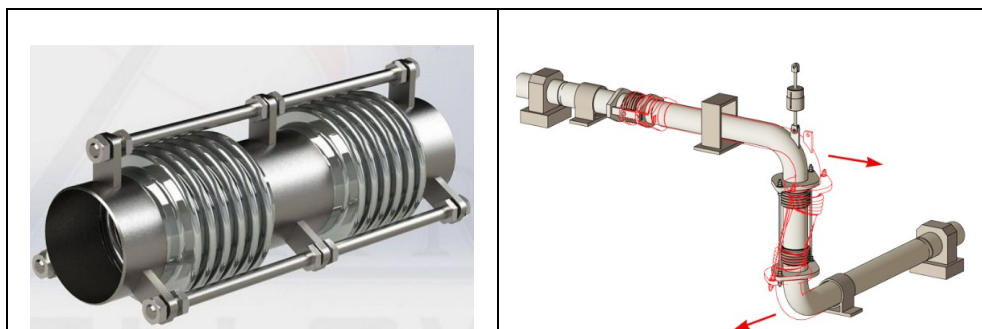
- EJMA, Expansion Joint Manufacturer Association, Inc.
- ASME B31.3 Appendix X and Appendix F, par. F304.7.4, Metallic Bellows Expansion Joints
- ASME Sec. VIII Div.1, App.26

É necessário solicitar os seguintes dados ao fabricante da junta de expansão:

- (1) área de pressão (empuxo) efetiva;
- (2) rigidez lateral, axial e rotacional do fole;
- (3) ciclo de vida útil calculado conforme os requisitos de projeto;
- (4) força de atrito em articulações, tirantes etc.;
- (5) comprimento e peso instalados;
- (6) requisitos para suporte ou restrição adicional na tubulação;
- (7) elementos de junta de dilatação que não devem ter isolamento térmico durante a operação;
- (8) certificados de qualidade dos materiais de construção;
- (9) pressão máxima de teste de pressão;
- (10) memórias do cálculo do projeto.

A utilização de juntas de expansão traz vantagens e desvantagens.

- a. Requerem menor espaço que os *loops* de expansão;
- b. São de pequena perda de pressão em relação aos *loops* de expansão, que têm múltiplas curvas;
- c. São de instalação mais simples que os *loops* de expansão, que precisam de uma estrutura adequada para suportar o porte e peso de um *loop* de expansão, de linha de grande diâmetro;
- d. Porém, as juntas de expansão transmitem as reações de empuxo de pressão, a depender do tipo se absorve ou não o esforço decorrente da pressão, e de movimentação do fole às extremidades como bocais de equipamentos;
- e. Além disso, as juntas de expansão estão sujeitas a falhas como trincas, vazamentos e rompimento do fole com perdas de produção, requerendo inspeção frequente e reparos custosos.



Exemplo de aplicação de uma junta de expansão do tipo universal

4.3. Pré-tensionamento *cold spring*

O *cold spring* é um recurso permitido pela Norma ASME B31.3 para mitigar o efeito de altos esforços devidos à dilatação da tubulação em bocais de equipamentos.

O pré-tensionamento (*cold spring*), que é um dos meios de se controlar o efeito das dilatações térmicas, consiste em se introduzir na tubulação, durante a montagem, tensões iniciais de mesma natureza e de sinais contrários das que se originam em consequência da dilatação/contração térmica, quando em operação.

A finalidade dessas tensões iniciais é compensar, totalmente ou em parte, as tensões resultantes da dilatação/contração, durante a operação.

É o corte intencional de trecho de tubo, a frio, para que uma carga seja induzida no equipamento, na condição ambiente, e ao aquecer os esforços, forças e momentos, no bocal se reduzem a aproximadamente zero.

Nos casos em que se queira fazer o pré-tensionamento, a tubulação é construída com um comprimento menor do que o comprimento que teria na sua condição "a frio", e depois montada à força, sofrendo assim um tracionamento que introduz tensões internas opostas às que surgirão com a dilatação da tubulação.

Porém, para tubulações de grande diâmetro, o pré-tensionamento pode ser de execução muito difícil ou mesmo impossível, devido ao grande esforço necessário fazer para tracionar a frio a tubulação.

Por esse motivo, o pré-tensionamento é pouco empregado, em alguns casos, um pré-tensionamento, de no máximo 50%, pode ser vantajoso, principalmente para reduzir as reações nos extremos, quando estas reações forem os fatores limitantes do projeto.

Deve ser observado que o pré-tensionamento, como recurso de controle das dilatações, não pode nunca ser empregado sozinho, exigindo sempre um traçado não-retilíneo, que será entretanto menor do que o comprimento necessário caso não fosse usado o pré-tensionamento.

O pré-tensionamento pode também ser empregado em juntas de expansão. Nesse caso, a junta de expansão é fornecida com uma pré-deformação, efetuada na fábrica e de sentido contrário da deformação em serviço, que será então parcialmente compensada.

Há várias restrições ao pré-tensionamento *cold spring*:

1. O *range* ou faixa de tensões térmicas calculado não se altera com o *cold spring*.
2. Por teoria o *cold spring* zera a carga térmica no bocal do equipamento, mas desconsidera a influência dos esforços primários: pesos, atritos nos suportes, mudanças de direção etc.
3. As contrações de soldas e movimentações para ajustagem dos tubos na montagem podem alterar o *cold spring* calculado.
4. O relaxamento com o tempo que ocorre nas altas temperaturas, após 3 a 4 ciclos de partida – operação - parada afeta o *cold spring* da montagem, requerendo, pois, o acompanhamento em operação.

Assim, *cold spring* só é usado quando não houver outra solução.

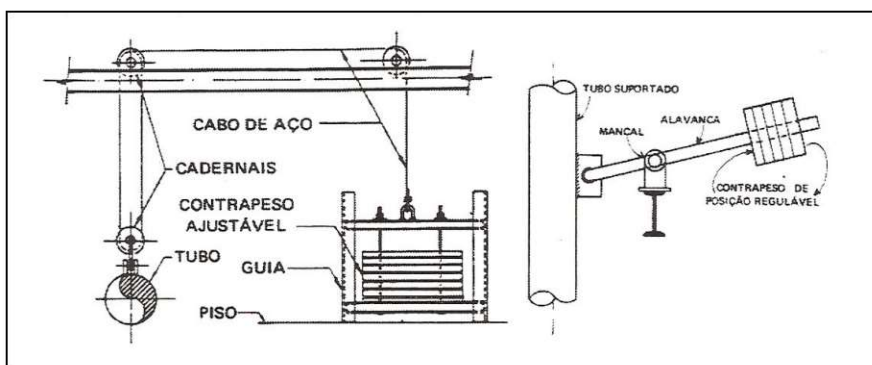
4.4. Suportes de mola

Suportes de mola ou outros suportes móveis devem ser utilizados quando a instalação de apoios rígidos não for possível, em função dos movimentos previstos nos pontos de apoio.

São usados sempre que há perda de suporte, isto é, o suporte rígido do sistema não está recebendo carga, devido ao movimento da tubulação, ou o suporte rígido pode causar um efeito de sobrecarga no bocal do equipamento.

Os suportes móveis podem ser dos tipos de mola variável, de mola constante e de contrapeso.

O suporte tipo contrapeso só pode ser utilizado mediante aprovação prévia do Proprietário.



Suportes de contra peso típicos

O cálculo das cargas e movimentos para seleção ou dimensionamento de suportes de mola deve ser, preferencialmente, baseado na análise de flexibilidade pelo método analítico geral ou cálculo computacional, para garantir maior precisão.

Os principais objetivos ou funções dos suportes de mola são os seguintes:

- Suportar as cargas de peso, no ponto escolhido de instalação, para equilibrar o sistema de tubulação durante o ciclo operacional completo.
- Permitir o movimento ou deslocamento operacional do tubo durante o ciclo de frio a quente ou vice-versa.
- A reação devida à rigidez da mola não causar tensão excessiva no tubo. .
- Atuar também para amortecer a vibração da tubulação.

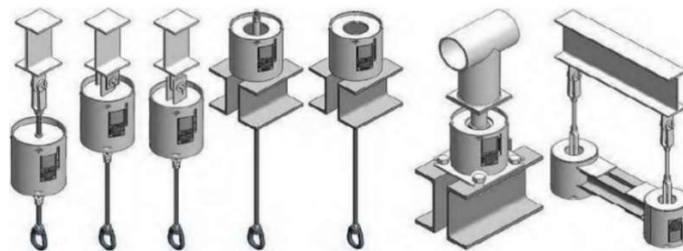
4.4.1. Suporte de mola variável

Em suportes de mola variável, a força de reação do suporte varia com os deslocamentos da tubulação.

Os deslocamentos térmicos verticais da tubulação, entre as condições fria e quente, causam extensão ou compressão da mola, o que provoca a força de reação variável da mola. .

A variação na força transmitida pelo suporte não deve exceder um certo limite, imposto pela variabilidade da mola (a ser fornecida pelo fabricante), o que resulta em uma desvantagem para grandes deslocamentos.

A instalação desses suportes na tubulação é muito simples, podendo ser montados em espaços pequenos.



Diferentes aplicações de suportes de mola de carga variável *Variable load spring hanger*

4.4.2. Suporte de mola carga constante

Ao contrário do suporte de mola variável, a reação do suporte de mola constante é constante em toda a faixa de deslocamento da tubulação.

Os suportes de mola de carga constante possuem um mecanismo, tipo alavanca e excêntrico, que produzem um momento que compensa as mudanças no deslocamento da tubulação.

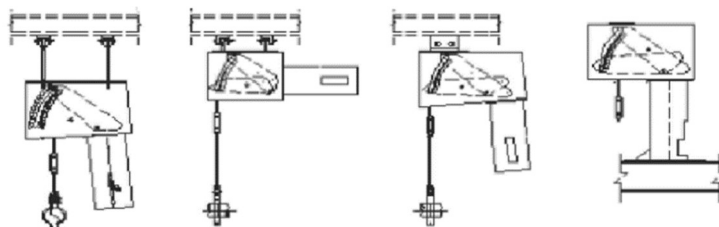
Como resultado, a força de reação do suporte de mola constante é independente da movimentação da tubulação e aproximadamente constante, em todo o curso de deslocamento.

É empregado onde houver movimentos verticais excessivos, onde for necessário restringir a transferência de carga da tubulação ao bocal do equipamento e nas situações em que a variabilidade da mola for excedida.

Suportes de mola de carga constante devem ser utilizados quando:

- a variação de carga do suporte de mola variável resultar em esforços além dos aceitáveis sobre os equipamentos;
- os suportes de mola de carga variável não atenderem aos requisitos de carga e deslocamento;
- sistemas de tubulação muito complexos, com diversas condições e ciclos de operação.

Estes são suportes mais caros, mas são ideais para condições em que os movimentos do tubo são grandes e a sensibilidade do equipamento é importante.



Diferentes aplicações de suportes de mola de carga constante *Constant load spring hanger*

5. Projeto de sistema de tubulações

Os sistemas de tubulações, tubos, acessórios, flanges e válvulas podem ser de materiais metálicos, ferrosos (aço carbono, aço-liga, inoxidável, fundido, forjado, ligado e modular), não ferrosos (cobre, latão, níquel, alumínio, metal, chumbo, titânio e zircônio) e de não-metálicos como plástico termoplástico. PRFV-plástico reforçado com fibra de vidro, etc..

O foco desses trabalhos são as tubulações metálicas, embora possa ser adaptado para outros materiais.

Cada trecho de tubulação pode ser considerado como sendo um elemento estrutural, sujeito a uma série de cargas e transmitindo outras tantas aos suportes e aos equipamentos ligados à tubulação.

As principais cargas que agem sobre uma tubulação compreendem pressão, cargas sustentadas ou permanentes, cargas ocasionais e cargas térmicas, e dentre outras são as seguintes:

1. Pressão interna exercida pelo fluido.
2. Pressão externa (tubulações operando com vácuo parcial ou total).
3. Peso próprio da tubulação (tubos, conexões, flanges, válvulas, olhais, suportes soldados aos tubos, ramais interligados etc.), peso do fluido contido, peso da água para o teste hidrostático, isolamento térmico e revestimento interno.

Nota:

Em tubulações de vapor, ar e outros gases, deve ser considerado também o peso da água para o teste hidrostático, a menos que sejam previstos suportes provisórios adicionais para esse fim.

4. Sobrecargas diversas agindo sobre a tubulação, tais como peso de outros tubos, plataformas e estruturas apoiadas nos tubos, gelo e neve sobre os tubos, peso da terra, pavimentação e veículos (no caso de tubos enterrados), peso de pessoas sobre a tubulação etc.
5. Dilatações térmicas ou contrações da própria tubulação ou de outras tubulações ligadas à tubulação em questão, devido a variações de temperatura.
6. Movimentos de pontos extremos da tubulação causados por dilatação de outras tubulações, dilatação própria de equipamentos (tanques, vasos, bombas etc.) ligados à tubulação em questão, ou por outras causas: vento, movimento de marés etc.
7. Atrito dos tubos nos suportes.
8. Ações dinâmicas provenientes do movimento do fluido na tubulação, tais como fluxo bifásico, golpes de aríete, acelerações, impactos etc.
9. Ações dinâmicas externas: vento, terremoto, choque térmico etc.
10. Vibrações.
11. Reações de juntas de expansão, devidas não só ao esforço necessário para impor deslocamentos às mesmas, como também ao efeito de pressão interna (empuxo).
12. Tensões decorrentes da montagem, tais como, alinhamentos forçados, desalinhamentos, tensões residuais de soldagem, aperto exagerado ou desigual de flanges e de roscas, erros de ajuste de suportes de molas etc.
13. Desnívelamento de suportes ou de vasos ou equipamentos ligados à tubulação, consequentes de recalque de fundações.

O projeto do sistema de tubulações deve incluir os seguintes cálculos de dimensionamento e análises:

- a. Dimensionamento do diâmetro interno de cada trecho da tubulação.
- b. Cálculo da perda de carga.
- c. Cálculo da espessura de parede dos tubos.
- d. Cálculo dos pesos, próprio e do fluido contido, forças de atrito, esforços de ancoragem, reações das juntas de expansão, e cargas sobre suportes e bocais de equipamentos.

Nota:

Para cálculo dos pesos e das forças de atrito e de ancoragem atuantes sobre os suportes de tubulação, devem ser consideradas as seguintes cargas

• carga distribuída, soma das seguintes cargas:

- peso próprio da tubulação com todos os seus acessórios ou componentes, flanges e válvulas;
- peso do fluido contido ou peso da água de teste de pressão (o que for maior).

Para tubulações de grande diâmetro (NPS 20 ou maior), destinadas ao transporte de gases, pode não ser considerado o peso da água contida, desde que a tubulação seja dispensada do teste hidrostático ou quando forem previstos suportes adicionais para a ocasião do teste hidrostático. Todavia, deve ser analisada a possibilidade de ocorrência de condensado durante a fase de partida da unidade.

- peso do isolamento térmico ou de algum outro revestimento interno ou externo, e do sistema de aquecimento;

- peso de outras tubulações paralelas de pequeno diâmetro, eventualmente suportadas pelo tubo.
- **carga concentrada, soma das seguintes cargas:**
 - sobrecarga decorrente de plataformas apoiadas na tubulação, pessoas transitando sobre o tubo;
 - sobrecarga adicional;
 - peso somado de válvulas, outros acessórios de tubulação, de derivações não suportadas ou outros, tubos apoiados, existentes no trecho considerado.
 - sobrecarga adicional de 2.000 N (204 kgf), aplicada no meio do vão.
- e. Cálculo dos vãos máximos entre suportes.
- f. Análise de flexibilidade da tubulação, que consiste em verificar se a tubulação é capaz de absorver, por meio de flexões e torções nos seus diversos trechos e/ou ramais, o efeito combinado das dilatações e/ou contrações térmicas, bem como dos possíveis movimentos ou deslocamentos dos pontos extremos da tubulação.
- g. Avaliação para carregamentos dinâmicos, como vento, vibração, choque térmico, impacto e golpe de ariete.
- h. Dimensionamento de componentes especiais ou não padronizados de tubulação.
- i. Cálculo das quantidades de condensado a eliminar e dimensionamento dos purgadores de vapor.
- j. Cálculo das espessuras de isolamento térmico.
- k. Cálculo das perdas de calor e dos sistemas de aquecimento.

As tensões presentes ao longo da tubulação são:

a. **Tensão longitudinal S_l longitudinal stress**, que tende a romper o tubo ao longo de uma circunferência, é composta das seguintes parcelas:

- Tensão resultante da pressão.
- Tensão resultante das cargas axiais.
- Tensões localizadas devidas às restrições ou derivações soldadas aos tubos.
- Tensões devidas às variações térmicas: dilatação e contração.

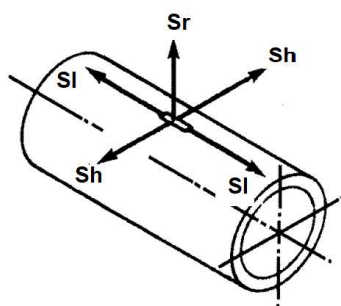
Essas tensões podem ser de tração ou de compressão.

b. **Tensão circunferencial S_h hoop stress**, que tende a romper o tubo ao longo de uma geratriz, é composta das seguintes parcelas:

- Tensão resultante da pressão, que é a tensão predominante.
- Tensões localizadas devidas às restrições ou derivações soldadas ao tubo.

c. **Tensão radial S_r radial stress** é causada exclusivamente pela pressão; seu valor é geralmente baixo, e por isso costuma ser desprezado nos cálculos.

d. **Tensões cisalhantes** que se desenvolvem no plano perpendicular ao eixo do tubo são provenientes dos momentos de torção, geralmente devidos às dilatações térmicas.



Tensões na parede do tubo

A Norma ASME B31.3 estabelece as tensões admissíveis de trabalho, para a maioria dos materiais de fabricação, metálicos e não metálicos, de tubulações (tubos, chapas, fundidos, forjados, plásticos) que são diferentes para os efeitos de tração, compressão e cisalhamento.

Essas tensões impostas ao sistema de tubulações são das seguintes categorias:

a. **Tensões primárias (primary stresses)**

São as tensões necessárias para satisfazer as condições de equilíbrio estático, em relação aos diversos carregamentos externos, agindo sobre a tubulação.

As tensões primárias têm como característica básica o fato de não serem autolimitantes e de terem um valor diretamente proporcional à carga de que se originam.

Assim, se a carga aumenta, a tensão aumenta na mesma proporção, podendo chegar à ruptura do material.

Outra característica dessas tensões é o fato de não serem aliviáveis com o decorrer do tempo. Normalmente, são tensões oriundas dos seguintes carregamentos: pressão (interna ou externa), pesos, sobrecargas sobre os tubos, atrito dos tubos nos suportes, reações de juntas de expansão, golpes de aríete, acelerações do fluxo de escoamento, impactos, vento, terremoto, choque térmico, tensões decorrentes da montagem, recalque de fundações, movimentos de marés etc..

b. Tensões secundárias (*secondary stresses*) ou de flexibilidade (*flexibility stresses*)

São as que resultam não de carregamentos externos, mas do fato de a tubulação não ser nunca inteiramente livre para se dilatar, se contrair e se movimentar, em consequência das variações de temperatura e/ou dos movimentos de pontos extremos da tubulação.

Essas tensões resultam portanto da existência de restrições geométricas no sistema constituído pela própria tubulação, por outras tubulações e equipamentos a ela interligados, que impedem ou limitam a livre dilatação e/ou a movimentação da tubulação.

Por ex., em urna tubulação inteiramente livre para dilatações e movimentos, essas tensões não existiriam, enquanto as tensões primárias devidas a pressão, pesos etc. existem sempre.

As tensões secundárias tendem a reduzir de intensidade com decorrer do tempo, em consequência do fenômeno conhecido por "relaxamento espontâneo" (*self springing*).

Essas tensões são também autolimitantes, limitadas pelo valor do limite de escoamento do material de construção da tubulação.

Normalmente, são as tensões oriundas dos seguintes carregamentos: dilatações ou contrações térmicas devido a variações de temperatura; movimentos de pontos extremos da tubulação causados por dilatação de outras tubulações, dilatação própria de equipamentos (tanques, vasos, bombas etc.) conectados.

Os cálculos das tensões atuantes primárias e secundárias devem ser feitos independentemente, ou seja, não precisam ser combinados, pois, os limites admissíveis dessas tensões são diferentes. Dessa forma, o cálculo mecânico e a análise de flexibilidade da tubulação são realizados separada e independentemente.

6. Análise de Flexibilidade de tubulações

A flexibilidade de uma tubulação é definida pela sua capacidade de absorver as dilatações ou contrações térmicas, preferencialmente, por meio de simples deformações dos seus diversos trechos.

A tubulação é tanto mais flexível quanto menores forem os esforços e as tensões provenientes dessas deformações.

Uma tubulação tem flexibilidade quando as tensões internas resultantes das dilatações ou contrações térmicas e as reações nos pontos com restrição de movimentos (ancoragens, bocais de equipamentos) forem inferiores aos valores máximos admissíveis.

A Análise de Flexibilidade de sistemas de tubulação tem o objetivo de enquadrar as tubulações analisadas aos limites normativos e aos estabelecidos pelos fabricantes de equipamentos conectados aos referidos sistemas

O cálculo de flexibilidade devido às dilatações ou contrações térmicas, aos movimentos dos pontos extremos da tubulação, ou à combinação desses efeitos, deve ser realizado como estabelecido pelas Normas de projeto e construção de tubulações, a saber: ASME B31.1, B31.3, B31.4, B31.5 e B31.8, conforme o campo de aplicação de cada norma.

ASME B 31.1 - Power Piping

ASME B 31.3 - Process Piping

ASME B 31.4 - Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids

ASME B 31.5 - Refrigeration Piping and Heat Transfer Components

ASME B 31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems

Nota:

A análise ou cálculo da flexibilidade, conforme estabelece a Norma ASME B31.3, não se aplica às tubulações enterradas. Para instalações de tubulação enterrada que contém trechos contínuos, os efeitos de restrição passiva da carga do solo, nos trechos longos sujeitos a expansão térmica, podem ser significativos e resultar em altas forças axiais e momentos de flexão em curvas e ramais interligados.

A tubulação enterrada sob tensão axial pode, teoricamente, falhar de duas maneiras: por flambagem de coluna (o tubo sai do solo no meio do vão) ou falha local por deformação ou falha por rompimento (muito mais grave do que a flambagem de coluna).

Para essas instalações, recomendam-se que incorporem acoplamentos flexíveis, nos trechos de tubulação sujeitos a expansão térmica.

No entanto, nos acoplamentos flexíveis, as forças de atrito ou rigidez no acoplamento devem ser consideradas, para acomodar a expansão térmica do tubo.

As tensões da tubulação enterrada são de natureza secundária, pois a tubulação está continuamente suportada e restringida, portanto, tensões totais mais altas podem ser permitidas, porém inferiores a 80% do limite de escoamento do material de construção, na temperatura de projeto.

Referências:

- ASTM C 1173 Standard Specification for Flexible Transition Couplings for Underground Piping Systems. Esta especificação descreve as propriedades de dispositivos ou conjuntos adequados para uso como acoplamentos flexíveis de sistemas de tubulação para drenagem subterrânea e esgoto.
- Instalações enterradas - Victaulic

<https://s3.amazonaws.com/victaulic-assets/assets/uploads/literature/MB-011-PORB.pdf>



6.1. Requisitos para a dispensa de análise formal de flexibilidade

Esse cálculo de flexibilidade é obrigatório para todas as tubulações, exceto nos seguintes casos, em que é dispensável:

- Casos de dispensa previstos nas próprias Normas ASME B31.1, B31.3, B31.4, B31.5 e B31.8;
- Tubulações com temperatura máxima de operação entre 5°C e 40°C, não expostas ao sol e não sujeitas à limpeza e degaseificação com vapor d’água (“steam out”);
- No caso de duplicação de linha, onde o cálculo já foi realizado e aprovado anteriormente para uma linha equivalente. Porém é necessário atenção pois todas as características das linhas devem ser idênticas i.e. diâmetro da tubulação, material, espessura da parede, fluido conduzido, pressão de operação, diferencial de temperatura etc.;
- Tubulações que trabalham com fluidos sendo conduzidos em temperatura ambiente e que não estejam expostas diretamente à radiação solar e que não sofram processos de sanitização ou lavagem com vapor d’água.

Conforme a Norma ASME B31.3 parágrafo 319.4.1 *Formal Analysis Not Required*, a análise formal de flexibilidade não é requerida para um sistema de tubulação que atenda ao menos a uma das seguintes condições:

- duplica, ou substitui sem mudança significativa, um sistema operando com um registro de serviço bem-sucedido;
- pode ser prontamente julgado adequado em comparação com sistemas previamente analisados;
- não tem mais do que dois pontos de fixação, nenhuma restrição intermediária e se enquadra nas limitações da seguinte equação:

$\frac{Dy}{(L - U)^2} \leq K_1$	<p>D = diâmetro externo do tubo, mm (pol.) y = resultante das deformações de deslocamento total, mm (pol.), a ser absorvida pelo sistema de tubulação $K_1 = 208\,000 \text{ SA/Ea}$, $(\text{mm/m})^2 = 30 \text{ SA/Ea}$, (pol./ft)² Ea = módulo de elasticidade do material construtivo a 21°C (70°F), MPa (ksi) L = comprimento desenvolvido da tubulação entre as ancoragens, m (ft) U = distância em linha reta entre as ancoragens, m (ft) SA = <i>range</i> ou faixa de tensão de flexibilidade permitida de acordo com a equação a seguir, MPa (ksi)</p>
$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h)$	<p>SA = <i>range</i> ou faixa de tensões de flexibilidade admissível, f = Stress Range Factor, “f” conforme Fig. 302.3.5 <i>Stress Range Factor, f</i> da Norma ASME B31.3. Ao se usar um valor de $f > 1,0$, Sc e Sh devem ser limitados a um máximo de 138 MPa (20 ksi). Sc = tensão básica admissível na temperatura mínima do metal esperada durante o ciclo de dilatação em operação em análise Sh = tensão básica admissível na temperatura máxima do metal esperada durante o ciclo de dilatação em operação em análise Sc e Sh conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 <i>Basic Allowable Stresses in Tension for Metals</i>.</p>

Notas:

Porém, segundo as notas da própria Norma ASME B31.3, mesmo em um sistema de tubulação que se enquadre nas limitações da equação há as seguintes indefinições

- Não há nenhuma evidência de que esta equação produz resultados precisos ou conservadores;
- Não é aplicável a sistemas usados em condições cíclicas severas e em serviços tóxicos ou letais;
- Não há garantia de que as reações nos pontos fixos, ancoragens e bocais de equipamentos são aceitáveis;
- Em resumo, mesmo sendo uma possibilidade auferida pela Norma, não há garantia de bons resultados com o uso da equação, logo não é recomendável essa alternativa.

Qualquer sistema de tubulação que não atenda a estes critérios deve ser analisado por um método de análise simplificado ou abrangente, conforme apropriado.

6.2. Requisitos para a análise formal de flexibilidade

A análise formal da flexibilidade de um sistema de tubulações, conforme estabelece a Norma ASME B31.3 parágrafo 319.4.2 *Formal Analysis Requirements*, qualquer sistema de tubulação que não atenda aos critérios do parágrafo 319.4.1 *Formal Analysis Not Required* deve ser analisado por um método de análise simplificado ou abrangente, conforme apropriado.

Um método simplificado ou aproximado só pode ser aplicado se usado dentro da faixa de configurações para as quais sua adequação foi demonstrada.

Métodos abrangentes de análise incluem métodos analíticos e gráficos que fornecem uma avaliação das forças, momentos e tensões causadas pelas deformações da tubulação.

Na análise abrangente se deve levar em consideração os fatores de intensificação de tensão para qualquer componente que não seja tubo reto.

Para cálculo de flexibilidade de linhas com temperatura de operação acima de 40°C deve ser utilizada a condição de temperatura mais elevada, dentre as descritas abaixo, associadas ao valor da pressão atuante simultaneamente:

- temperatura de projeto da tubulação;
- temperaturas eventuais, tais como: anormalidades operacionais, emergência, limpeza com vapor (“*steam out*”), descoqueamentos de fornos (“*steam air decoking*”) etc. e nos casos mais críticos, recomendam-se calcular com maior precisão a distribuição de temperatura ao longo da tubulação em análise;
- temperatura de aquecimento de tubulação com traço de vapor d’água (“*steam tracing*”) ou traço elétrico (“*electrical tracing*”);
- 60°C: para todas as tubulações não isoladas expostas ao sol.
- no caso de limpeza com vapor (“*steam out*”), para a temperatura de metal a ser considerada na verificação da flexibilidade da tubulação, considerar as condições estabelecidas na tabela a seguir.

	Vapor de baixa		Vapor de média	
	T (°C)	P (kgf/cm ²)	T (°C)	P (kgf/cm ²)
Linha não isolada	80	0,5	170	2,5
Linha isolada	130	0,5	200	2,5
Interno de Válvula	130		200	
Equipamentos não isolados	70		160	
Equipamentos isolados	130		200	

Nota 1 Dados válidos para análise de flexibilidade.
Nota 2 Para determinação das temperaturas de metal foram consideradas as seguintes condições:
vapor de baixa T = 130 a 150 graus Celsius e P = 2 a 3 kgf/cm²;
vapor de média T = 200 a 250 graus Celsius e P = 10 a 12,5 kgf/cm²;
Nota 3 Para condições de vapor diferentes deve ser avaliada a temperatura de metal.

O cálculo de flexibilidade deve incluir, obrigatoriamente, a determinação e avaliação de todos os esforços exercidos pela tubulação sobre os pontos fixos (ancoragem e bocais de equipamentos), bem como sobre todos os dispositivos existentes de restrição de movimentos (tais como: guias longitudinais, transversais ou mistas e batentes).

A real condição de contato e as folgas em guias devem ser consideradas de modo a não mascarar os resultados.

As ancoragens, incluindo bocais de equipamentos, guias, batentes devem ser adequadamente dimensionados para resistir aos esforços, forças e momentos, devidos à expansão/contração térmica impedida, aos produzidos pelo empuxo devido à pressão do fluido (caso de junta de expansão), ao atrito, às mudanças de direção da tubulação, e a outras causas.

Também devem, obrigatoriamente, ser considerados, para o cálculo de flexibilidade, os movimentos impostos à tubulação (ex.: deslocamento de bocais de fornos, reatores, torres e vasos de pressão), considerando-se as diversas alternativas relativas a esses movimentos, inclusive condições de partida, parada, operação normal e em emergências, como por exemplo, fechamento de válvulas que pode gerar condições distintas de temperatura entre trechos de tubulação.

Quando junta de expansão ou outro dispositivo semelhante é utilizado, a rigidez do fole e do dispositivo de articulação da junta deve ser considerada na análise de flexibilidade da tubulação.

Para tubulações em serviço crítico, operando em alta temperatura e/ou elevado número de ciclos operacionais, ou sempre que solicitado pelas especificações de serviço do Proprietário, devem ser verificados, além dos esforços nos bocais de equipamentos conectados, também nas ligações flangeadas de válvulas, de filtros, de trechos desmontáveis (para facilitar a manutenção), etc., conforme o Código de Vasos de Pressão ASME BPVC Section VIII.

Dentre outros exemplos, as seguintes linhas se enquadram nessa condição:

- Linhas de transferência forno-torre de processo;
- Linhas de topo e fundo de reatores de processo e de tambores de coqueamento;
- Linhas e dutos de gases de combustão;
- Linhas de vapor d'água e condensado de altas pressão e temperatura (classes de pressão ASME 600 e acima) de caldeiras de vapor.

Todos os ramais, incluindo linhas de pequeno diâmetro (NPS 2 e menores) conectadas a equipamentos e tubulações, sujeitos a grandes deslocamentos no ponto de conexão, devem ser verificados e projetados para absorver esses deslocamentos.

6.3. Sistema de tubulações balanceado e desbalanceado

As tensões térmicas podem ser consideradas proporcionais às deformações em um sistema de tubulação, em que as deformações são bem distribuídas e não excessivas em nenhum ponto, que são as características da condição de um sistema balanceado.

O arranjo *layout* dos sistemas de tubulações deve visar tal condição, que é a assumida nos métodos de análise de flexibilidade previstos na Norma ASME B31.3.

Porém, as tensões térmicas não podem ser consideradas proporcionais às deformações, ao longo de um sistema de tubulação, em que há concentração de tensões em alguns locais do sistema, o que caracteriza a condição de um sistema desequilibrado ou desbalanceado.

O desbalanceamento pode resultar de situações como a seguir:

- (1) Trechos de tubos de diâmetro pequeno altamente estressados interligados com trechos de tubos maiores ou relativamente rígidos.
- (2) Redução local no diâmetro ou na espessura da parede do tubo, ou uso local de material com resistência ao escoamento reduzida (por exemplo, soldas circunferenciais de resistência inferior à do metal base).
- (3) Configuração de um sistema de diâmetro uniforme em que a expansão ou contração deve ser amplamente absorvida em um pequeno deslocamento da maior parte do trecho.
- (4) Variação do material de construção da tubulação ou da temperatura em uma linha, gerando diferenças de módulo de elasticidade dentro de um sistema de tubulação, que afetam significativamente a distribuição de tensões.

A operação de um sistema desbalanceado na faixa de temperaturas de fluência pode agravar os efeitos deletérios, devidos ao acúmulo de deformações por fluência nas regiões mais suscetíveis do sistema.

O desbalanceamento deve ser evitado ou minimizado pelo projeto do arranjo *layout* dos sistemas de tubulação, particularmente, aqueles que usam materiais de baixa ductilidade.

7. Medidas que promovem a flexibilidade

O conceito de flexibilidade é a característica de um sistema de tubulações ser capaz de deformar-se, para acomodar as dilatações ou contrações térmicas, mantendo-se as tensões e esforços nas linhas, inferiores aos valores máximos admissíveis.

O arranjo *layout* da tubulação deve, de preferência, proporcionar flexibilidade inerente, através de mudanças de direção, de modo que os deslocamentos produzam principalmente deformações de

flexão e de torção, quando não for possível mudanças de direção, reações e esforços excessivos podem ocorrer.

A boa prática é o projetista conseguir que o cálculo de flexibilidade seja somente um cálculo de verificação da configuração ou leiaute adotado no projeto.

Para isso, se deve estar atento, durante o desenho do arranjo, às medidas de controle dos efeitos da dilatação/contração térmica em tubulações, e conseqüentemente melhorar a sua flexibilidade:

- Não utilizar segmento em linha reta entre pontos fixos.
- Quanto maior o comprimento desenvolvido para a tubulação, em relação à distância aos pontos fixos, ancoragens e bocais de equipamentos, melhor a flexibilidade do sistema de tubulações.
- A flexibilidade das tubulações deve ser conseguida por traçados não retilíneos adequados, evitando-se o uso de junta de expansão ou pré-tensionamento ("*cold spring*"), a menos que seja a melhor solução técnica e econômica para o arranjo da tubulação, devendo, em cada caso, a projetista apresentar justificativa do seu emprego para aprovação do Proprietário.
- A Norma ASME B 31.3 adverte que a flexibilidade propriamente se aplica a materiais dúteis, não devendo ser usada para, por exemplo, tubos de ferro fundido.
- Quanto mais simétrico, em relação ao traçado, ou menor a desproporção entre os trechos da tubulação, melhor é a flexibilidade do sistema de tubulação.
- Contrariamente, quanto maior for a desproporção entre os diversos trechos, menos flexível é o sistema de tubulação.
- Quanto mais liberdade tiver a tubulação de se deformar, mais flexível é o sistema.
- Nos sistemas planos de tubulações, as dilatações impõem aos tubos deformações sob a forma de flexões, já nos sistemas tridimensionais ou espaciais, existem flexões e torções.
- Sempre que possível, adotar arranjo espacial ou tridimensional que é mais flexível, ou seja, permite maior liberdade de movimento à tubulação, que a configuração plana, pois, o efeito de flexão e torção é mais eficiente para manter o *range* ou faixa de tensões atuantes abaixo do admissível. .
- Instalar acessórios e válvulas sempre que possível próximos aos pontos de suportaçõa.
- Evitar e minimizar cargas externas.
- Instalar guias e batentes para direcionar os deslocamentos da tubulação devidos à expansão/contração térmica.
- Colocar chapas de deslizamento de material resiliente (Teflon) ou roletes sob os suportes, para reduzir o efeito do atrito, particularmente, em tubulações de grande diâmetro.
- Em sistemas sujeitos a vibrações instalar amortecedores de vibração.
- Quando necessário, o projetista deve proporcionar o aumento de flexibilidade com o emprego de curvas *loops* de expansão.
- Quando estritamente necessário, utilizar elementos deformáveis, como juntas de expansão, intercalados na tubulação, que permitam movimento angular, de rotação e/ou axial, de maneira a absorverem as dilatações/contrações previstas.
- O pré-tensionamento (*cold spring*), que introduz esforços e tensões iniciais opostos aos gerados pela variação térmica, também só deve ser usado quando estritamente necessário.

Os elementos deformáveis mais usados são as juntas de expansão, cujo emprego é de muita utilidade para se obter sistemas com flexibilidade, particularmente, em locais de espaço exíguo e em dutos de grande porte, porém, só devem ser usadas em situações especiais.

O emprego de pré-tensionamento é limitado a poucos casos, devido à dificuldade de execução e do registro em documentação de acompanhamento do relaxamento, que ocorre ao longo do tempo.

Portanto, a flexibilidade das tubulações deve ser conseguida, preferencialmente, por traçado não retilíneo adequado, com mudanças de direção no plano ou no espaço, evitando-se o emprego de juntas de expansão, bem como o pré-tensionamento ("*cold spring*"). O uso de qualquer um desses recursos só é permitido quando não houver outra solução técnica aceitável e com a autorização do Proprietário.

Quando forem usadas juntas de expansão, o sistema deve ser convenientemente suportado, ancorado e guiado, a fim de que as juntas não sejam submetidas ao peso das tubulações ou a quaisquer outros esforços externos.

8. Métodos de análise formal da flexibilidade de sistema de tubulações

Um sistema de tubulação sofre alterações dimensionais com qualquer variação de temperatura. Se for impedido da expansão ou contração livre por equipamentos conectados e por restrições como guias, batentes e ancoragens, ele fica tensionado e transmite esforços às extremidades.

O sistema de tubulação está também sujeito aos movimentos dessas restrições, que impõem deslocamentos na tubulação, além daqueles relacionados aos ciclos das variações térmicas, que podem comprometer a resistência à fadiga do material de fabricação dos tubos.

Esses movimentos podem resultar dos ciclos de mudanças de temperatura em equipamentos conectados, de oscilação devidas ao vento (em tubulação suportada por uma estrutura alta e esbelta), de eventos sísmicos (terremotos) ou de mudanças de maré (em tubulações situadas em docas).

Já, o movimento devido ao recalque ou assentamento do solo, uma vez que é um efeito de ciclo único, não influencia significativamente a vida à fadiga, mas acarreta tensões localizadas na tubulação.

Todos esses deslocamentos, oriundos das variações térmicas e impostos externamente, têm efeitos equivalentes no sistema de tubulação e devem ser considerados em conjunto, ao se empregar qualquer dos métodos de cálculo de flexibilidade, na determinação das deformações totais das várias partes e componentes do sistema de tubulação.

Os métodos de cálculo da flexibilidade de sistemas de tubulações são métodos de verificação, e não de dimensionamento direto, isto é, a partir de uma determinada configuração assumida para a tubulação, se verifica se a sua flexibilidade é ou não satisfatória.

Vários processos existem para os cálculos de flexibilidade das tubulações e em ordem decrescente de precisão, tem-se:

I. Método analítico geral ou abrangente conforme estabelecido na norma ASME B31.3 parágrafo 319.4.2 *Formal Analysis Requirements* e empregado em programas de computador especializados;

II. Métodos simplificados reconhecidos, desde que a tubulação em questão se enquadre exatamente dentro do campo estrito de sua aplicação.

8.1. Cálculo de Flexibilidade por métodos simplificados

Os métodos simplificados, tabelados ou gráficos, têm precisão satisfatória para as finalidades práticas, quando aplicados rigorosamente dentro das configurações e condições de fixação, para as quais foram deduzidos.

Por aproximação, é possível empregar estes métodos para configurações e condições de fixação semelhantes, não exatamente iguais, porém essas extrapolações, que em princípio se deve evitar, só podem ser feitas por pessoas experientes e com todo cuidado, porque podem conduzir a erros grosseiros e nem sempre em favor da segurança, principalmente quanto às reações nas extremidades.

Apesar de suas limitações, os métodos simplificados ainda são de utilidade quando não se dispõe de recursos de informática, para o emprego do método analítico geral, sendo usados principalmente nos seguintes casos:

1. Análise preliminar de quaisquer sistemas de tubulações;
2. Análise final de sistemas de serviços não severos ou críticos.

Os métodos simplificados têm seu emprego nas seguintes situações:

- a. Rápida verificação preliminar do arranjo de um sistema de tubulação, ou trechos deste, durante o seu projeto.
- b. Avaliação dos resultados de uma análise de flexibilidade realizada através de computador.
- c. Estimativas de tensões, forças e momentos em linhas que não necessitem mandatoriamente serem examinados por métodos analíticos computacionais

8.2. Cálculo de Flexibilidade pelo Método Simplificado da Viga em Balanço Guiada

Um dos métodos simplificados mais utilizado é o da viga em balanço guiada (*guided-cantilever method*), que é um método aproximado para o cálculo das tensões internas e dos esforços da reação nos extremos de uma tubulação, provenientes das dilatações ou contrações e/ou de movimentos dos pontos extremos.

Esse método não pode ser empregado para análise de sistemas de tubulação críticos ou em serviço tóxico ou letal, em que são exigidos cálculos mais precisos.

O método da viga em balanço guiada *guided-cantilever method* pode ser aplicado para quaisquer configurações, planas ou espaciais, que satisfaçam a todas as seguintes condições:

1. Todos os lados sejam retos e paralelos a uma das três direções ortogonais.
2. Todos os lados façam ângulos retos entre si.
3. Todos os lados sejam constituídos por tubos de mesmo material e mesmo momento de inércia, ou seja, de mesmo diâmetro e mesma espessura de parede.
4. O sistema tenha somente dois pontos de fixação, situados em seus extremos, e nenhuma restrição intermediária.

No estabelecimento desse método, foram feitas as seguintes hipóteses simplificadoras:

a. Todos os lados se deformam sem que haja deformações ou rotações nos ângulos, que permanecem retos e com os lados paralelos às direções da posição inicial. Isto é, os lados se deformam como se fossem vigas em balanço com os extremos guiados, como ilustra a figura a seguir.



b. A dilatação total que se dá em cada uma das três direções ortogonais, isto é, a soma das dilatações dos lados paralelos a uma direção, é integralmente absorvida pela flexão dos lados paralelos às outras duas direções ortogonais e vice-versa.

c. Não são levadas em consideração as torções que se dão nos diversos lados de uma configuração tridimensional.

Os resultados obtidos por esse método são em geral conservadores, isto é, os valores calculados das tensões e reações são superiores aos valores efetivos, porque a maioria dos sistemas é na realidade bem mais flexível do que o considerado nas hipóteses acima, pelas seguintes razões:

- Há sempre uma flexibilidade adicional causada pelas deformações dos ângulos (curvas).
- Nos sistemas espaciais, além da flexão há ainda a torção dos diversos lados, que contribui para aumentar a flexibilidade.
- Nem todos os lados deformam-se como vigas em balanço guiadas; alguns curvam-se, aumentando também a flexibilidade.

Entretanto, não se pode garantir que todos os resultados, para quaisquer sistemas, estejam sempre do lado da segurança.

Este método simplificado, da viga em balanço guiada, é utilizado, principalmente, para configurações mais simples de tubulações, como:

- Configuração em L;
- Configuração em U;
- Configuração em Z.

Porém também pode ser empregado para a análise de flexibilidade de qualquer configuração, plana ou espacial, desde que satisfaça às condições de aplicação desse método.

Para facilitar o uso do método da viga em balanço guiada, nas configurações em L, em U, em Z e outros arranjos, há formulários já preparados, em que as diversas etapas de cálculo estão sistematizadas, como os exemplos mostrados a seguir, retirados do livro:

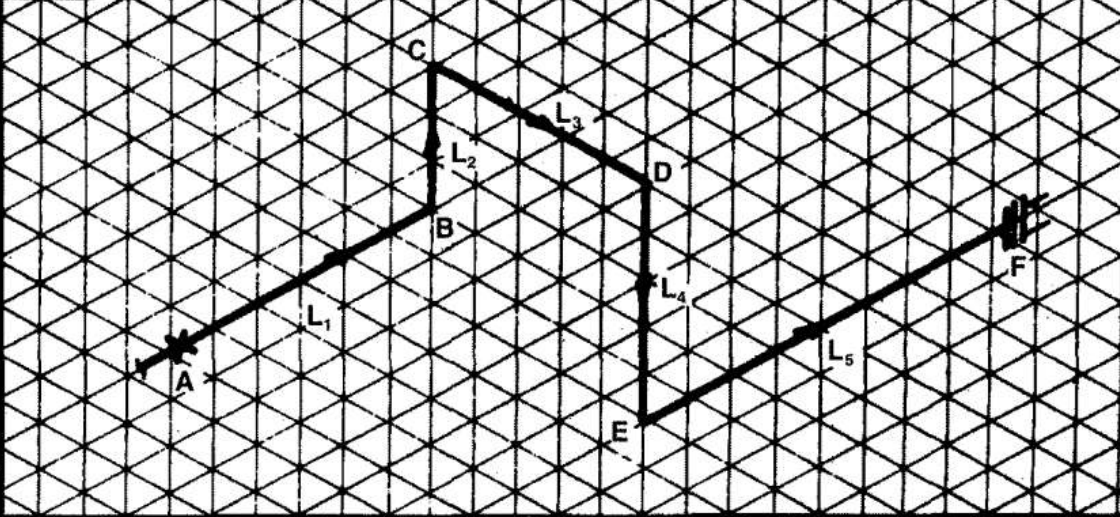
Tubulações Industriais - Cálculo

Autor: Prof. Pedro Carlos da Silva Telles

1º exemplo:

Tubulação de configuração em “U”

2º exemplo:
Tubulação de qualquer configuração

FLEXIBILIDADE DE UMA CONFIGURAÇÃO QUALQUER MÉTODO DA VIGA EM BALANÇO GUIADA (UNIDADES INGLESAS)						OBRA:	
						DES. Nº:	
						LINHA:	
						DATA:	REV.:
						POR:	
							
DÍAM. NOM. e ESPESS.	109" Série 40	DÍAM. EXT. (D)	10,75 pol	MOD. ELAST. a frio	$E_c = 29 \times 10^6$ psi		
MATERIAL	ASTM A. 106 G-A	TENSÃO ADMISSÍVEL	22.915	MOD. ELAST. a qº	$E_h = 21,5 \times 10^6$ psi		
TEMP. DE PROJETO	700 °F	$S_a = f(1,25 S_c + 0,25 S_h)$	psi	$C = \frac{I}{6D} \frac{E_h}{E_c}$	$\frac{161}{6 \times 10,75} \times \frac{21,5}{29} = 1,85$		
DILAT. UNITÁRIA (e)	0,056 pol/pé	MOM. DE INÉRCIA (I)	161 pol ⁴				
CÁLCULO DAS TENSÕES MÁXIMAS							
LADO	DIREÇÃO	SENTIDO	L (pés)	L ³	DILATAÇÃO $\delta = eL$ (pol)	TENSÕES MÁXIMAS (psi)	
						$S = K_L$	$S = K_L$
L ₁	π	+	15	3.375	+ 0,84	$S_{1y} = K_f L_1 = 11.670$	$S_{1y} = K_f L_1 = 2.190$
L ₂	φ	+	5	125	+ 0,28	$S_{2x} = K_f L_2 = 3.580$	
L ₃	ψ	+	10	1.000	+ 0,56	$S_{3x} = K_f L_3 = 7.160$	
L ₄	φ	-	25	15.625	- 1,40	$S_{4x} = K_f L_4 = 17.900$	
L ₅	π	+	18	5.842	+ 1,01	$S_{5y} = K_f L_5 = 12.816$	$S_{5y} = K_f L_5 = 2.638$
L ₆	-						
L ₇	-						
L ₈	-						
$\Delta_x = 0,84 + 1,01 = 1,85$			$\Delta_y = 0,56$			$\Delta_z = 1,40 - 0,28 = 1,12$	
$\Sigma L_x^3 = 3.375 + 5.842 = 9.217$			$\Sigma L_y^3 = 1.000$			$\Sigma L_z^3 = 125 + 15.625 = 15.750$	
$\Sigma L_x^3 + \Sigma L_y^3 = 10.217$			$\Sigma L_y^3 + \Sigma L_z^3 = 16.750$			$\Sigma L_x^3 + \Sigma L_z^3 = 24.967$	
$K_x = \frac{E_c \cdot D \cdot \Delta_x}{48 (\Sigma L_x^3 + \Sigma L_y^3)}$			$K_y = \frac{E_c \cdot D \cdot \Delta_y}{48 (\Sigma L_x^3 + \Sigma L_z^3)}$			$K_z = \frac{E_c \cdot D \cdot \Delta_z}{48 (\Sigma L_x^3 + \Sigma L_z^3)}$	
$\frac{29 \times 10^6 \times 10,75 \times 1,85}{48 \times 10.217} = 716$			$\frac{29 \times 10^6 \times 10,75 \times 0,56}{48 \times 24.967} = 146$			$\frac{29 \times 10^6 \times 10,75 \times 1,12}{48 \times 10.217} = 712$	
CÁLCULO DAS REAÇÕES NOS EXTREMOS							

PONTOS EXTREMOS	MOMENTOS FLETORES (ft. lbs)		FORÇAS DE REAÇÃO (lbs.)		MOM. LADO ADJAC.	FORÇA DE REAÇÃO
	M = C S	M = C S	$R = 2M/L$	$R = 2M/L$	M = C S	$R = 2M/L$
A	$M_{1y} = CS_{1y} = 21.589$	$M_{1z} = CS_{1z} = 4.051$	$R_{1y} = \frac{2M_{1y}}{L_1} = 540$	$R_{1z} = \frac{2M_{1z}}{L_1} = 2.878$	$M_{2y} = CS_{2y} = 6.623$	$R_{2z} = \frac{2M_{2z}}{L_2} = 2.649$
q	$M_{5y} = CS_{5y} = 23.709$	$M_{5z} = CS_{5z} = 4.880$	$R_{4y} = \frac{2M_{5y}}{L_5} = 542$	$R_{4z} = \frac{2M_{5z}}{L_5} = 2.812$	$M_{6y} = CS_{6y} = 33.115$	$R_{6z} = \frac{2M_{6z}}{L_6} = 2.649$

8.3. Cálculo de Flexibilidade pelo Método Analítico Geral

O método analítico geral é uma rotina de cálculo que conduz a resultados rigorosamente precisos, quando convenientemente aplicado.

É aplicável a quaisquer configurações de tubulação, sem limite para o número de ramais, ancoragens ou restrições intermediárias, tais como guias e batentes.

Por outro lado, é muito mais complexo e trabalhoso do que os métodos simplificados de cálculo.

O método analítico geral, é um método matemático rigoroso, baseado na consideração de cada trecho da tubulação como uma viga hiperestática.

Por outro lado, sua complexidade torna-o inadequado e antieconômico para aplicações rotineiras, no caso de cálculo manual.

Para o cálculo manual, é um processo muito trabalhoso, pois para cada tubulação chega-se a um sistema cujo número de equações e de incógnitas é $6(n - 1)$, sendo "n" o número de fixações e de ramais existentes.

Esse método adapta-se bem à programação para computador; por esse motivo, quando existem recursos de informática, o método analítico geral pode ser empregado, de forma rotineira, para o cálculo de todas as tubulações, que podem ser calculadas com rapidez e precisão, inclusive, podendo-se testar sucessivamente várias configurações diferentes, para verificar qual a melhor e mais econômica.

Consegue-se assim vencer a sua complexidade e com isso eliminar a sua única desvantagem em relação aos métodos simplificados, programando-se sua rotina de cálculo em programas *softwares* para computadores.

A análise mais exata de uma tubulação é com o emprego do método analítico geral, que é o exigido nos seguintes casos:

1. Tubulações de "Categoria M" (em serviços tóxicos ou letais), como definido pela norma ASME B 31.3, ou seja, tubulações para fluidos altamente tóxicos.
2. Tubulações de grande risco ou em locais perigosos, principalmente em temperaturas muito elevadas (acima de 350°C), quando a resistência mecânica dos materiais metálicos começa a decair.
3. Tubulações em serviços fortemente cíclicos, isto é, mais de 7 000 ciclos completos de aquecimento e resfriamento durante a vida útil.
4. Tubulações ligadas a equipamentos que só admitem pequenos esforços sobre os bocais.
5. Casos em que haja o máximo interesse em economia, devido ao uso de materiais de custo elevado nas tubulações.
6. Tubulações excessivamente rígidas devido ao diâmetro, à espessura da parede ou à configuração.
7. Tubulações dos circuitos principais de centrais termoelétricas ou nucleares.

Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado vários programas de computador capazes de simular sistemas de tubulação complexos, executando o cálculo de flexibilidade com rapidez e precisão, empregando a teoria do método analítico geral, da Norma ASME B31.3.

Esses programas permitem simular praticamente todos os tipos de carregamentos, a que as tubulações podem estar sujeitas, estáticos e dinâmicos, e apresentam ampla série de vantagens, compreendendo, dentre outras, as seguintes:

1. Não existem praticamente limitações quanto ao número de restrições ou de ramificações da tubulação.
2. Verificação do atendimento aos limites admissíveis de tensões estabelecidos pelas normas de projeto de tubulação.
3. Determinação dos esforços sobre suportes, ancoragens e quaisquer outros dispositivos de restrição à livre expansão térmica da tubulação (guias e batentes).
4. Verificação de esforços em bocais de equipamentos, segundo as normas aplicáveis.

5. Seleção de suportes de mola.
6. Cálculo dos movimentos e seleção de juntas de expansão.
7. Simulação de pré-tensionamento *cold spring*.
8. Geração de arquivos gráficos para elaboração de isométricos em computador.
9. Criação de modelos para cálculo de flexibilidade a partir de arquivos de programas de geração automática de desenhos CAD-*Computer Aided Design*, como o sistema Intergraph Smart® 3D.
10. Simulação de acessórios de tubulação (válvulas e flanges), com definição automática de seus pesos e dimensões básicas.

Conforme o grau de sofisticação do programa, a intervenção do projetista pode limitar-se apenas ao fornecimento de dados e a análise dos resultados.

Dentre os principais programas de computador de grande precisão, existentes no mercado para Cálculo mecânico e Análise de flexibilidade de sistemas de tubulações, podem ser mencionados os seguintes: CAESAR II e TRIFLEX.

Ambos são programas de Análise de Tensões em sistemas de tubulação e consideram o efeito de: temperatura, pressão, peso próprio do sistema de tubulação, peso de produto, ancoragens, restrição de movimentos como guias, batentes ou “stops”, suportes de mola, juntas de expansão, *cold spring*, atrito nos apoios, placas de deslizamento e/ou roletes sob os suportes, gelo, neve, vento, vibração, eventos sísmicos e cargas transientes, permitindo análises estáticas e dinâmicas.

- CAESAR II® Windows Pipe Stress Analysis
- TRIFLEX® Windows Pipe Stress Software

Os sistemas listados a seguir devem ser submetidos ao cálculo de flexibilidade, utilizando-se o método analítico geral, através de análise computacional, em função do diâmetro nominal e da temperatura de projeto.

Sistema	Temperatura (°C)	NPS										
		≤ 1 1/2	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18
Tanques de Armazenamento	Qualquer	<p>Análise de Flexibilidade Computacional Obrigatória</p> <p>Análise de Flexibilidade Computacional não Obrigatória</p> <p>Análise de Flexibilidade Computacional Obrigatória</p>										
Resfriadores a Ar	Qualquer											
Rotodinâmicos	Qualquer											
Geral	> 260											
	≥ 205 e < 260											
	≥ 150 e < 205											
	≥ 90 e < 150											
	≥ 40 e < 90											
	≥ 5 e < 40											
	< 5											

Fonte Norma Petrobras N-57- Sistemas que devem ter a análise de flexibilidade por método computacional

9. Tipos de tensões atuantes em sistemas de tubulações

Os sistemas de tubulação estão sujeitos a diferentes carregamentos: permanentes, como pressão e pesos; temporários, como vento e sobrecargas eventuais; e variações térmicas, como dilatação ou contração.

A carga de pressão interna desenvolve na parede do tubo cilíndrico, de parede fina, as seguintes tensões:

Sc- tensão circunferencial “*hoop stress*”, Sl- tensão longitudinal “*longitudinal stress*” e Sr- tensão radial “*radial stress*”.

	$S_c = \frac{pr}{t}$ $S_l = \frac{pr}{2t}$ $S_r = -p$	t = espessura da parede do tubo r = raio interno do tubo p = pressão interna Sc = tensão circunferencial Sl = tensão longitudinal Sr = tensão radial
--	---	---

Tensões devidas à pressão em tubo cilíndrico de parede fina

Nota:

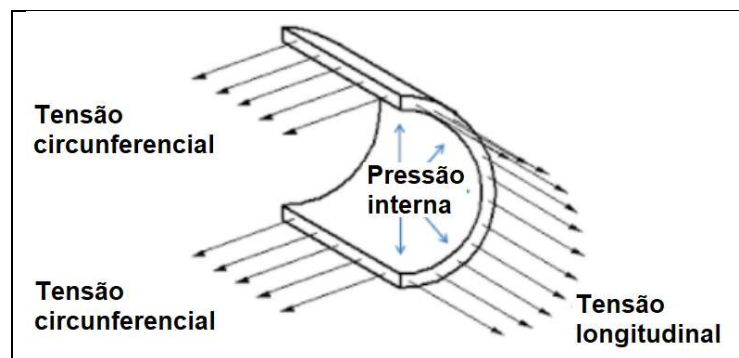
Os tubos cilíndricos são considerados como de parede fina, se a espessura for menor ou igual a 10% do raio interno, e neste caso as tensões são consideradas uniformes ao longo da espessura do tubo.

A **tensão radial** devido à pressão é negligenciada nos cálculos, devido ao baixo valor em relação às outras.

A **tensão circunferencial** é a tensão de tração que dimensiona a espessura do tubo, pois, é a tensão de maior valor, relacionada à pressão.

A tensão de tração máxima, devida à pressão interna, é a tensão circunferencial, que não deve ultrapassar a tensão admissível básica do material de fabricação do tubo, na temperatura de metal considerada no projeto, conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*.

A **tensão longitudinal** é múltipla, isto é, composta de várias parcelas, provenientes de diversos carregamentos, como: pressão, pesos, sobrecargas sobre a tubulação, atrito da tubulação nos suportes, variações térmicas, reações de juntas de expansão, golpes de aríete, acelerações, impactos, vento, terremoto, choque térmico, tensões decorrentes da montagem, recalque de fundações.



Tensões circunferencial e longitudinal atuantes na parede o tubo

As tensões longitudinais são oriundas de diferentes cargas categorizadas em três tipos básicos: sustentada, ocasional e térmica.

a. **Carga sustentada** *Sustained load* ou permanentes

As cargas sustentadas ou permanentes são resultantes de carregamentos estáticos presentes em um sistema de tubulações: pressão interna ou externa, peso próprio de tubos, ramais e acessórios, peso do fluido de operação, peso da água do teste de pressão hidrostática, peso de isolamento térmico, peso de revestimento interno, *clad* metálico ou refratamento.

b. **Carga ocasional** *Occasional load* ou temporária

As cargas ocasionais ou temporárias são resultantes de eventos temporários, devido a efeitos sísmicos, vento, vibração, impacto, reação ao alívio de válvula de segurança-PSV, golpe de aríete, sobrecargas eventuais etc., e são carregamentos de natureza temporária, que durante o período de tempo em que atuam coexistem com as cargas sustentadas ou permanentes.

c. **Carga térmica** *Thermal load* ou carga de dilatação ou contração

A carga térmica refere-se às mudanças de temperatura ao longo da tubulação, que geram expansão/contração térmica "cíclica", à medida que o sistema passa de um estado térmico para outro, por ex., de "fora de operação *shut-down*" para "operação normal" e depois voltando a parar.

Notas:

As categorias sustentada e ocasional se diferenciam pelo tempo da duração do carregamento, respectivamente, permanente e temporário, porém, a carga ocasional ao acontecer se soma à carga sustentada existente.

Nem todos os tipos de cargas são aplicáveis em todos os sistemas, por ex. se for esperado que a temperatura do sistema permaneça nas condições próximas ao ambiente, as cargas térmicas não são aplicadas.

As cargas sustentadas e ocasionais geram tensões primárias (são não autolimitadas) e as cargas térmicas geram tensões secundárias (são autolimitadas).

9.1. Tubo sob pressão interna

A seguir, é apresentado o cálculo de dimensionamento da espessura de um tubo cilíndrico reto, submetido à pressão interna, conforme Norma ASME B31.3 parágrafo 304.1.2 *Straight Pipe Under Internal Pressure*.

$t_m = t + c$ $t = \frac{PD}{2(SEW + PY)}$ $t = \frac{P(d + 2c)}{2[SEW - P(1 - Y)]}$ <p>Para $t < D/6$, a espessura de projeto de pressão interna para tubo reto não deve ser inferior à calculada, conforme as equações acima.</p> <p><u>Nota:</u> Para os tubos de $t \geq D/6$ ou $P/SE > 0,385$, o cálculo da espessura do projeto deve considerar os efeitos de fadiga,</p>	<p>A seguinte nomenclatura é utilizada nas equações de dimensionamento para pressão interna de tubo cilíndrico reto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • c = soma das tolerâncias mecânicas (profundidade da rosca ou ranhura) mais as tolerâncias de corrosão e erosão. <p>Para componentes roscados, a profundidade da rosca (dimensão h da Norma ASME B1.20.1, ou equivalente) deve ser aplicada.</p> <p>Para superfícies usinadas ou com ranhuras, onde a tolerância não é especificada, a tolerância deve ser considerada de 0,5 mm (0,02 pol.) além da profundidade especificada do corte.</p> <ul style="list-style-type: none"> • D = diâmetro externo do tubo. • d = diâmetro interno do tubo. • E = fator de qualidade do material do tubo, conforme a tabela Table A-1A <i>Basic Casting Quality Factors, Ec</i> e a tabela Table A-1B <i>Basic Quality Factors for Longitudinal Weld Joints in Pipes and Tubes, Ej</i>. • P = pressão manométrica intern do projeto. • S = valor da tensão de tração admissível, na temperatura de metal do projeto, do material de fabricação do tubo, conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 <i>Basic Allowable Stresses in Tension for Metals</i>. • t = espessura mínima de projeto calculada para pressão interna. • t_m = espessura mínima exigida, incluindo tolerâncias mecânicas e de corrosão/erosão. • W = fator de redução da resistência da junta soldada do material do tubo, na temperatura de projeto, de acordo com a tabela Table 302.3.5 <i>Weld Joint Strength Reduction Factor, W</i>. • Y = coeficiente para os materiais indicados na tabela Table 304.1.1 <i>Values of Coefficient Y for $t < D/6$</i>, válido para $t < D/6$, podendo ser interpolado para temperaturas intermediárias. <p>Para $t \geq D/6$, o valor de Y deve ser calculado com a expressão:</p> $Y = \frac{d + 2c}{D + d + 2c}$
---	---

9.2. Tubo sob pressão externa

Para o cálculo de dimensionamento de tubo reto cilíndrico, sob pressão externa e vácuo, parcial ou total, a indicação, da Norma ASME B31.3 parágrafo 304.1.3 *Straight Pipe Under External Pressure*, é seguir o procedimento descrito no Código ASME BPVC, Seção VIII, Divisão 1, itens UG-28 *Thickness of Shells and Tubes Under External Pressure*, UG-29 *Stiffening Rings for Cylindrical Shells Under External Pressure* e UG-30 *Attachment of Stiffening Rings*.

t = espessura assumida para o tubo, menos as tolerâncias de fabricação, tolerâncias mecânicas (profundidade da rosca ou ranhura) e as tolerâncias de corrosão e erosão.

L = comprimento total do tubo, usar o comprimento da linha de centro, entre quaisquer duas seções reforçadas do tubo, de acordo com UG-29.

Do = diâmetro externo do tubo

Nota:

O símbolo “ Do ” usado em ASME BPVC Sec VIII Div 1 é equivalente a “ D ” (“diâmetro externo do tubo”) da Norma ASME B31.3.

Pa = valor calculado máximo permitido de pressão externa de trabalho, para o valor assumido de espessura “ t ”, de tubos com valores $Do/t \geq 10$

Pa_1 e Pa_2 = valores calculados para tubos com valores $Do/t < 10$, usar o maior valor como máximo permitido de pressão externa de trabalho, para o valor assumido de espessura “ t ”,

- Para tubos com valores $Do/t \geq 10$

Sem alterações ao procedimento proposto pelo ASME BPVC VIII 1.

- Para tubos com valores $Do/t < 10$

Com a seguinte alteração ao procedimento proposto pelo ASME BPVC VIII 1: o valor de “ S ” a ser usado na determinação de “ Pa_2 ” deve ser o menor dos seguintes valores para o material do tubo na temperatura de projeto:

(a) 1,5 vezes o valor de tensão da tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*. da Norma ASME B31.3.

(b) 0,9 vezes o limite de elasticidade tabelado em ASME BPVC, Seção II, Parte D, Tabela Y-1.

10. Fatores que afetam as tensões longitudinais atuantes

Existem muitas formas diversas de componentes de tubulação, como curva, conexão em “T”, reduções, “boca de lobo”, que em comparação com o tubo, têm maior ou menor flexibilidade, dependendo da geometria e da descontinuidade introduzida, portanto, o nível de tensão nos acessórios é diferente da tensão no tubo, para os mesmos esforços e pressão.

Para levar em consideração esse efeito na modelagem de análise da tubulação, são introduzidos fatores de intensificação de tensão (SIF), fatores de flexibilidade (fator k) e índices de tensão sustentada (SSI).

As tensões longitudinais atuantes ou desenvolvidas pelas cargas sustentadas, ocasionais e térmicas são influenciadas por fatores multiplicativos, que alteram o valor dessas tensões. A Norma ASME B31.3 define os seguintes fatores, que influenciam na análise de sistemas de tubulações:

- Fator de intensificação de tensão *Stress Intensification Factor-SIF*;
- Fator de flexibilidade *Flexibility factor-k*;
- Índice de tensão sustentada *Sustained stress index- SSI*.

A Norma ASME B31.3 requer o uso de fator de intensificação de tensão (SIF ou i-factor), fator de flexibilidade (k-factor) e o índice de tensão sustentada, (SSI-factor), ao se verificar a adequação de tubulações sujeitas a várias cargas, incluindo cargas cíclicas, que podem produzir falhas por fadiga. Estes fatores são usados para considerar o comportamento dos diversos componentes da tubulação, que é diferente do comportamento de um tubo reto.

Na ausência de dados mais diretamente aplicáveis, o fator de flexibilidade, “k”, o fator de intensificação de tensão, “i”, e o índice de tensão sustentada, “ssi”, especificados na Norma ASME B31.3, Apêndice D tabela *Table D300 Flexibility Factor, k, and Stress Intensification Factor*, devem ser utilizados, porém, também podem ser desenvolvidos a partir da Norma ASME B31J.

Nota:

A Norma ASME B31J-2017 *Standard Test Method for Determining Stress Intensification Factors (i-Factors) for Metallic Piping Components*, a partir de 2017, apresenta fórmulas e tabelas para cálculo dos fatores de intensificação de tensão-SIF, índices de tensão sustentada-SSI e fatores de flexibilidade-k, que facilitam os projetos de engenharia, sem exigir primeiro que um experimento ou teste seja conduzido para cada componente ou conexão.

Ela também define um método padrão para desenvolver, simultaneamente, os fatores de intensificação de tensão-SIFs, índices de tensão sustentada-SSI e fatores de flexibilidade-k, para componentes específicos, sejam padronizados, não padronizados ou de projeto proprietário.

Para componentes de tubulação como válvulas, filtros, anéis de ancoragem ou curvas, não cobertos na Table D300, fatores de tensão combinados podem ser assumidos, por comparação de sua geometria com a dos componentes tabelados, sob total responsabilidade do projetista, pois há grande risco de serem significativamente diferentes dos valores reais.

Os fatores de flexibilidade, “k”, fatores de intensificação de tensão, “i”, e os índices de tensão sustentada, “ssi”, não devem ser inferiores a 1,0.

Os fatores de intensificação de tensão e os fatores de flexibilidade são válidos para o cálculo de tensões longitudinais térmicas ou de flexibilidade (dilatação/contração) e os índices de tensão sustentada são aplicados ao cálculo de tensões sustentadas e ocasionais.

10.1. Fator de intensificação de tensão *Stress Intensification Factor-SIF* ou “i-factor”

É empregado na análise de tensões de tubulação, para correlacionar a vida sob fadiga de componentes de tubulação (por ex. têns, joelhos, conexões de ramais), com a vida correspondente de solda de topo circunferencial em tubos retos, sujeitos a momentos de flexão.

O SIF para soldas de topo circunferenciais é definido como 1,0.

O fator de intensificação de tensão ou SIF é um fator correlacionado à testes de resistência à fadiga de componentes de tubulação e de conjuntos fabricados a partir de materiais ferrosos dúcteis.

Corresponde à razão entre a tensão nominal calculada elasticamente no tubo, que faz com que uma trinca, através da parede, seja gerada em uma solda de topo de tubo reto, após um determinado número de ciclos, e a tensão nominal calculada elasticamente que produz uma trinca na parede do componente conectado, no mesmo número de ciclos.

10.2. Fator de flexibilidade *Flexibility factor-k*

As conexões mais comuns usadas em um sistema de tubulações são as curvas, devido à característica inerente de flexibilidade, que resulta da capacidade de ovalizar sob a ação do momento fletor.

Uma curva com o mesmo diâmetro e espessura de um tubo, sob a ação do mesmo momento fletor, mostra uma capacidade de deformação “k” vezes a do tubo reto, e “k” é chamado de fator de flexibilidade

O desempenho de um sistema de tubulação, para absorver a expansão/contração térmica, depende principalmente de sua capacidade de fletir.

Quando um tubo reto está sujeito a flexão, ele se comporta como qualquer viga reta, ou seja, sua seção transversal permanece circular.

Por outro lado, a seção transversal circular de uma curva, quando sujeita a um momento fletor, torna-se oval, o que aumenta a capacidade de absorver a flexão imposta.

10.3. Índice de tensão sustentada *Sustained longitudinal stress-SSI*

Os índices de tensão sustentada *sustained stress index SSI* devem ser aplicados às cargas primárias permanentes (por exemplo, peso e pressão) e às cargas primárias ocasionais (por exemplo, vento, impacto, sobrecargas).

São fatores ou índices que levam em conta as tensões localizadas nas descontinuidades dos componentes da tubulação.

11. Tensões devidas às cargas longitudinais sustentadas e ocasionais- premissas e requisitos básicos

As tensões longitudinais provenientes das cargas sustentadas (permanentes) e ocasionais (temporárias) devem abranger todas as tensões longitudinais primárias às quais o sistema de tubulações está sujeito.

A tensão longitudinal sustentada, S_L , é definida como a soma das tensões longitudinais atuantes, em cada componente da tubulação, devidas à pressão, peso e outras cargas permanentes e/ou ocasionais

Quando acontece no sistema de tubulação a perda de suportação (por exemplo, tubos saindo do suporte) ou uso de suporte de mola de carga variável, devem ser consideradas as mudanças na distribui o da carga sustentada e nas deforma es dos componentes do sistema.

As tensões longitudinais térmicas, devidas à dilatação ou contração da tubulação, são calculadas independentemente, e sujeitas a tensões admissíveis próprias.

11.1. Tensões atuantes devidas às cargas longitudinais sustentadas e ocasionais

As tensões longitudinais, de tração e compressão, devidas às cargas permanentes e/ou ocasionais, conforme a Norma ASME B31.3 parágrafo 320.2 *Stress Due to Sustained Loads*, devem ser calculadas como a seguir.

As tensões nos tubos e componentes da tubulação são calculadas, excluindo-se as tolerâncias de fabricação e de corrosão/erosão, de acordo com os requisitos do parágrafo 304 *Pressure Design of Components* da Norma ASME B31.3.

Tensões atuantes devidas às cargas longitudinais sustentadas e ocasionais	
<p>A equação para cálculo da tensão devida às cargas sustentadas e ocasionais, S_L, é a seguinte:</p> $S_L = \sqrt{(S_a + S_b)^2 + (2S_t)^2}$ <p>S_L = Tensão resultante das tensões devidas às cargas longitudinais sustentadas e ocasionais</p> <p>A equação para cálculo da tensão devido à força longitudinal, S_a, é a seguinte:</p> $S_a = \frac{I_a F_a}{A_p}$	<p>A_p = área da seção transversal do tubo, considerando as dimensões nominais do tubo, menos as tolerâncias de fabricação, entalhe de roscas e de corrosão/erosão.</p> <p>I_a = índice de tensão da força longitudinal. Na ausência de dados mais aplicáveis, I_a é considerado 1,00.</p> <p>I_i = índice de tensão de momento fletor no plano. Na ausência de dados mais aplicáveis, I_i é considerado o maior entre 0,75.I_i ou 1,00.</p> <p>I_o = índice de tensão de momento fletor fora do plano Na ausência de dados mais aplicáveis, I_o é considerado o maior entre 0,75.I_o ou 1,00.</p> <p><u>Nota:</u> Os fatores “I_i” e “I_o” são: I_i = fator de intensificação de tensão de flexão no plano; I_o = fator de intensificação de tensão de flexão fora do plano.</p>

A equação para cálculo da tensão devido aos momentos fletores, S_b , é a seguinte:

$$S_b = \frac{\sqrt{(I_i M_i)^2 + (I_o M_o)^2}}{Z}$$

A equação para cálculo da tensão, S_t , devido ao momento torsor é a seguinte:

$$S_t = \frac{I_t M_t}{2Z}$$

I_t = índice de tensão de momento torsor

Na ausência de dados mais aplicáveis, é considerado 1,00

Nota:

Para os índices I_i , I_o e I_t de tensão sustentada-SSI-*index* consultar o Apêndice D - *Flexibility and Stress Intensification Factors* da Norma ASME B31.3.

É responsabilidade do projetista determinar os índices de tensão sustentada, I_a , I_i , I_o e I_t , quando um componente de tubulação não é explicitamente abordado no Apêndice D.

F_a = força longitudinal devido a cargas sustentadas e/ou ocasionais

Nota:

A força longitudinal sustentada, F_a , inclui, além da tensão devido ao peso da tubulação, a força devido à pressão, que é $P_j.A_f$.

P_j = pressão interna de projeto,

$A_f = \pi d^2/4$,

d = diâmetro interno do tubo considerando a espessura da parede do tubo menos as tolerâncias aplicáveis de fabricação, entalhe de roscas e de corrosão/erosão.

Para sistemas de tubulação que contêm juntas de expansão, é responsabilidade do projetista determinar a força longitudinal sustentada, o empuxo devido à pressão no sistema de tubulação.

M_i = momento fletor no plano devido a cargas sustentadas e/ou ocasionais

M_o = momento fletor fora do plano devido a cargas sustentadas e/ou ocasionais

M_t = momento torsor devido a cargas sustentadas e/ou ocasionais

Z = módulo de seção, do tubo calculado usando as dimensões nominais do tubo, menos tolerâncias de fabricação, entalhe de roscas e de corrosão/erosão.

11.2. Tensões admissíveis para as cargas sustentadas e/ou ocasionais

As tensões longitudinais de tração e compressão, devido às cargas sustentadas e/ou ocasionais, devem ser limitadas pelas tensões básicas admissíveis definidas pela própria Norma ASME B31.3 na tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*, de acordo com os materiais de construção e temperaturas de projeto. A interpolação entre as temperaturas é admitida.

I. Tensão longitudinal de carga sustentada ou permanente

A soma de todas as tensões primárias longitudinais provenientes da pressão, pesos e quaisquer outras cargas sustentadas ou permanentes (com exceção das tensões secundárias) deve ser inferior ao valor da tensão admissível básica do material, na temperatura de metal considerada no projeto, conforme Norma ASME B31.3 Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*.

II. Tensão longitudinal de carga ocasional ou transitória

Na ocorrência de cargas ocasionais provenientes de sobrecargas, vento, impacto etc., para a consideração dessas cargas, a Norma ASME B31.3, parágrafo 302.3.6 *Limits of Calculated Stresses Due to Occasional Loads*, determina que a soma de todas as tensões longitudinais, incluindo cargas sustentadas e ocasionais, é limitada a 1,33 vezes a tensão básica admissível do material na temperatura de metal considerada no projeto, conforme Norma ASME B31.3 Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*, contanto que o limite de escoamento do material não seja excedido.

III. Tensão cisalhante

Os valores de tensões admissíveis para as tensões de cisalhamento devem ser 0,80 vezes a tensão básica admissível de tração tabelada na tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals* da Norma ASME B31.3.

IV. Deflexão ou flecha

Os limites de deflexão ou flecha da tubulação não são requisitos da Norma ASME B31.3, porém, na prática, deve ser verificado se a flecha máxima está inferior aos seguintes limites:

- a) 25 mm, para tubulações fora das unidades de processo;
- b) 6 mm, para tubulações dentro das unidades de processo.

Limites mais rigorosos podem ser exigidos para linhas que devem evitar bolsões de líquido na configuração da tubulação.

V. Tensões admissíveis mais elevadas

Conforme Norma ASME B31.3 parágrafo 302.2.4 *Allowances for Pressure and Temperature Variations*, sujeito à aprovação do Proprietário, é permitido exceder a tensão admissível do material, na temperatura de metal considerada no projeto, estabelecida na tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*, em não mais do que:

- 33% para esforços que atuem durante até 10 horas seguidas, com o máximo de 100 horas em um ano;
- 20% para esforços que atuem durante até 50 horas seguidas, com o máximo de 500 horas em um ano.

Os acréscimos de tensões para períodos de curta duração não são permitidos para os serviços denominados de "Categoria M", para fluidos letais, de tubulações destinadas a fluidos altamente tóxicos, para serviços de alta pressão (classe de pressão ASME 600 e superior) e para temperatura elevada (na faixa de fluência do material).

Nota:

As faixas de temperaturas, função do material, a partir de que o fenômeno *creeping* ou fluência é esperado acontecer, são:

Material	Temperatura de início do regime de fluência
Aço Carbono <i>Carbon Steel</i>	370 a 400°C
Aço baixa liga <i>Low alloy Cr-Mo steel</i> 1 ¼ Cr 0.5 Mo 2 ¼ Cr – 1 Mo <i>Low alloy steel</i>	440 a 455°C
Aço baixa liga <i>Low alloy Cr-Mo steel</i> 9 Cr – 1 Mo	490 a 510°C
Aço Inoxidável Austenítico <i>Austenitic Stainless Steel</i> 18Cr–8Ni, Type 304 16Cr–12Ni–2Mo, Type 316 18Cr–8Ni–0.035Cmax, Type 304L 18Cr–8Ni–Mo–0.035Cmax, Type 316L	480 a 595°C

12. Tensões térmicas ou de flexibilidade - premissas e requisitos básicos

Se o sistema de tubulação não for restringido nas direções de dilatação/contração térmica (por ex., na direção axial de um tubo reto), o tubo se expande/contrai livremente; neste caso, não são geradas deformações, forças, momentos e tensões resultantes na tubulação.

Se, por outro lado, o tubo for "restringido" nas direções que deseja deformar-se termicamente (como em bocais do equipamento e suportes do tubo), essa restrição gera tensões e deformações térmicas cíclicas em todo o sistema, à medida que o sistema vai de um estado térmico a outro: frio ou parado e quente ou em operação.

Em contraste com as tensões oriundas de cargas sustentadas, como pressão interna ou peso, as tensões térmicas de flexibilidade podem atingir valores bem elevados, suficientes para causar escoamento local em várias partes de um sistema de tubulação.

Quando o sistema é operado de sua condição instalada para a temperatura de operação, qualquer escoamento ou fluência traz uma redução ou relaxamento de tensão.

Mais tarde, quando o sistema volta à sua condição original, ocorre uma reversão e redistribuição de tensões, que é referida como *self-springing*.

A este ciclo das tensões térmicas na tubulação, da condição de "parada" para "em operação" e novamente "parada", se denomina "*range*" ou faixa de tensão térmica".

As tensões térmicas de expansão ou contração (SE) são denominadas “*range* ou faixa de tensão térmica atuante”, desenvolvidas pelas cargas secundárias geradas na expansão/contração térmica e/ou no deslocamento de extremidade do tubo.

Quando tais “*ranges* ou faixas de tensões térmica atuantes” excedem ao “*range* ou faixa de tensão térmica admissível” especificada pelo código ou norma empregada para o projeto da tubulação, o sistema fica suscetível a “falha por fadiga”.

Portanto, para evitar “falha por fadiga” devido a cargas térmicas cíclicas, o sistema de tubulação deve ser suficientemente flexível, ou seja, não rígido.

As cargas térmicas também geram esforços em bocais de equipamentos interligados à tubulação, portanto, guias, anteparos axiais e ancoragens intermediárias são recomendados para direcionar o crescimento térmico para longe dos bocais dos equipamentos.

No cálculo da flexibilidade de um sistema de tubulação entre os pontos de ancoragem, o sistema deve ser tratado como um todo, incluindo todas as partes da linha, todas as restrições introduzidas, com o objetivo de reduzir os momentos e forças sobre equipamentos ou pequenos ramais, os deslocamentos das extremidades, e também as reações devidas ao atrito nos apoios.

A tubulação é dividida em nós identificados e que requeiram análise, tais como, bocais de equipamentos, acessórios de mudança de direção, suportes rígidos ou não rígidos, válvulas, flanges, cargas aplicadas, por exemplo, sendo os ramos, os trechos entre dois nós consecutivos.

Os valores dos deslocamentos térmicos, a serem usados para calcular a faixa *range* de tensões devem ser determinados como a diferença algébrica entre o valor na temperatura de operação máxima de metal e o valor na temperatura de operação mínima de metal ou o valor na temperatura durante a instalação, o que for menor, para o ciclo térmico em análise.

12.1. Cálculo do *range* ou faixa de tensões de flexibilidade atuantes: SE

O cálculo do *range* ou faixa das tensões térmicas atuantes deve ser conforme a Norma ASME B31.3 parágrafo 319.4.4 *Flexibility Stresses*.

(a) As tensões axial, flexão e torção devem ser calculadas usando o módulo de elasticidade do material do tubo a 21°C (70°F), e então combinadas de acordo com a equação, a seguir, para determinar o *range* ou faixa de tensão térmica atuante, SE, que não deve exceder o *range* ou faixa de tensão permitida, SA, indicada no parágrafo 302.3.5 *Limits of Calculated Stresses Due to Sustained Loads and Displacement Strains* da Norma ASME B31.3.

(b) O *range* ou faixa de tensão térmica atuante, SE, deve ser calculado conforme Norma ASME B31.3 parágrafo 319.4.4(a).

Range ou faixa de tensões de flexibilidade atuantes: SE	
<p>SE= <i>range</i> de tensões atuantes, resultante das variações de temperaturas:</p> $S_E = \sqrt{(S_a + S_b)^2 + (2S_t)^2}$ <p>Sb = tensão resultante de momentos fletores:</p> $S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z}$ <p>Sa = tensão axial devido às deformações e deslocamentos:</p> $S_a = i_a F_a / A_p$ <p>St = tensão devida ao momento torsor:</p> $S_t = i_t M_t / 2Z$	<p>SE= <i>range</i> de tensões térmicas ou de flexibilidade atuantes, resultado das variações térmicas</p> <p>Sa = tensão axial devido às deformações e deslocamentos Sb = tensão de flexão resultante de momentos fletores St = tensão de torção resultante de momento torsor</p> <p>Ap = área da seção transversal do tubo, considerando a espessura da parede do tubo menos as tolerâncias aplicáveis de fabricação, entalhe de roscas e de corrosão/erosão Z = módulo de seção do tubo, calculado usando as dimensões nominais do tubo, menos tolerâncias de fabricação, entalhe de roscas e de corrosão/erosão.</p> <p>Fa = força axial devido às deformações e deslocamentos Mt = momento torsor Mi = momento fletor no plano Mo = momento fletor fora do plano</p> <p>ii = fator de intensificação de tensão de flexão no plano io = fator de intensificação de tensão de flexão fora do plano ia = fator de intensificação da tensão axial. it = fator de intensificação da tensão de torção.</p> <p><u>Nota:</u></p>

	<p>Para os fatores de intensificação de tensão consultar o Apêndice D - <i>Flexibility and Stress Intensification Factors</i> da Norma ASME B31.3.</p> <p>É responsabilidade do projetista determinar os fatores de intensificação de tensão, quando um componente de tubulação não é explicitamente abordado no Apêndice D.</p>
--	--

12.2. Limites das tensões devido às cargas térmicas ou de flexibilidade: tensões secundárias

Durante a operação, as tensões de flexibilidade, oriundas de dilatação/contração térmica e/ou de movimento/deslocamento imposto à tubulação, podem causar escoamento ou fluência local, em várias partes de um sistema de tubulação, que provocam um relaxamento da tensão no sistema. No entanto, quando o sistema volta à condição fora de operação, ocorre uma reversão e redistribuição de tensões que é denominada *self-springing*.

Enquanto as tensões resultantes das deformações de variações térmicas diminuem com o tempo, devido ao escoamento ou fluência, a diferença algébrica entre deformações do sistema de tubulações, da condição “em operação”, para a condição “como instalado ou fora de operação”, permanece substancialmente constante durante qualquer ciclo de operação.

Essa diferença nas deformações produz um diferencial de tensão correspondente, chamada de “*range* ou faixa de tensão de flexibilidade”, que é usada como critério no projeto de tubulação para flexibilidade.

Portanto, para a análise da flexibilidade do sistema de tubulações, as tensões devidas às dilatações/contrações térmicas são limitadas pelo *range* ou faixa de tensões térmicas.

O *range* ou faixa de tensão térmica permitida, SA, deve ser conforme especificado na Norma ASME B.31.3 Parágrafo 302.3.5 *Limits of Calculated Stresses Due to Sustained Loads and Displacement Strains*, para sistemas submetidos a esforços principalmente de flexão e/ou torção.

O *range* ou faixa de tensão de deslocamento admissível, SA, é baseado em testes de aços Carbono e aços Inoxidáveis austeníticos, por isso, se deve ter cuidado ao usar as equações do *range* ou faixa de tensão permitido para alguns materiais não ferrosos (por exemplo, certas ligas de Cobre e Alumínio) em aplicações que não sejam de baixo ciclo.

Os requisitos para a análise de flexibilidade de tubulação são:

(a) o *range* ou faixa de tensões calculadas em qualquer ponto da tubulação, devido a dilatações/contrações térmicas e/ou deslocamentos no sistema, não deve exceder o *range* ou faixa de tensão admissível, SA, conforme Norma ASME B31.3 parágrafo 302.3.5(d).

Nota:

A Norma ASME B31.3 no Apêndice P *Appendix P Alternative Rules for Evaluating Stress Range* apresenta outras regras, alternativas, para avaliar o *range* ou faixa de tensão.

(b) as forças de reação nas extremidades não devem ser prejudiciais aos suportes ou equipamentos conectados.

(c) o movimento computado da tubulação deve estar dentro de quaisquer limites prescritos e devidamente contabilizados nos cálculos de flexibilidade.

(d) se for determinado que um sistema de tubulação não tem flexibilidade inerente adequada, empregar as medidas possíveis para aumentar a flexibilidade.

Range ou faixa de tensões térmicas ou de flexibilidade admissível, SA	
<p>O <i>range</i> ou faixa de tensões térmicas atuantes, SE, em um sistema de tubulação, não deve exceder o <i>range</i> ou faixa de tensões admissível, SA, calculado com a equação:</p> $S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h)$ <p>Quando Sh é maior que SL, a diferença entre eles pode ser somada ao termo 0,25Sh. Nesse caso, a faixa de tensão admissível é calculada pela seguinte equação:</p> $S_A = f[1.25(S_c + S_h) - S_L]$	<p>SA = <i>range</i> ou faixa de tensões de flexibilidade admissível,</p> <p>f = fator de redução de tensão para serviços cíclicos</p> <p>Sc = tensão admissível básica do material na temperatura mínima do metal esperada, durante o ciclo de variação de temperatura em análise. Em geral essa temperatura é a ambiente.</p> <p>Sh = tensão admissível básica na temperatura máxima do metal esperada, durante o ciclo de variação de temperatura em análise, considerando-se, além da condição normal, de operação, todas as</p>

f = fator de redução de tensão, considerando o número de ciclos de variação da temperatura, calculado pela equação:

$$f = 6.0(N)^{-0.2} \leq f_m$$

ou determinado pela figura Figure 302.3.5 *Stress Range Factor, f* da Norma ASME B31.3.

Para tubulações com menos de 7 000 ciclos de aquecimento e resfriamento durante a vida útil, tem-se $f = 1$; quando o número de ciclos for maior do que 7 000 tem-se $f < 1$.

Ao se usar um valor de $f > 1,0$, S_c e S_h devem ser limitados a um máximo de 138 MPa (20 ksi).

situações anormais ou eventuais que possam ocorrer.

S_L = Tensão resultante das tensões devidas às cargas longitudinais sustentadas e ocasionais

Valores de S_c e S_h conforme Norma ASME B31.3 tabela Table A-1 *Basic Allowable Stresses in Tension for Metals*.

N = número equivalente de ciclos de variações de temperatura, durante a vida útil esperada da tubulação.

f_m = valor máximo do fator "f", sendo 1.2 para materiais ferrosos com resistências à ruptura mínimas especificadas ≤ 517 MPa (75 ksi) e em temperaturas de metal $\leq 371^\circ\text{C}$ (700°F); caso contrário $f_m = 1.0$

Para o mesmo material e nas mesmas condições, tem-se $S_A > S_h$, isto é, o limite adotado pela norma para as tensões secundárias é bem maior do que o adotado para as tensões primárias, porque as primárias não são autolimitantes, e para elas não existe o efeito de alívio do relaxamento espontâneo.

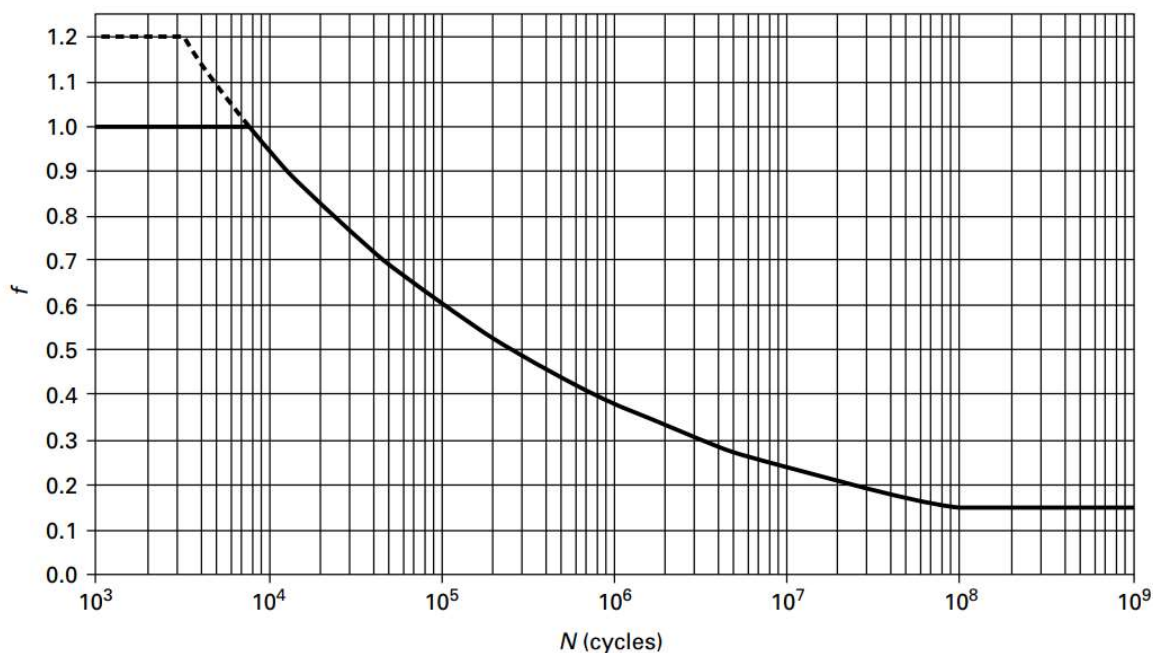


Figure 302.3.5 Stress Range Factor, f

- Ferrous materials, specified minimum tensile strength ≤ 517 MPa (75 ksi), and at design metal temperatures $\leq 371^\circ\text{C}$ (700°F)
- All other materials

ANEXOS

1. Tipos de Juntas de Expansão

Há diversos tipos de juntas de expansão, em função dos movimentos a serem absorvidos e da necessidade de não transmissão da força de empuxo da pressão.

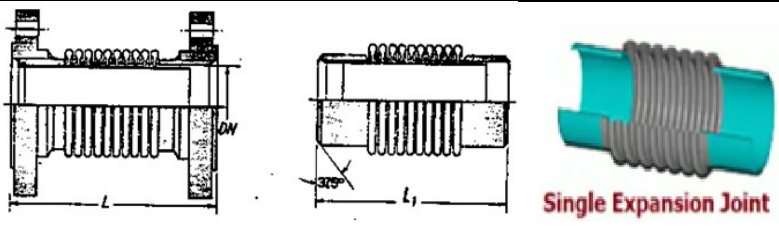
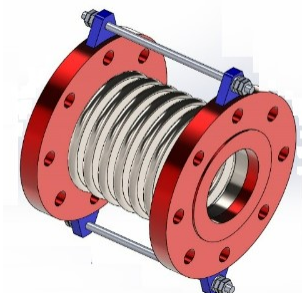

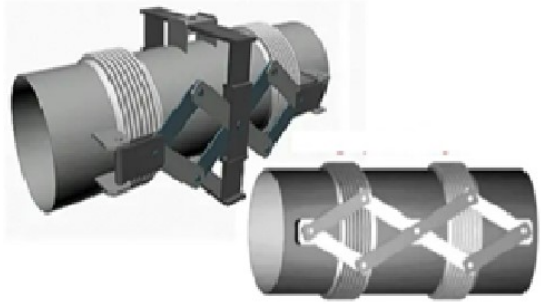
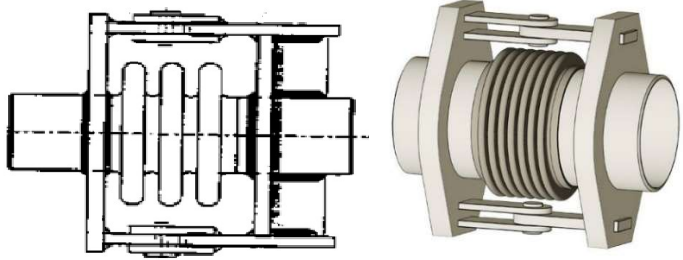
As juntas de expansão de tubulação podem ser agrupadas em duas categorias:

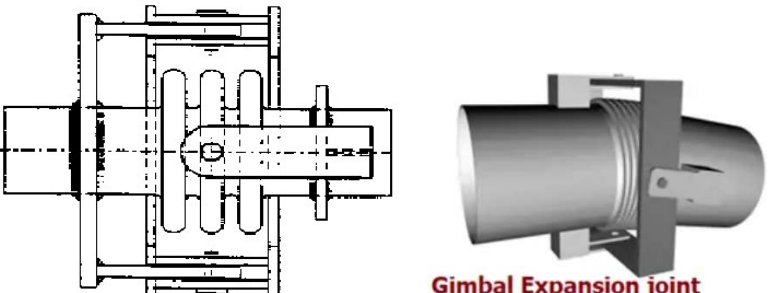
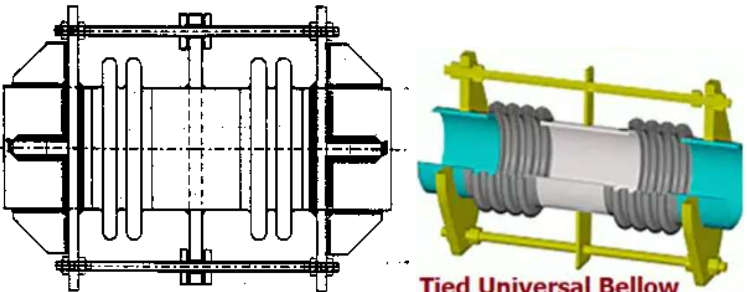
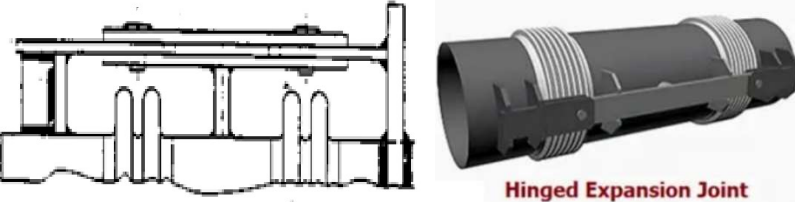
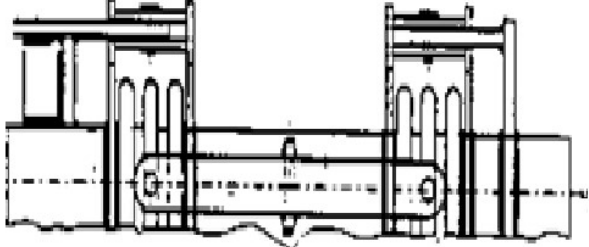
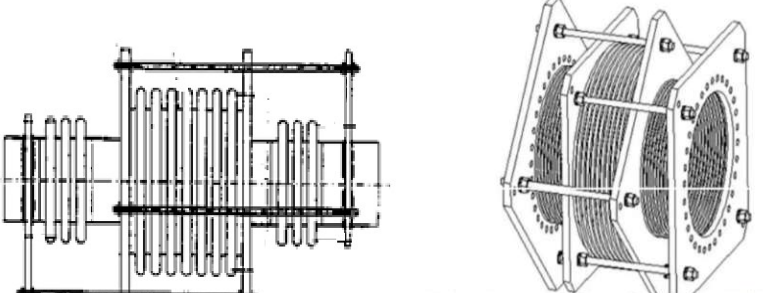
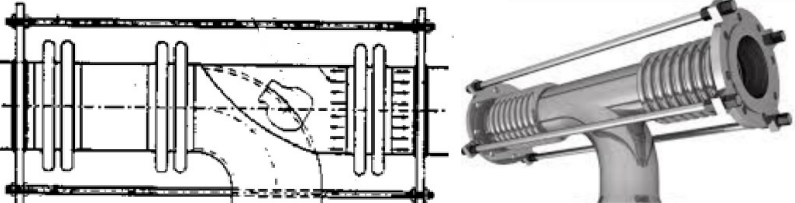
- Junta de expansão não resistente à pressão

São montagens que não são capazes de restringir o empuxo de pressão do sistema, assim, além das forças de mola dos foles, também o empuxo de pressão deve ser resistido pelas ancoragens e bocais de equipamentos.

- Junta de expansão resistente à pressão

São montagens em que o corpo *hardware* é capaz de restringir o empuxo de pressão do sistema, portanto, apenas as forças de mola, devido à deflexão dos foles, são transferidas para as ancoragens e bocais de equipamentos.

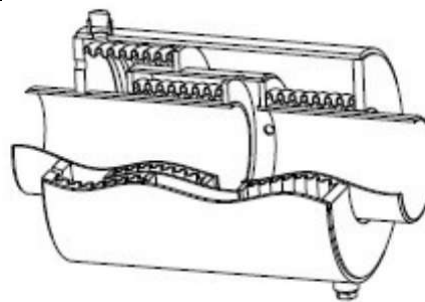
Tipos de juntas de expansão	
	Ilustração
<p>Junta de expansão de fole simples Transmite o empuxo de pressão.</p>	 <p>Single Expansion Joint</p>
<p>Junta de expansão de fole simples com tirantes Os tirantes são presos ao tubo ou flange com terminais soldados. Esses tirantes suportam o empuxo de pressão. <u>Nota:</u> Os tirantes tensores são projetados para absorver o empuxo de pressão. Há também os tirantes limitadores que são usados apenas para proteger os foles de movimentos além dos projetados, possíveis de ocorrer em emergências operacionais, e nestes casos não resistem à força da pressão.</p>	 <p>Single Tied Bellows</p>
<p>Junta de expansão universal Consiste de dois foles simples conectados por um carretel central com extremidades de flange ou tubo. Este arranjo chamado de universal permite maior absorção de movimentos axiais, laterais e angulares, do que a junta de expansão de fole simples. Transmite o empuxo de pressão.</p>	 <p>Universal Expansion joint</p>
<p>Junta de expansão universal pantográfica A articulação pantográfica é um dispositivo semelhante a uma tesoura, de barras e perfis metálicos, preso ao corpo da junta de expansão. São usadas para distribuir e controlar os movimentos entre os dois foles de uma junta tipo universal e suportar o peso do tubo intermediário. Não são projetados para restringir o empuxo de pressão.</p>	 <p>Pantographic Universal Expansion Joint</p>
<p>Junta articulada ("hinged assembly") Permite movimento angular em um só plano. O empuxo de pressão fica contido nas articulações da junta e não é transmitido ao sistema.</p>	 <p>Hinged Expansion Joint</p>

<p>Junta cardânica ("gimbal assembly") Permite movimento angular em qualquer plano. O empuxo de pressão fica contido no anel cardã e não se transmite ao sistema.</p>	 <p style="text-align: right;">Gimbal Expansion joint</p>
<p>Junta universal com tensores ("tied universal joint assembly") Os tirantes tensores absorvem o empuxo de pressão e limitam os movimentos apenas ao deslocamento lateral. Quando a junta é com somente 2 tirantes, a 180°, pode absorver também movimento angular. O empuxo de pressão fica contido entre as barras não se transmitindo ao sistema. Porém, quando a junta universal deve também absorver movimento axial, ela passa a transmitir empuxo de pressão ao sistema.</p>	 <p style="text-align: right;">Tied Universal Bellow</p>
<p>Junta universal articulada Permite só movimento angular ou rotação em apenas um plano e não transmite o empuxo.</p>	 <p style="text-align: right;">Hinged Expansion Joint</p>
<p>Junta universal cardânica Permite movimento angular ou rotação em qualquer plano e não transmite o empuxo.</p>	
<p>Junta balanceada "em linha" ("in-line pressure balanced assembly") São instaladas em trechos retos, absorvendo somente movimento axial. O empuxo de pressão é compensado por um fole extra.</p>	 <p style="text-align: right;">In-Line Pressure Balanced Expansion Bellow</p>
<p>Junta balanceada com mudança de direção ("elbow pressure balanced assembly") São instaladas onde é possível uma mudança de direção e absorvem movimento axial e lateral. O empuxo de pressão é compensado por um fole extra.</p>	

Junta balanceada pressurizada externamente (“externally pressurized pressure balanced assembly”)

São instaladas quando um grande movimento axial e o empuxo de pressão devem ser absorvidos.

O balanceamento é semelhante ao conjunto de junta de expansão balanceada “em linha”, porém as forças opostas são geradas pela pressão que atua na parte externa do fole.



Externally Pressurized Pressure Balanced Assembly

2. Principais acessórios de Juntas de Expansão

2.1. Tirantes tensores e tirantes limitadores da movimentação do fole

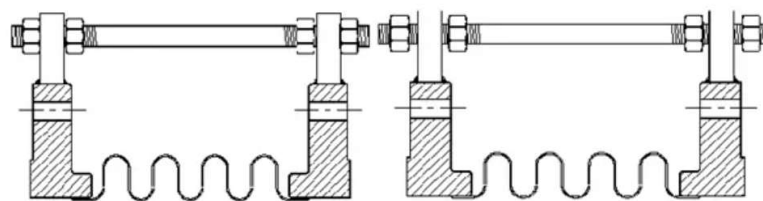
São basicamente barras circulares ou tirantes, usadas em cada fole, normalmente, fixados no corpo de juntas de expansão do tipo universal.

Os tirantes tensores são projetados para absorver cargas de pressão e esforços transmitidos pela tubulação à junta de expansão, porém, a capacidade de absorver o movimento axial é perdida..

Por outro lado, os tirantes limitadores são projetados para proteger os foles de movimentos além dos projetados, possíveis de ocorrer devido ao mau funcionamento da planta ou falha de uma ancoragem, mas nesse caso não resistem ao empuxo de pressão.

Assim, os tirantes são usados para:

- tirante tensor: resistir à força ou empuxo de pressão;
- tirante limitador: proteger o fole, limitando o movimento a ser absorvido pela junta.



Tirante de pressão do fole

Tirante limitador de abertura do fole

2.2. Pantógrafos ou Ligações Pantográficas

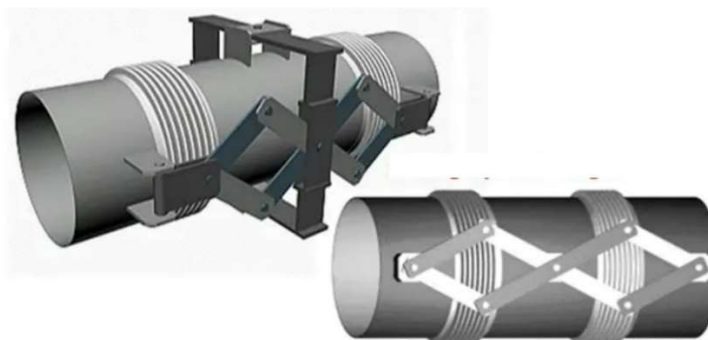
A articulação pantográfica é um dispositivo semelhante a uma tesoura de feitas de barras e perfis metálicos presas ao corpo da junta de expansão.

Elas são usadas para distribuir e controlar os movimentos de dilatação térmica igualmente entre os dois foles de uma junta tipo universal e suportar o peso do tubo intermediário, no entanto, elas não restringem o empuxo ou força de pressão.

Em juntas instaladas na posição vertical ou inclinada os pantógrafos têm a função de impedir o esmagamento do fole inferior.

A ligação pantográfica deve:

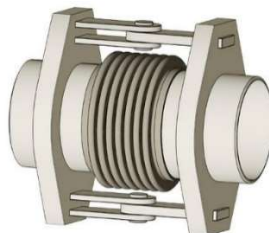
- Garantir movimento simultâneo e uniforme dos foles;
- Sustentar o trecho intermediário da junta enquanto permite livremente os movimentos.



Ligação pantográfica

2.3. Articulações, dobradiças ou pivôs *hinges*

As dobradiças são usadas nas juntas de expansão e permitem somente movimento angular em um único plano, além de resistir à força de pressão.



2.4. Anel cardânico

São usados anéis cardânicos nas juntas de expansão para permitir somente movimentos angulares em qualquer plano e resistir à força de pressão.



Nota:

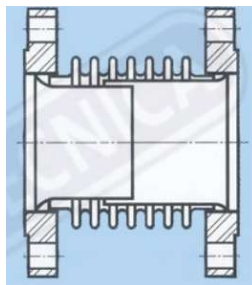
Os componentes das partes de articulações das juntas de expansão articuladas e cardânicas são dimensionados para resistir ao empuxo de pressão no fole.

Além do esforço de pressão, para o dimensionamento dessas articulações, devem ser considerados:

- Esforços de tração ou compressão e de flexão provenientes de cargas de peso adjacentes à junta;
- Torção, em relação ao eixo longitudinal da junta, provocada pelo sistema.
- Esforços cisalhantes e de contato ("*bearing stress*") nos furos e nos pinos dos pivôs.

2.5. Camisa ou luva interna

São cilindros concêntricos aos foles, internamente, fixos numa extremidade, tendo a outra livre para dilatar-se. As finalidades da camisa interna são proteger o fole contra meios agressivos e/ou erosivos, evitar a vibração do fole pela velocidade do fluxo e reduzir perda de carga na junta de expansão.



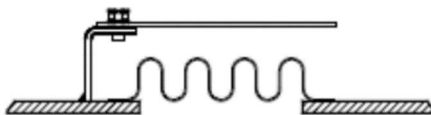
2.6. Conexões para purga

Em juntas com purga da camisa interna, em que se deve impedir o acesso do produto aos foles, são montadas conexões para injeção do fluido de purga contínua, normalmente vapor d'água.



2.7. Luva externa ou cobertura

Externamente, sobre os foles, para proteção contra acidentes no transporte e instalação, são montadas luvas ou camisas externas. Elas são fixas numa extremidade e livres na outra. Também se destinam a proteger os foles contra as intempéries e riscos de acidentes durante a operação da junta de expansão. Os foles isolados externamente também servem de suporte para o isolamento térmico.



2.8. Olhais de içamento

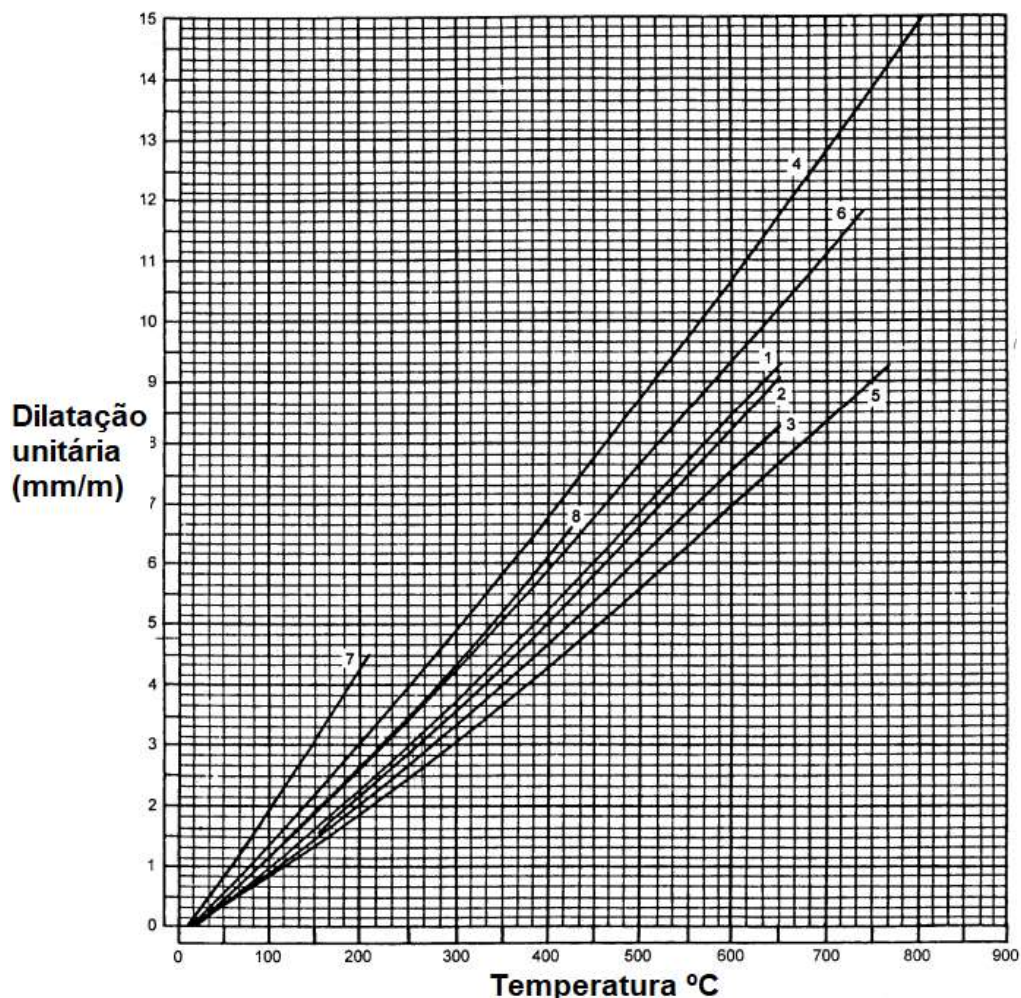
Para a movimentação da junta, durante o transporte e instalação, e ainda nas ocasiões de remoção para reparos, são previstos orelias ou olhais de içamento. Eles são dimensionados para sustentarem o peso da junta completa (como instalada), e se deve prever um fator de impacto (no

mínimo 2), multiplicativo, para prevenir cargas súbitas, durante a movimentação e a instalação das juntas.

2.9. Travas para transporte e instalação

Para evitar que os foles sejam comprimidos, ou distendidos ou deformados lateralmente durante as movimentações para transporte e instalação, as juntas devem vir de fábrica com barras de travamento, ao longo do corpo. Essas travas devem ser mantidas até a instalação no local da montagem e durante os testes de pressão do sistema. Para a partida ou entrada em operação do sistema é fundamental a remoção dessas travas.

2.10. Dilatação linear unitária de metais em função da temperatura



Materiais:

1- Aço carbono; aços-liga C-1/2 Mo e 1/2 Cr-1/2Mo	5- Aços inoxidáveis ferríticos 12, 17 e 27 Cr
2- Aços-liga 1 a 3 Cr-1/2 Mo	6- Cobre
3- Aços-liga 4 a 10 Cr-1/2 a 1 Mo	7- Alumínio
4- Aços inoxidáveis austeníticos 16 a 18 Cr-8 a 10 Ni	8- Monel