

Fig. 4.2 Curva em gomos.

$T, C$  : espessura mínima e margem para corrosão (mm).

$R_1, \alpha, D$ : dimensões mostradas na Fig. 4.2.

$r_2$ : raio médio do tubo considerando a espessura nominal de parede (mm).

Em qualquer caso, deve-se ter:  $R_1 > \frac{A}{\text{tg } \alpha} + \frac{D}{2}$ , onde o coeficiente empírico  $A$  tem os seguintes valores, para  $T$  e  $C$  em polegadas:

$T - C(\text{pol})$	$A$
até 0,5	1,0
$0,5 < (T - C) < 0,88$	$2(T - C)$
maior que 0,88	$2\frac{T - C}{3} + 1,17$

Quando se tem um único corte transversal, e, conseqüentemente uma única solda, e quando o ângulo  $\alpha$  é menor do que  $3^\circ$ , a norma ASME B 31 não considera como sendo uma curva em gomos, e sim como um tubo reto, e todos os cálculos acima descritos não precisam ser feitos.

O cálculo dos flanges, flanges cegos e tampões, quando necessário, é feito usualmente pelos métodos de cálculo do código ASME para caldeiras e vasos de pressão ("American Boiler and Pressure Vessels Code", da American Society of Mechanical Engineers), descrito na Seção VIII (Apêndice II) do referido código; não vamos, aqui, entrar em mais detalhes sobre esse assunto.

#### 4.6 CÁLCULO DO VÃO ENTRE SUPORTES

O cálculo do vão máximo admissível entre os suportes de uma tubulação é feito considerando-se o tubo como sendo uma viga horizontal, sujeita aos vários pesos e sobrecargas que estejam atuando. Esse vão máximo será limitado por dois fatores:

- A tensão máxima de flexão, no ponto de maior momento fletor, deverá ser inferior a uma determinada tensão admissível.
- A flecha máxima, no meio do vão, deverá também ser inferior a um determinado valor admissível.

Teoricamente, a tensão máxima e a flecha máxima dependerão, em cada caso, do sistema de suportes (viga contínua, simplesmente apoiada, engastada etc.) e do tipo de carregamento (carga uniformemente distribuída, concentrada etc.). Na prática, pode-se, na maioria das vezes, simplificar o problema, assimilando o tubo a uma viga contínua, simplesmente apoiada em vários pontos sucessivos igualmente espaçados. Nesse caso, a tensão máxima de flexão corresponderá ao momento negativo máximo sobre cada apoio; o valor aproximado dessa tensão pode ser tomado como sendo:

$$S_v = \frac{L}{10Z} [qL + 2(Q + W)] \quad (7)$$

em que:

$S_v$  : tensão máxima de flexão (MPa).

$L$  : vão entre suportes (m).

$q$  : soma das cargas distribuídas (N/m), que inclui o peso próprio do tubo e o peso do fluido contido, ou o peso da água de teste (o que for maior), e mais os seguintes pesos que existirem em cada caso: peso do isolamento térmico ou de qualquer outro revestimento interno ou externo, peso do sistema de aquecimento, peso de outras tubulações paralelas, de pequeno diâmetro, sustentadas pelo tubo.

$Q$  : soma das cargas concentradas (N), supostas no meio do vão, que inclui o peso de válvulas, outros acessórios e derivações não-suportadas existentes no trecho considerado.

$W$  : sobrecarga aplicada no meio do vão. Recomenda-se que seja considerada uma sobrecarga de 2 000 N ( $\approx$  200 kg) para todas as tubulações de aço de 3", ou maior, situadas a até 3,0 m de altura do solo.

$Z$  : momento resistente da seção transversal do tubo ( $\text{cm}^3$ ).

Quando só existirem cargas distribuídas, que é o caso mais freqüente, a fórmula simplifica-se para:

$$S_v = \frac{qL^2}{10Z} \quad (8)$$

que resulta em:

$$L = \sqrt{\frac{10ZS_v}{q}}$$

de onde se pode calcular diretamente o vão máximo admissível.

O valor da tensão admissível  $S_v$  deve ser relativamente baixo, porque o material do tubo está sendo solicitado simultaneamente por outras cargas, em geral mais importantes. É usual, por isso, tomar-se  $S_v \leq \frac{LR}{10}$ , sendo  $LR$  o limite de resistência do material na

temperatura considerada. Para aços-carbono até a temperatura de 350°C, pode-se adotar: ( $S_v = 35 \text{ MPa} (\approx 350 \text{ kg/cm}^2)$ ). A fórmula (8) ficará, então:

$$L = \sqrt{\frac{3500Z}{q}} \quad (8a)$$

O valor da flecha máxima, no meio do vão, pode ser calculado por:

$$\delta = \frac{2400 L^3}{EI} \left[ \frac{Q + W}{3} + \frac{qL}{4} \right], \quad (9)$$

em que:

$\delta$  : flecha máxima (mm).

$E$  : módulo de elasticidade do material na temperatura considerada (MPa).

$I$  : momento de inércia da seção transversal do tubo (cm<sup>4</sup>).

As demais grandezas e respectivas unidades são as mesmas da fórmula (7).

Quando só existirem cargas distribuídas, teremos:  $\delta = \frac{600 q L^4}{E I}$ , de onde se pode calcular diretamente o vão máximo:

$$L = \sqrt{\frac{\delta EI}{600 q}} \quad (9a)$$

São os seguintes os valores máximos geralmente admitidos para as flechas:

- Tubulações em áreas de processo:
  - Tubos de 3" ou menores: 5 mm.
  - Tubos de 4" ou maiores: 10 mm.
- Tubulações fora de áreas de processo: 25 mm.

A flecha deve ser limitada por duas razões principais: tornar a frequência natural de vibrações bastante elevada, de modo a evitar que qualquer causa de perturbação possa provocar vibrações de grande amplitude, e evitar a formação, no meio do vão, de bolsas de líquido impossíveis de drenar. As flechas excessivas dão também um aspecto desagradável à tubulação.

O cálculo do vão máximo entre suportes, como aqui descrito, não deve ser aplicado às tubulações de diâmetro muito grande (1,2 m ou maiores) e de parede fina ( $D/t > 100$ ), para as quais deve ser verificado o possível efeito de colapso na região em contato com os suportes, que deve ser devidamente reforçada, caso necessário. Para qualquer tubulação de pressão negativa, esse mesmo efeito também deve ser verificado.

Na rotina usual dos projetos, o vão entre suportes costuma ser calculado previamente para as combinações mais usuais de diâmetros, espessuras, materiais e temperaturas de tubos. As organizações de projeto e alguns usuários importantes de tubulações industriais costumam ter tabelas com esses vãos já calculados (veja Fig. 10.8, no livro *Tubulações Industriais — Materiais, Projeto, Montagem*) e válidas para qualquer projeto. Assim, o cálculo direto do vão entre suportes limita-se, na prática, aos casos de tubulações que não se enquadrem nas tabelas existentes.

#### 4.7 EXEMPLO NUMÉRICO

Consideremos o sistema mostrado na Fig. 4.3, em que temos um tubo de 10" apoiado em suportes com um vão de 10,5 m, e um tubo de 2" (com uma derivação) apoiado em

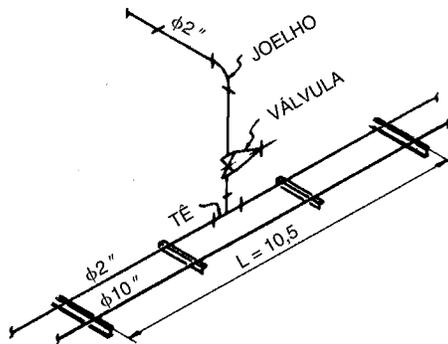


Fig. 4.3

suportes intermediários presos ao tubo de 10". Vamos calcular a tensão causada pelos pesos do tubo de 10", e a tensão combinada longitudinal, de acordo com o critério da norma ASME B 31. Os dados numéricos são os seguintes:

- Peso do tubo de 10" cheio de água: 1 110 N/m.
- Peso do tubo de 2" cheio de água: 94 N/m.
- Peso da derivação, válvula e conexões:  $Q = 530$  N.
- Sobrecarga adicional considerada:  $W = 1\ 000$  N.
- Pressão interna (de projeto):  
 $P = 4.800$  kPa = 4,8 MPa.
- Vão entre suportes:  $L = 10,5$  m.
- Espessura da parede (série 40):  $t =$   
 $= 9,3$  mm (0,365 pol.).
- Diâmetro externo (tubo 10"):  $D =$   
 $= 273$  mm (10,75 pol.).
- Material: Aço-carbono API 5L Gr.A.
- Temperatura de projeto: 200°C.
- Momento resistente (tubo 10"):  $Z =$   
 $= 490$  cm<sup>3</sup>.

Assimilando, para facilitar, o peso do tubo de 2" a uma carga distribuída, teremos para o valor da carga distribuída total:

$$q = 1\ 110 + 94 = 1\ 204 \text{ N/m}$$

A tensão devida aos pesos será então:

$$S_v = \frac{L}{10 Z} [qL + 2(Q + W)] = \frac{10,5}{10 \times 490} [1204 \times 10,5 + 2(530 + 1000)] = 33,6 \text{ MPa.}$$

Como essa tensão está dentro do limite referido no item 4.6, significa que o valor do vão entre os suportes está razoável, apesar do carregamento adicional sobre o tubo de 10". Note-se que o vão de 10,5 m é ligeiramente inferior ao vão máximo admissível entre suportes (11,0 m), para um tubo de 10", nas condições supostas. Veja Fig. 10.8, no livro *Tubulações Industriais — Materiais, Projeto, Montagem*.

De acordo com o que foi visto no Item 3.7, a norma ASME B 31 estabelece que a soma das tensões longitudinais devido aos pesos, pressão e outras cargas permanentes (exceto às tensões secundárias) não deve ultrapassar a tensão admissível, ( $S_h$ ), do material na temperatura de projeto. Devemos no nosso caso ter então:

$$S_v + S_t \leq S_h$$

em que:

$$S_t = \frac{PD}{4t}, \text{ tensão longitudinal devida à pressão interna.}$$

O valor de  $S_t$  será:

$$S_t = \frac{4,8 \times 273}{4 \times 9,3} = 35,2 \text{ MPa.}$$

Teremos assim:

$$S_v + S_t = 33,6 + 35,2 = 68,8 \text{ MPa.}$$

A tensão admissível  $S_h$ , tirada da tabela da norma, para tubos de aço-carbono API-5L Gr.A, na temperatura de 200°C, vale:  $S_h = 110,3$  MPa. Concluimos, portanto, que o vão adotado entre os suportes está satisfatório.

#### 4.8 EXEMPLO NUMÉRICO

Calcular o vão máximo entre suportes para uma tubulação de água salgada com diâmetro externo de  $D = 40''$  (1 018 mm), construída de chapas de aço ASTM A 285 Gr.C, com espessura de  $3/8''$  (9 mm). A tubulação tem um revestimento interno de concreto de 15 mm de espessura. Como não existem esforços de dilatação e a pressão é muito baixa, pode-se admitir uma tensão máxima devida aos pesos de  $S_v = 100$  MPa ( $\cong 1\,000$  kg/cm<sup>2</sup>). A flecha máxima deve ser de 25 mm.

Temos os seguintes dados adicionais:

- Peso do tubo vazio (sem o revestimento de concreto): 2 365 N/m.
- Peso específico do concreto: 20 N/dm<sup>3</sup>.
- Módulo de elasticidade do aço:  $E = 2 \times 10^5$  MPa.
- Momento de inércia da seção transversal:  $I = 362\,000$  cm<sup>4</sup>.
- Momento resistente:  $Z = 7\,110$  cm<sup>3</sup>.

Calculemos primeiro a carga distribuída total:

$$q = \text{peso do tubo} + \text{peso do revestimento} + \text{peso da água salgada.}$$

Calculando o peso da camada de concreto com 15 mm de espessura encontra-se: 625 N/m.

Como a densidade da água salgada é 1,03, o seu peso por metro de tubo, em N, será:

$$\frac{1,03A}{100}, \text{ em que } A \text{ é a área livre de seção transversal do tubo, em mm}^2:$$

$$A = \frac{\pi[D - 2(t + 15)]^2}{4}.$$

Ficará para o peso da água salgada:

$$\frac{1,03 \pi [1,018 - 2(9 + 15)]^2}{4 \times 100} = 7,611 \text{ N/m.}$$

Teremos então:  $q = 2\,365 + 625 + 7\,611 = 10\,601 \text{ N/m.}$

Considerando apenas as cargas distribuídas, o vão máximo admissível, em função da tensão, será dado pela fórmula:

$$L = \sqrt{\frac{10 S_v Z}{q}}$$

Substituindo:

$$L = \sqrt{\frac{10 \times 100 \times 7110}{10601}} = 25,8 \text{ m.}$$

Verifiquemos agora o vão para a flecha máxima, tirando o valor de  $L$  da fórmula (9a):

$$L = \sqrt[4]{\frac{\delta EI}{600q}}$$

ou

$$L = \sqrt[4]{\frac{25 \times 2 \times 10^5 \times 362000}{600 \times 10601}} = 23,0 \text{ m.}$$

O vão máximo a adotar será portanto esse último valor, ou seja,  $L = 23,0 \text{ m.}$

#### 4.9 MOVIMENTO VERTICAL LIMITE PARA EMPREGO DE SUPORTES MÓVEIS

Os suportes móveis são aqueles que permitem um movimento vertical à tubulação, continuando, ao mesmo tempo, a sustentar o seu peso. Como esses suportes são dispositivos caros, devem ser empregados somente quando forem de fato necessários (veja livro *Tubulações Industriais — Materiais, Projeto, Montagem*, Item 11.7). Em tubulações horizontais, os suportes móveis são necessários em todos os pontos de suporte em que a tubulação apresentar, por qualquer razão, um movimento vertical de amplitude superior à flecha natural causada pela simples flexão do tubo, devido ao próprio peso, no vão compreendido entre dois suportes consecutivos.

Consideremos, por exemplo, a tubulação mostrada na Fig. 4.4. Essa tubulação tem um movimento vertical, para cima, no ponto A, devido à dilatação própria do vaso ao qual está ligada.

Sendo  $L$  o vão admissível entre suportes e sendo  $B$  um suporte fixo, o maior movimento vertical possível no ponto A será aquele em que a linha elástica da tubulação deformada por uma força vertical de baixo para cima no ponto A tangenciar o ponto B; seja  $\delta_1$  esse movimento máximo. Para qualquer movimento  $\delta_2$  maior do que  $\delta_1$ , a tubulação se levantará do suporte fixo B, que ficará então inoperante, causando uma sobrecarga nos suportes vizinhos e uma flexão excessiva na tubulação. O valor limite do movimento vertical é dado pela expressão:

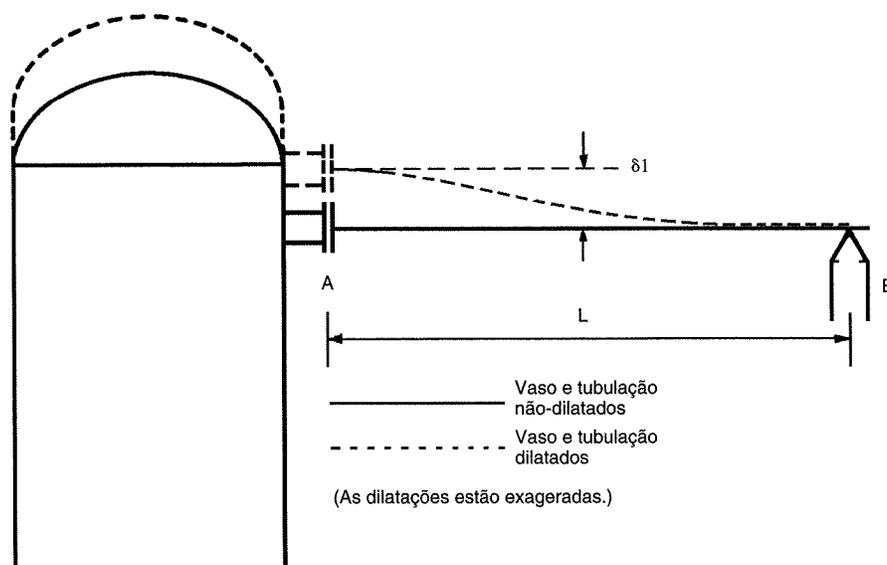


Fig. 4.4

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{10^7 q L^4}{24 E I},$$

em que:

$\delta_{\text{máx}}$  : deslocamento vertical máximo (mm)

$q$  : peso por unidade de comprimento do tubo, incluindo fluido contido, isolamento térmico etc. (kg/m)

$L$  : vão entre suportes (m)

$E$  : módulo de elasticidade do material na temperatura considerada (kg/cm<sup>2</sup>)

$I$  : momento de inércia da seção transversal do tubo (cm<sup>4</sup>)

Se o movimento vertical for superior a  $\delta_{\text{máx}}$ , será necessário o emprego de um suporte móvel no ponto B, em lugar de suporte fixo.

#### 4.10 EXEMPLO NUMÉRICO

Voltando à Fig. 4.4, suponhamos que a tubulação nela representada tenha as seguintes condições:

Material, diâmetro nominal e espessura: aço-carbono, 10", espessura série 40

Líquido contido: peso específico:  $\gamma = 0,85$

Peso do isolamento térmico: 25 kg/m

Temperatura de operação: 400°C

Vão entre suportes:  $L = 8,4$  m (valor máximo admissível)

Temos: peso do tubo: 60,23 kg/m; peso do líquido: 43,27 kg/m

peso total:  $60,23 + 43,27 + 25,0 = 128,5$  kg/m

módulo de elasticidade a 400°C:  $E = 1,65 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>

momento de inércia:  $I = 6\,693 \text{ cm}^4$

Substituindo, vem para o valor máximo do movimento vertical:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{10^7 \times 128,5 \times 8,4^4}{24 \times 1,65 \times 10^6 \times 6693} = 24,13 \text{ mm} \approx 24 \text{ mm}$$

Assim, nessas condições, é necessário o emprego de um suporte móvel no ponto B, caso o movimento vertical no ponto A seja superior a 24 mm.