

### 3.3 Classificação das tensões pelas normas aplicáveis

Uma tubulação pode falhar (romper) de diversos modos devido a uma ampla variedade de razões. Classificam-se as tensões com relação à sua origem e ao tipo de falha, distúrbio ou alteração que possam causar: *Primárias, Secundárias e De pico*.

Como veremos a seguir, o comportamento das tensões primárias é completamente diferente do das tensões secundárias, e por esse motivo as normas de projeto consideram essas duas classes de tensões separadamente, inclusive com valores diferentes das tensões admissíveis, embora evidentemente estejam atuando de forma simultânea no material.

#### (1) Tensões primárias

Tensões primárias são aquelas geradas pela imposição de cargas mecânicas (forças) e mantém um valor constante durante todo o tempo em que a solicitação estiver atuando. Elas são necessárias para satisfazer as condições de equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos externos agindo sobre a tubulação, tais como pressão interna ou externa, pesos, sobrecargas etc. **As tensões primárias devidas a pressão, pesos etc. existem sempre e não serem aliviáveis com o correr do tempo.**

#### (2) Tensões secundárias

Tensões secundárias são as que resultam não de carregamentos externos mas que resultam da existência de restrições geométricas no sistema, que impedem ou limitam a livre dilatação e/ou movimentação da tubulação. **No caso ideal de uma tubulação inteiramente livre para dilatações e movimentos, essas tensões não existiriam.** Com o passar do tempo, as tensões secundárias tendem a diminuir de intensidade, em consequência do fenômeno do “relaxamento espontâneo” (self-springing). Essas tensões são autolimitantes, tendo por valor máximo o valor do limite de escoamento do material. Por isso, as tensões secundárias são também chamadas de autocontidas ou auto-restringidas (self-limited).

#### (3) Tensões de pico

Tensões de pico são aquelas que são restritas e localizadas; praticamente não geram deformação alguma, e por isto alcançam altos valores. Tipicamente, são geradas por gradientes térmicos em paredes de tubos, ou por concentradores de tensão tais como conexões ou pontos de solda. Como estas tensões não provocam deformações significativas, elas não podem ser responsáveis por rupturas de caráter plástico. Porém, se

a aplicação da carga é cíclica, o material é submetido a grandes esforços localizados, constituindo assim outra fonte potencial de falha por fadiga.

### 3.4 Cargas ocasionais e de serviço

As cargas responsáveis pelas tensões primárias são classificadas com relação à sua duração de aplicação. Dividem-se em:

1. Cargas ocasionais (*Occasional loads*): o sistema sofre sua ação esporadicamente, apenas **durante uma pequena parcela do seu tempo de vida operacional**. Terremotos, tufões e golpes de aríete são exemplos típicos deste tipo de carga.

2. Cargas de serviço (*sustained loads*): deverão ser encontradas durante toda a vida operacional da tubulação, como por exemplo o peso do fluido contido no tubo.

Com relação aos mesmos parâmetros, a ASME Seção III as subdivide em:

- **nível A, normal**: Usualmente são as cargas devidas a pressão interna e peso.
- **nível B, irregular (*upset*)**: Neste caso incluem-se, entre outras, cargas devidas a golpes de aríete, descarga de válvula de alívio, movimentos sísmicos de **pequena intensidade**.
- **nível C, emergência**: compreende as **cargas extraordinárias**, sob as quais o sistema ainda consegue ser capaz de trabalhar em segurança até que seja possível ser desativado para reparos e inspeções. Estão compreendidas neste item as cargas devidas a terremotos intensos, por exemplo.
- **nível D, falha (*faulted*)**: compreende as cargas associadas às **mais extremas e improváveis ocorrências operacionais** às quais o sistema pode ser submetido, de tal modo que o sistema sofra danos e deformações que impeçam seu funcionamento em condições de segurança.

### 3.5 Tensões admissíveis e normas aplicáveis (ASME B31 *Code for Pressure Piping*)

A **ASME B31** (Code for Pressure Piping) é a mais completa e abrangente norma sobre tubulação industrial, **É muito importante que o leitor tenha em mente que estes**

resumos possuem caráter tão somente didático, não devendo ser empregados como referência técnica. É imprescindível que o engenheiro responsável tenha sempre em mãos a versão integral e atualizada da norma aplicável.

### 3.5.1 ASME B31.1 – Power Piping Code

Esta norma prescreve requisitos mínimos para projeto, seleção de materiais, fabricação, montagem, teste e inspeção de sistemas de tubulação principais e auxiliares, sejam de vapor, água, óleo, gás, ar comprimido ou outro fluido concernente, em termoelétricas e unidades geradoras de calor.

Os requisitos mínimos relativos ao projeto incluem a tubulação e seus componentes, restrições e qualquer artefato utilizado para evitar tensões excessivas ao sistema.

As cargas consideradas pela ASME B31.1 são as relativas a pressão, peso (incluindo teste hidrostático, se previsto), impacto (golpe de aríete, por exemplo), vento, movimentos sísmicos e vibrações, além das cargas advindas da expansão e contração térmica do sistema. Cargas ocasionadas pela ação do vento e de movimentos sísmicos são tratadas usualmente como de ocorrência não-simultânea por esta norma.

#### ➤ Tensões por cargas de serviço

Os resultados da ação de cargas de serviço devem estar dentro dos limites impostos pela equação:

$$S_L = \frac{pD}{4t} + \frac{0,75i}{W} M_A \leq 1,0S_h \quad (3-5)$$

onde



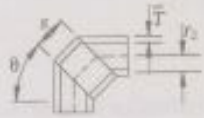

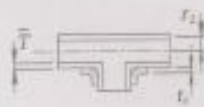
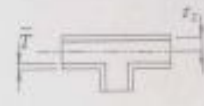
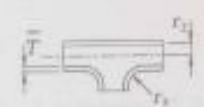
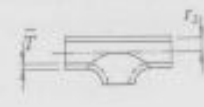

- $S_L$  é a tensão longitudinal ocasionada por cargas de serviço;
- $p$  é a pressão interna de projeto;
- $D$  é o diâmetro externo do tubo;
- $t$  é a espessura nominal da parede do tubo;
- $M$  é o momento resultante na seção transversal considerada, devido ao peso e a outras cargas de serviço consideradas;
- $W$  é o módulo de resistência da seção;
- $i$  é o fator adimensional de intensificação de tensão, observando sempre que o produto  $0,75i$  jamais deverá ser menor que 1,0 (observe a Tabela 3-1);
- $S_h$  é a tensão admissível para o material na temperatura de projeto.

O fator intensificador de tensões  $i$  é empregado com a finalidade de aumentar a segurança em pontos onde possa ocorrer concentração de tensões e, portanto, exista a

**Disciplina: CALCULO DE TENSÕES EM SISTEMAS DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

possibilidade de falhas por fadiga. As fórmulas para os fatores de intensificação relativas ao correspondente ponto concentrador de tensões podem ser encontradas no Apêndice D da norma, ou na Tabela 3-1, adiante.

Tabela 3-1 Fatores de intensificação de tensões para curvas e ramificações "Tê"

Descrição do Componente	B31.1, ASME, III NC e ND	B31.3 e B31.8		Flexibilidade Característica	Desenho do Componente
		Fora do Plano ( $i_0$ )	No Plano ( $i_1$ )		
Curva fabricada ou tubo curvado	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,75}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_1^2}$	
Curva em gomos com espaçamento $s < r_2 (1 + \tan \theta)$ ( $s = 2r_2 \tan \theta$ )	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{\cot \theta \bar{T}s}{2 r_2^2}$	
Curva em gomos com espaçamento $s \geq r_2 (1 + \tan \theta)$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{1 + \cot \theta \frac{\bar{T}}{r_2}}{2}$	
"Tê" como na ASME B16.9	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,25$	$\frac{4,4\bar{T}}{r_1}$	
"Tê" fabricado com reforço	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,2$	$\frac{(\bar{T} + 0,5t_1)^{3/2}}{\bar{T}^{3/2} r_1}$	
"Tê" fabricado sem reforço	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,25$	$\frac{\bar{T}}{r_1}$	
"Tê" forjado como peça única	-	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,25$	$\left(1 + \frac{r_2}{r_1}\right) \frac{\bar{T}}{r_1}$	
"Tê" construído através de soldagem de sela	-	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,25$	$\frac{4,4\bar{T}}{r_1}$	
"Tê" construído através de soldagem de colar (integralmente reforçado)	-	$\frac{0,9}{h^{3/5}}$	$0,75i_0 + 0,25$	$\frac{3,3\bar{T}}{r_1}$	

➤ **Tensões por cargas ocasionais**

As conseqüências da ação de serviço e de cargas ocasionais, **incluindo as originadas por atividade sísmica**, devem estar dentro dos limites impostos pela seguinte equação:

$$\frac{pD}{4t} + \frac{0,75i}{W}M_A + \frac{0,75i}{W}M_B \leq kS_h \quad (3-6)$$

onde  $k$  é um fator de correção, adimensional, que assume o valor de 1,15 no caso de cargas ocasionais agindo em menos de 10% do período operacional, ou igual a 1,2 se estas agem em menos de 1% desse tempo;  $M_B$  é o momento resultante na seção transversal considerada, devido às cargas ocasionais; se há possibilidade de movimentos sísmicos, deve-se considerar somente metade do momento máximo previsível correspondente à atividade sísmica típica na área considerada.

➤ **Tensões por expansão térmica**

Os efeitos da atuação da expansão térmica no sistema **devem satisfazer** os limites impostos pelas seguintes equações:

$$S_E = \frac{i}{W}M_c \leq S_A + f(S_h - S_L) \quad (3-7)$$

$$S_A = f(1,25S_C + 0,25S_h) \quad (3-8)$$

em que:

- $M_C$  é o máximo momento resultante devido à expansão térmica;
- $S_E$  é a tensão secundária;
- $S_A$  é o valor admissível para tensões provocadas por expansão térmica;
- $S_C$  é a tensão admissível para o material da tubulação, à temperatura ambiente (ver Anexo 7.3);
- $S_L$  é a tensão longitudinal ocasionada por cargas de serviço, tal como calculado pela Equação (3-5);
- $f$  é o fator de redução de tensões, para condições operacionais cíclicas (ver Tabela 3-2), adimensional.

Tabela 3-2 Fator  $f$  de redução de tensões

Número de Ciclos de Temperatura Previstos	$f$
< 7000	1,0
7000–14.000	0,9
14.000–22.000	0,8
22.000–45.000	0,7
45.000–100.000	0,6
> 100.000	0,5

É exigência desta norma que seja considerado como **temperatura de projeto o máximo valor que a temperatura da tubulação possa alcançar** uma vez que o sistema esteja operacional.

De qualquer forma, a norma indica que **em nenhuma hipótese a temperatura de projeto adotada deve ser menor que a média entre a temperatura máxima esperada para o fluido e a temperatura externa da parede do tubo.**

O valor para a tensão admissível a ser adotado para  $S_C$  e  $S_h$ , em função do material usado, **deve ser obtido escolhendo-se o menor valor entre as possíveis tensões de projeto:**

- 25% do valor do limite de resistência à tração, na temperatura de projeto;
- 25% do valor do limite de resistência à tração, na temperatura de instalação;
- 62,5% do valor do limite de escoamento, na temperatura de projeto;
- 62,5% do valor do limite de escoamento, na temperatura de instalação.

### 3.5.2 ASME B31.3 - CHEMICAL PLANT AND PETROLEUM REFINERY PIPING CODE

Esta norma prescreve requisitos mínimos para projeto, seleção de materiais, fabricação, montagem, teste e inspeção de todos os sistemas de tubulação dentro dos limites de unidades de processamento ou armazenamento de produtos químicos, petróleo e de seus derivados.

Excluem-se da alçada da ASME B31.3 os sistemas que transportem fluidos com pressão interna inferior a 103 kPa (15 psi) e temperatura inferior a 186°C (366°F), os sistemas de vapor e condensado cobertos pela ASME B31.1, B31.4 ou B31.8 e também os sistemas contra incêndio, serviço e esgoto.

As cargas consideradas pela ASME B31.3 são as relativas a pressão, peso (incluindo teste hidrostático, se previsto), impacto (golpe de aríete, por exemplo) e vento. São ponderadas também as forças horizontais induzidas por movimentos sísmicos e

## **Disciplina: CALCULO DE TENSÕES EM SISTEMAS DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

vibrações, as cargas advindas da expansão, contração e gradientes térmicos do sistema, além das cargas devido a suportaçãõ, ancoragem e movimentaçãõ dos terminais conectados aos bocais de equipamentos.

São apresentados a seguir os requisitos mínimos impostos pela norma, no que se refere às tensões.

### ➤ Tensões por cargas de serviço

Para o material na temperatura de projeto, a somatória das tensões longitudinais originadas por cargas de serviço (pressão, peso, etc.) não deverá ultrapassar o valor da tensão admissível, ou seja:

$$S_L \leq S_h$$

Observe que não se consideram na avaliação de  $S_L$  as tolerâncias relativas a espessura de parede da tubulação, sejam elas referentes a filetes de rosca, ação da corrosão ou erosão.

### ➤ Tensões por cargas ocasionais

O montante da somatória  $S_L$  das tensões longitudinais originadas por cargas de serviço (pressão, peso, etc.), mais a somatória das tensões provocadas por cargas ocasionais, tais como vento e movimentos sísmicos, não deverá exceder  $1,33S_h$ , ou seja:

$$S_L \leq 1,33S_h \quad (3-9)$$

Neste caso não se considera a possibilidade de simultaneidade da ação das cargas ocasionais, tal como a ocorrência simultânea de fortes ventos e terremotos.

### ➤ Tensões por expansão térmica

Com relação aos efeitos da dilatação térmica do sistema, o limite para as tensões secundárias  $S_E$  deve ser avaliado como se segue:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \leq S_A \quad (3-10)$$

$$S_A = f(1,25S_C + 0,25S_h) \quad (3-11)$$

ou

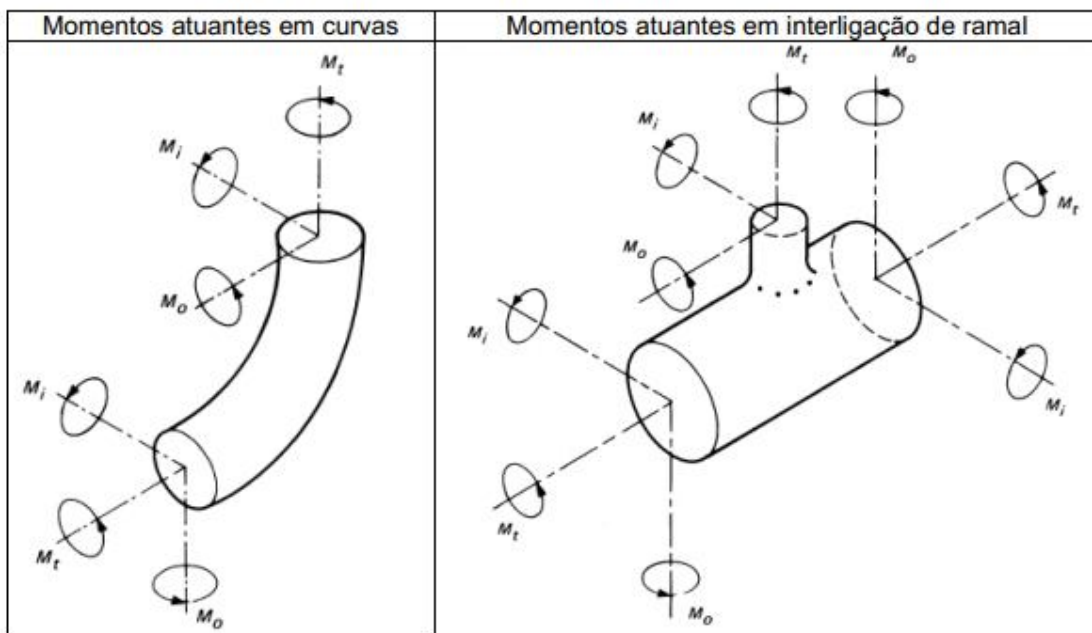
$$S_A = f[(1,25(S_C + S_h) - S_L)] \quad (3-12)$$

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{W} \quad (3-13)$$

$$S_t = \frac{M_t}{W} \quad (3-14)$$

em que:

- $S_E$  é a tensão secundária;
- $S_b$  é a tensão resultante de flexão;
- $S_t$  é a tensão torcional resultante;
- $S_A$  é o valor admissível para tensões provocadas por expansão térmica;
- $S_C$  é a tensão admissível para o material da tubulação, à temperatura ambiente (ver Anexo 7);
- $S_h$  é a tensão admissível para o material na temperatura de projeto;
- $M_t$  é o momento torcional;
- $M_i$  é o momento torcional no plano;
- $M_o$  é o momento torcional fora do plano;
- $i_i$  é o fator de intensificação de tensões no plano;
- $i_o$  é o fator de intensificação de tensões fora do plano;
- $f$  é o fator de redução de tensões para condições operacionais cíclicas (ver Tabela 3-2), adimensional;
- $W$  é o módulo de resistência da seção.





## **Disciplina: CALCULO DE TENSÕES EM SISTEMAS DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

---

O valor para a tensão admissível a ser adotado para  $S_C$  e  $S_n$ , em função do material usado, **deve ser obtido escolhendo-se o menor valor entre as possíveis tensões de projeto:**

33,3% do valor do limite de resistência à tração, na temperatura de instalação;

33,3% do valor do limite de resistência à tração, na temperatura de projeto;

66,6% do valor do limite de escoamento, na temperatura de instalação;

66,6% do valor do limite de escoamento, na temperatura de projeto, exceto no caso de aços inoxidáveis austeníticos e determinadas ligas de níquel, em que se deve empregar 90% do valor desse limite;

67% da tensão capaz de infringir a ruptura do tubo, em consequência de deformação por fluência, ao final de 100.000 horas de aplicação;

80% da tensão mínima para a ruptura, em consequência de deformação por fluência, ao final de 100.000 horas de aplicação;

100% da tensão capaz de infringir uma deformação por fluência na razão de 0,01% em 1000 horas.

Esta norma exige o emprego de fatores de intensificação de tensões em separado para momentos no plano e fora deste, não exigindo, por outro lado, fatores para os momentos torcionais (ver Tabela 3-1).

### **3.5.3 ASME B31.8 - GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING CODE**

Esta norma prescreve requisitos mínimos para projeto, seleção de materiais, fabricação, montagem, teste e inspeção de tubulações de sistemas de distribuição de gás, desde a unidade armazenadora principal ou distribuidora primária até a válvula de registro de consumo do usuário final.

Excluem-se da alçada da ASME B31.8 os sistemas que transportem fluidos com temperatura do tubo inferior a  $-29^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ) ou superior a  $232^{\circ}\text{C}$  ( $450^{\circ}\text{F}$ ) e os sistemas existentes após a válvula de registro de consumo do usuário final. Também não são englobados os sistemas de exaustão de gases operando a pressão atmosférica, além das tubulações em refinarias unidades de extração de gás natural e unidades de tratamento.

#### **➤ Tensões por Cargas Primárias**

As tensões longitudinais originadas por pressão interna e externa, somadas às tensões longitudinais de flexão causadas por cargas tais como peso próprio e vento, devem estar dentro do seguinte limite:

$$S_E \leq 0,75 S.F.T \quad (3-15)$$

em que:

- S é menor valor da tensão de ruptura à tração do material;
- F é o fator adimensional relacionado ao risco potencial a que a população das imediações está exposta (Tabela 3-3);
- T é o fator adimensional relativo à temperatura, para aço (Tabela 3-4);

**Tabela 3-3 Fator F relativo à densidade populacional**

Densidade Populacional da Área Próxima	Classificação	Fator F
Pequena: montanhas, área rural, desertos, etc.	A	0,72
Média: pequenas comunidades, subúrbios.	B	0,60
Grande: cidades com prédios até três andares.	C	0,50
Compacta: cidades com prédios maiores que três andares.	D	0,40

**Tabela 3-4 Fator T relativo à temperatura t do tubo**

Temperatura [°C]	t ≤ 121	121 < t ≤ 149	149 < t ≤ 177	177 < t ≤ 204	204 < t ≤ 232
Fator T	1,000	0,967	0,933	0,900	0,867

➤ **Tensões ocasionadas por Expansão Térmica**

Com relação aos efeitos da dilatação térmica do sistema, o limite para as tensões secundárias  $S_E$  deve ser avaliado como se segue:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \leq 0,72S \quad (3-16)$$

$$S_b = \frac{iM_b}{W} \quad (3-17)$$

$$S_t = \frac{M_t}{2W} \quad (3-18)$$

em que:

- $S_E$  é a tensão secundária;
- $S_b$  é a tensão resultante de flexão;
- $S_t$  é a tensão resultante torcional;
- S é o mínimo valor da tensão de ruptura à tração;
- $M_t$  é o momento torcional;
- $M_b$  é o momento de flexão;
- i é o fator de intensificação de tensões;
- W é o módulo de resistência da seção;

➤ **Tensões ocasionadas por expansão térmica e por cargas primárias**

A somatória das tensões originadas por expansão térmica do sistema, das tensões longitudinais devido à ação da pressão e das tensões longitudinais devido a cargas primárias não deve ultrapassar o valor da tensão de ruptura à tração do material.

Esta norma exige o emprego de fatores de intensificação de tensões em separado para momentos no plano e fora deste (veja Tabela 3-1).

## QUESTÕES

1. O que são tensões primárias? De que resultam elas? O que são tensões secundárias? De que resultam elas? Quais são os principais caracteres de tensões primárias e de tensões secundárias?
2. Quais sistemas não são alçados pela norma ASME B31.3? Quais sistemas não são alçados pela norma ASME B31.8?