

## +Capítulo 7 ANÁLISE DAS CARGAS DE EXPANSÃO TÉRMICA

### 7.1 Identificação das linhas com flexibilidade adequada

A expansão térmica é uma das mais importantes fontes de tensões em sistema de tubulações. Mesmo que estas tensões não sejam capazes de levar diretamente o material da tubulação à ruptura, o comportamento cíclico da expansão térmica pode originar falha por fadiga ou vazamento ao longo tempo.

O custo e o tempo empregados na análise de uma linha quente são sempre consideravelmente mais elevados. Entretanto, normalmente não existe necessidade de se efetuar uma análise detalhada de todas as linhas quentes em um projeto, uma vez que alguns trajetos (layout) de linhas possuem flexibilidade suficiente para não imprimir esforços excessivos aos equipamentos conectados, assim como absorver as tensões originadas pela expansão térmica.

Em geral quanto maior o número de membros de uma linha, mais flexível ela é. Esta afirmação pode ser visualizada através da Figura 7-1. Também quanto mais mudanças de direção um sistema apresentar, mais flexível ele será.

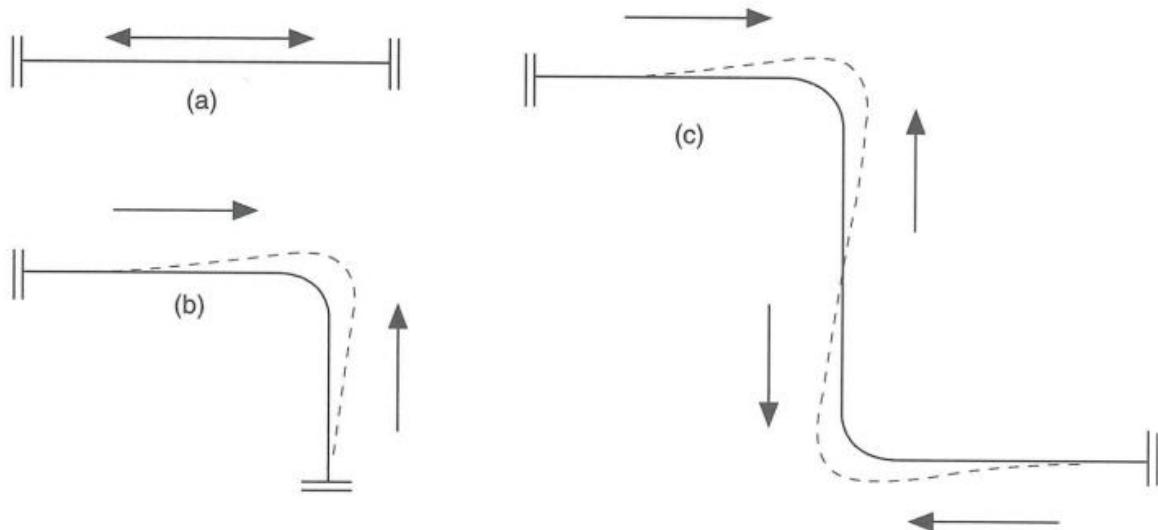


Figura 7-1 Tubulações ancoradas nas extremidades: traçado retilíneo (a) e com curvas de 90° (b e c).

Mas como saber se o sistema é flexível o suficiente para, além de absorver as tensões resultantes de sua própria deformação, não transmitir esforços excessivos aos seus terminais, sem que seja necessário realizar um estudo detalhado?

Muito embora existam vários critérios propostos por estudiosos do assunto, a maioria deles concorda com a necessidade de um estudo criterioso do trajeto de uma linha quente nos seguintes casos:

- ✓ Quando conectada a equipamentos sensíveis a esforços externos.
- ✓ Quando são transportados fluidos de alta toxicidade ou periculosidade.
- ✓ No emprego de paredes anormalmente finas para a tubulação. Isto ocorre porque, muitas vezes, devido às condições operacionais, tais como alta temperatura ou exposição a um meio corrosivo, é necessário que os tubos sejam constituídos de um material especial, de custo elevado. Nestes casos, por economia, é prática normal adotarem-se paredes finas para a tubulação.
- ✓ Quando se espera que a linha seja submetida a mais do que 7000 ciclos de variações térmicas em sua vida operacional.
- ✓ Quando, simultaneamente, a temperatura de projeto excede 425°C (800°F), a pressão ultrapassa 103 kPa (15 psi) e o diâmetro nominal é maior do que 6 polegadas.

Para as linhas quentes que não se enquadrem nos casos acima especificados, a norma ASME B31.3 apresenta uma condição que, se não-satisfeta, indica diretamente a necessidade de uma análise estrutural por meio de computadores. Se satisfeita, os esforços e tensões resultantes podem ser estimados por meio de métodos gráficos ou analíticos simplificados. Fundamentado em dados empíricos, este critério é apropriado somente para tubulações de diâmetro uniforme entre pontos ancorados, e é dado pela Equação 7-1:

$$\frac{DY}{(L-U)^2} \leq 0,0082 \quad (7-1)$$

$$Y = e \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2} \quad (7-2)$$

em que:

$D$  é o diâmetro nominal da tubulação [in];

$Y$  é o resultante da expansão térmica linear da tubulação [m];

$U$  é a distância entre ancoragens [m];

$L$  é o comprimento linear da tubulação [m];

$\epsilon$  é a unidade de expansão térmica linear [m/m]; ver Anexo 7.1 (ATENÇÃO: no anexo 7.1 a unidade é mm/m, deve trocar para m/m).

É importante que, na determinação de  $Y$ , considere-se também a eventual movimentação dos terminais, no caso de estes pontos serem fixados a equipamentos sujeitos a expansão.

### EXEMPLO NUMÉRICO 7 (Exemplo 7-1 no livro)

A Figura 7-2 representa um sistema bidimensional hipotético. Verifica se este possui adequada flexibilidade, de acordo com a norma B31.3, considerando-se os seguintes dados:

Diâmetro nominal: 12 polegadas, Sch std.

Material: aço-carbono ASTM A-106 Gr B

Temperatura de projeto: 180°C

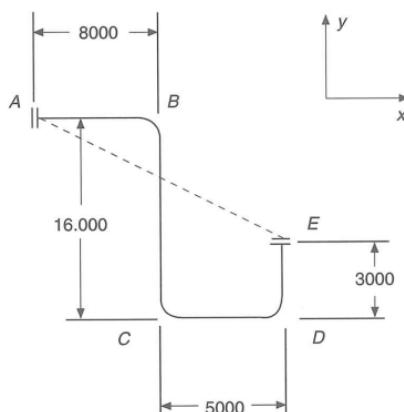


Figura 7-2 Esquema isométrico, fora de escala, da linha do Exemplo 7-1. Dimensões em mm.

#### Solução:

Destes dados, determinam-se diretamente:

Expansão unitária, considerando aquecimento a partir da temperatura ambiente até a de projeto (Anexo 7.1):

$$\epsilon = 1,91 \text{ mm/m} = 1,91 \times 10^{-3}$$

Distância entre ancoragens (linha tracejada AE):

$$U = [(8 + 5)^2 + (16 - 3)^2]^{1/2} = 18,385 \text{ m}$$

Comprimento linear da tubulação:

$$L=8+16+5+3=32\text{m}$$

Resultante da expansão térmica linear da tubulação:

$$Y=1,91 \times 10^{-3} \times [(8+5)^2 + (16-3)^2]^{1/2} = 35,1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Empregando a Equação 7-1, temos

$$\frac{12 \times 35,1 \times 10^{-3}}{(32 - 18,385)^2} = 0,0023 < 0,0082$$

Este resultado indica que a linha é flexível o suficiente para exigir somente uma análise por meio de métodos simplificados.

### EXEMPLO NUMÉRICO 8 (Exemplo 7-2 no livro)

A Figura 7-3 representa um sistema tridimensional, também hipotético. Verifica-se aqui sua flexibilidade, de acordo com a norma B31.3, considerando-se os mesmos dados como o exemplo anterior.

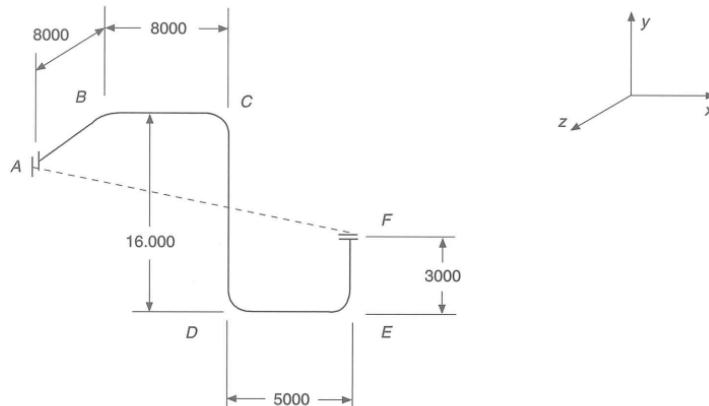


Figura 7-3 Esquema isométrico, fora de escala, da linha do Exemplo 7-2. Dimensões em mm.

### Solução:

Distância entre ancoragens (linha tracejada AF):

$$U= [(8+5)^2 + (16-3)^2 + 8^2]^{1/2} = 20,05 \text{ m}$$

Comprimento linear da tubulação:  $L = 8 + 8 + 16 + 5 + 3 = 40$  m

Resultante da expansão térmica linear da tubulação:

$$Y = 1,91 \times 10^{-3} \times 20,05 \text{ m} = 38,3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Empregando a Equação 7-1, temos

$$\frac{12 \times 38,3 \times 10^{-3}}{(40 - 20,05)^2} = 0,0012 < 0,0082$$

Este resultado indica que esta linha é ainda mais flexível (0,0012 < 0,0023, valor menor tem mais flexibilidade) que a do Exemplo 7-1, o que concorda com a afirmação de que quanto mais mudanças de direção um sistema sofrer, mais flexível ele será.

## 7.2 Expansão termica em equipamentos

Tal como as tubulações, os equipamentos que trabalham em alta temperatura também estão sujeitos a variações dimensionais, de modo que seus bocais não podem ser considerados pontos imóveis de referência. Além disso, somente a partir de uma estimativa precisa é que será possível saber se estes bocais estão ou não sendo submetidos a esforços excessivos.

Para que seja possível uma análise da movimentação dos bocais é imprescindível que certas informações sobre os equipamentos e as linhas conectadas estejam disponíveis:

- ✓ Desenhos do equipamento, que informem dimensões, materiais empregados e estrutura de fixação ou suporte. Estes desenhos devem indicar precisamente as elevações e projeções dos bocais.
- ✓ Plantas e documentos que indiquem a temperatura de operação, diâmetro e trajeto das linhas conectadas.

Muito importante é que não se esqueça que a temperatura da estrutura que suporta o equipamento é influenciada pela temperatura do equipamento e que, portanto, esta estrutura também pode sofrer variações dimensionais. Um problema a ser considerado é que a distribuição da temperatura no suporte não é uniforme, e que pontos mais afastados

do equipamento devem apresentar temperaturas mais baixas do que aqueles em contato com este.

Muito embora este resfriamento não ocorra de modo linear, uma aproximação empírica que oferece resultados bastante satisfatórios é a taxa de  $0,22^{\circ}\text{C}/\text{mm}$  para suportes em aço-carbono sem isolamento.

O comportamento da dilatação térmica dependerá da posição do ponto de fixação do equipamento. Como regra geral, deverá ser fixo o ponto de suporte mais próximo à linha mais rígida.

A temperatura a ser considerada para o cálculo da movimentação dos bocais é a maior temperatura de operação, e não a de projeto, uma vez que se necessita de resultados que expressem o comportamento do aparato durante a maior parte de sua Vida útil.

### 7.2.1 Equipamentos com distribuição uniforme da temperatura

#### EXEMPLO NUMÉRICO 9 (Exemplo 7-4 no livro)

Seja um trocador de calor apresentado na Figura 7-6. Considerando que sua carcaça seja de aço carbono e que a temperatura de operação seja de  $180^{\circ}\text{C}$ , determine a movimentação dos bocais devida a expansão térmica, para uma temperatura ambiente de  $21^{\circ}\text{C}$ .

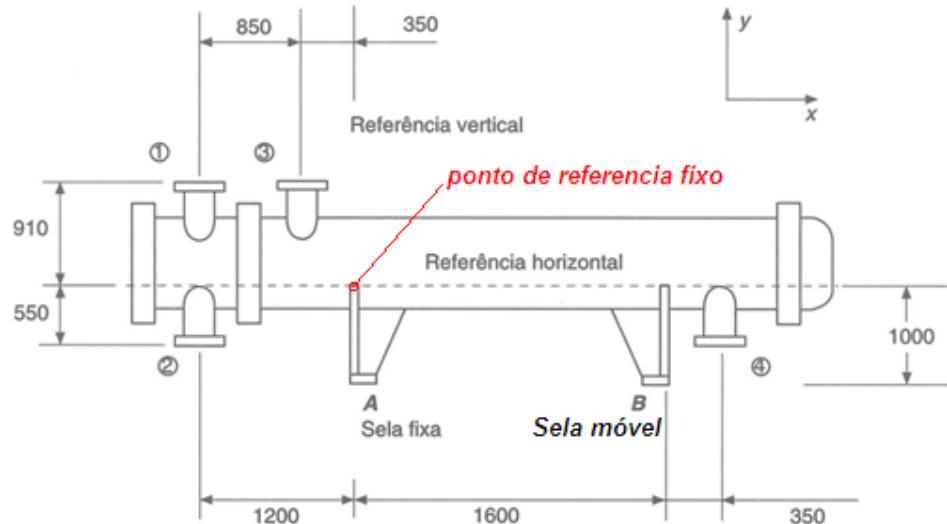


Figura 7-6 Desenho fora de escala, referente ao Exemplo 7-4. (Medidas em milímetros.)

**Solução:**

Através do Anexo 7.1, tem-se que o aço-carbono expande cerca de 1,91 mm/m a 180°C.

A partir deste dado, calculam-se separadamente a movimentação dos bocais e a expansão do suporte.

Expansão radial (eixo y):

Bocais 1 e 3:  $+0,910 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = +1,74 \text{ mm}$

Bocais 2 e 4:  $-0,550 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = -1,05 \text{ mm}$

Expansão longitudinal (eixo x):

Bocal 1:  $-1,200 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = -2,29 \text{ mm}$

Bocal 2:  $-1,200 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = -2,29 \text{ mm}$

Bocal 3:  $-0,350 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = -0,67 \text{ mm}$

Bocal 4:  $+1,950 \text{ m} \times 1,91 \text{ mm/m} = +3,72 \text{ mm}$

Expansão do suporte (eixo y)

Supondo-se que o decaimento da temperatura ao longo do suporte seja de 0,22°C/mm. Para chegar à ambiente, 21°C, deve ter corrida uma distância=  $(180^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})/0,22^\circ\text{C/mm} = 723 \text{ mm}$  a partir do topo do suporte. A temperatura média deste trecho da estrutura seria então  $(180^\circ\text{C} + 21^\circ\text{C})/2 = 100,5^\circ\text{C}$ , implicando uma expansão total:  $0,723 \text{ m} \times 0,91 \text{ mm/m} = +0,66 \text{ mm}$ , onde o coeficiente de expansão do aço-carbono nesta temperatura é de 0,91 mm/m.

Somando-se a expansão do suporte, temos uma estimativa da movimentação real dos bocais, conforme a Tabela 7-1.

**Tabela 7-1 Estimativa da movimentação dos bocais do trocador de calor do Exemplo 7-4 (dimensões em milímetros)**

Eixos	Bocais			
	1	2	3	4
x	-2,3	-2,3	-0,7	+3,7
y	+2,4	-0,4	+2,4	-0,4

### 7.2.1 Equipamentos com gradiente térmico

A existência de diferentes zonas de temperaturas ao longo da estrutura faz com que a estimativa da movimentação dos bocais seja um pouco mais complexa. A ocorrência

deste tipo de distribuição térmica não-uniforme é comumente associada aos equipamentos de configuração vertical, ou torres.

O processo de estimativa consiste basicamente em (1) *determinar os limites das diferentes zonas de temperatura*, (2) *estimar a temperatura média destas áreas*, (3) *determinar os correspondentes coeficientes de dilatação térmica a estas temperaturas médias e, então*, (4) *calcular a movimentação vertical e horizontal de cada bocal.*

Os limites das diferentes zonas térmicas e suas temperaturas médias podem ser obtidos diretamente junto ao fabricante ou devem estar indicados nos desenhos de projeto. Mas caso esta informação não esteja disponível, a temperatura de cada área térmica pode ser estimada como igual à temperatura de operação da linha de saída a ela pertencente.

#### EXEMPLO NUMÉRICO 10 (Exemplo 7-5 no livro)

Seja a coluna retificadora apresentada na Figura 7-8. Determine a movimentação dos bocais devido à expansão térmica. Distância da face do flange à carcaça, em todos os bocais, 400 mm. Temperatura ambiente de 21°C. Material do corpo, aço-carbono ASTM A-106 Gr A.

**Solução:**

Calcule a expansão térmica de cada zona.

Tabela 7-2 Expansão nas zonas térmicas

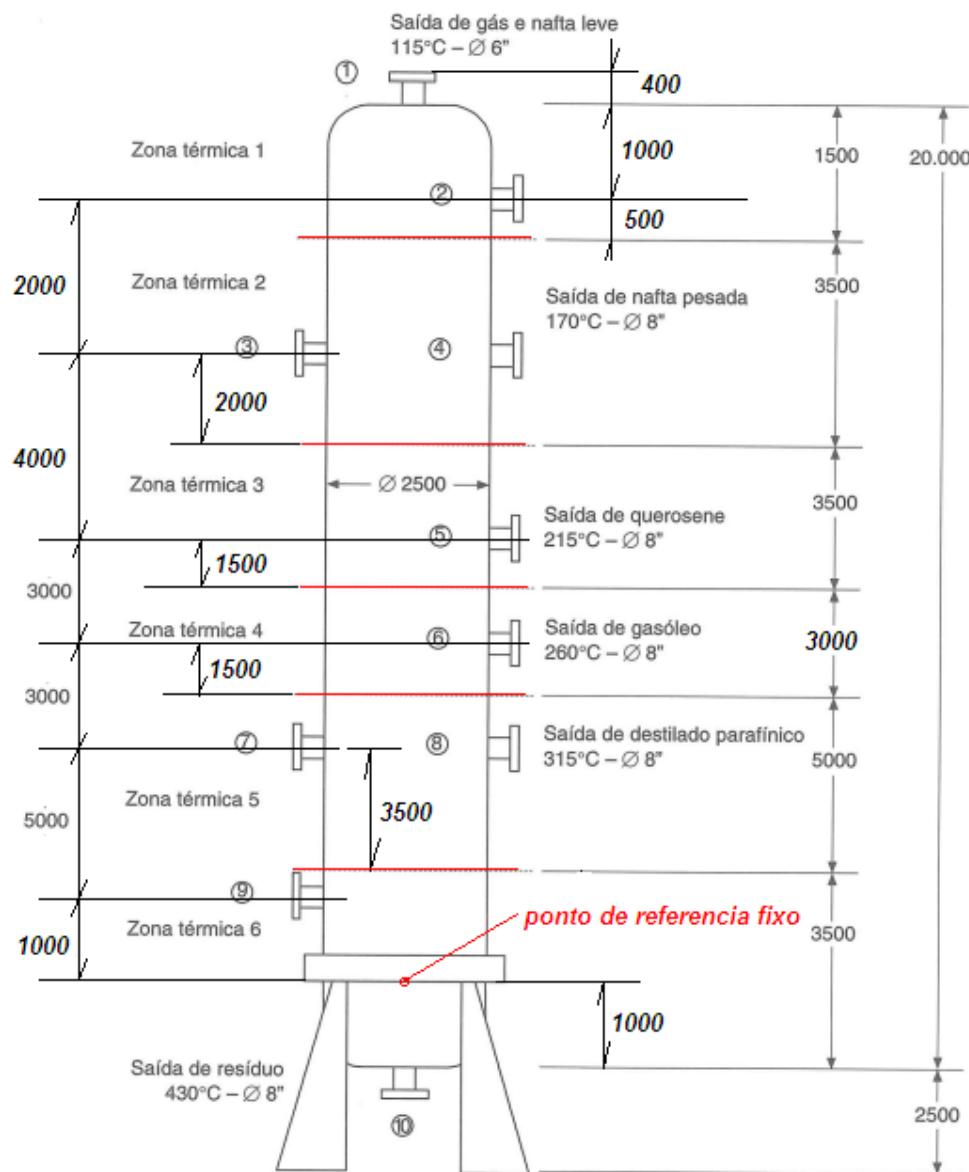
Zona Térmica	Temperatura [°C]	Coeficiente de Expansão [mm/m]	Altura [mm]	Expansão Longitudinal [mm]	Raio + Bocal [mm]	Expansão Radial [mm]
1	115	1,50	1500	2,25	1650	2,47
2	170	2,18	3500	7,65	1650	3,60
3	215	2,77	3500	9,70	1650	4,57
4	260	3,38	3000	10,14	1650	5,58
5	315	4,15	5000	20,77	1650	6,85
6	430	5,87	3500	20,55	1650	9,69

↑  
obtidos pela tabela

Para se estimar a movimento longitudinal de cada bocal, é necessário que se considere a expansão total ou parcial de todas as zonas térmicas situadas entre o bocal em questão e ponto de sustentação.

No caso da saída de gás e nafta leve (bocal 1), por exemplo, a movimentação é a somatória da expansão das zonas térmicas de 1 a 5 ( $2,25+7,65+9,7+10,14+20,77=50,51$ )

mm), do próprio bocal ( $1,5 \text{ mm/m} \times 0,4 \text{ m} = 0,6 \text{ mm}$ ) e da expansão do trecho da zona térmica 6 compreendido entre a zona 5 e o ponto de suportação ( $5,87 \text{ mm/m} \times 2,5 \text{ m} = 14,67 \text{ mm}$ ), perfazendo  $50,51 + 0,6 + 14,67 = 65,78 \text{ mm}$ .



**Figura 7-8** Divisão em zonas térmicas.

Para a estimativa da movimentação radial dos bocais, considera-se somente a expansão da zona térmica em que o bocal se encontra.

A expansão do suporte (eixo y) é estimada tal como no Exemplo 7-4. Tendo que o decaimento da temperatura ao longo do suporte seja de  $0,22^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ , a temperatura do suporte seria igual à temperatura ambiente a cerca de 1859 mm do topo. A temperatura

## Disciplina: CALCULO DE TENSÕES EM SISTEMAS DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAS

média deste trecho da estrutura seria de 225,5°C, indicando um coeficiente de expansão de 2,91 mm/m e, por consequência, uma expansão total de +5,41 mm.

**Tabela 7-3 Movimentação longitudinal dos bocais, não considerando a expansão da estrutura de suporte. Todas as dimensões estão em milímetros**

Bocal	Expansão da Zona Térmica do Bocal	Expansão das Zonas Térmicas Intermediárias	Expansão da Zona Térmica 6	Movimentação Longitudinal (Eixo y)
1	2,84	50,51	14,68	65,78
2	0,75	48,26	14,68	63,68
3	4,37	40,61	14,68	59,66
4	4,37	40,61	14,68	59,66
5	4,16	30,91	14,68	49,75
6	5,07	20,77	14,68	40,52
7	14,54		14,68	29,22
8	14,54		14,68	29,22
9	5,87			5,87
10	-8,22			-8,22

**Tabela 7-4 Movimentação radial dos bocais. (Dimensões em milímetros)**

Bocal	Zona Térmica	Raio + Bocal	Expansão Radial (Eixo x)
1	1		
2	1	1650	2,47
3	2	-1650	-3,60
4	2	1650	3,60
5	3	1650	4,57
6	4	1650	5,58
7	5	-1650	-6,85
8	5	1650	6,85
9	6	-1650	-9,69
10	6		

**Tabela 7-5 Estimativa da movimentação dos bocais do trocador de calor do Exemplo 7-5 (dimensões em milímetros)**

Eixos	Bocais									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	-	2,5	-3,6	3,6	4,6	5,6	-6,9	6,9	-9,7	-
y	71,2	69,1	65,1	65,1	55,2	45,9	34,6	34,6	11,3	-2,8

## QUESTÕES

13. Repita **EXEMPLO NUMÉRICO 10** com o material de aço inoxidável austenítico.