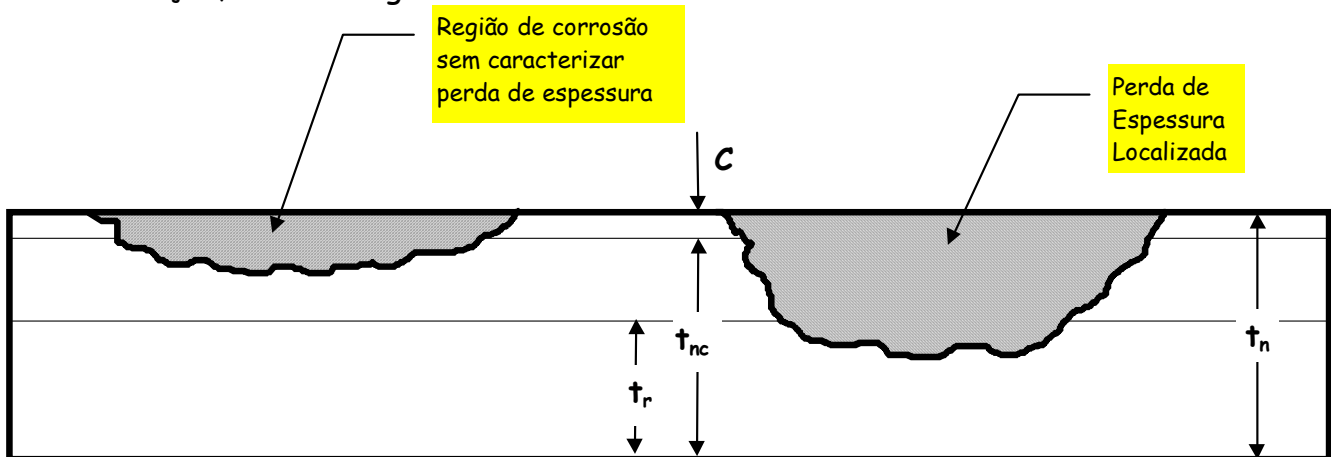


## CAPÍTULO V - PERDAS DE ESPESSURA EM EQUIPAMENTOS

## 1 - INTRODUÇÃO

Entende-se como perda de espessura à uma redução na espessura nominal do equipamento que ultrapasse a mínima requerida para este componente. De acordo com esta definição, temos a figura abaixo.



- $t_n$  - espessura nominal da chapa;
- $t_{nc}$  - espessura medida da chapa;
- $t_r$  - espessura requerida da chapa;
- $C$  - corrosão existente na chapa.

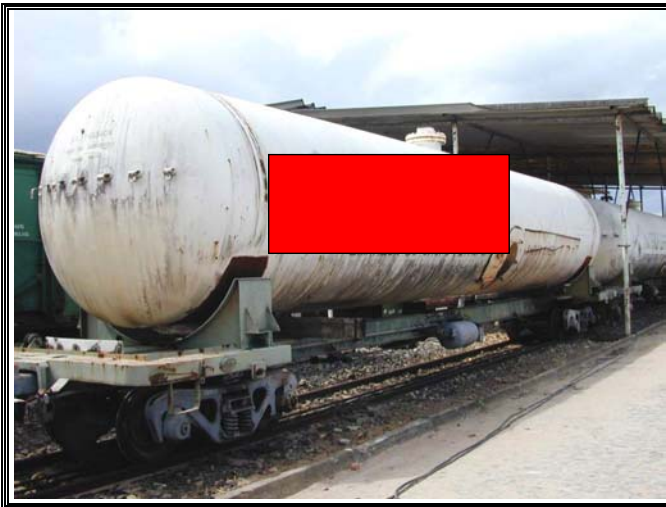
Como a espessura mínima requerida é dependente da pressão utilizada para o cálculo, pode-se identificar diversas situações :

- *Operação normal* - pressão máxima possível de ocorrer em condição de operação normal do equipamento;
- *Abertura da PSV* - corresponde ao máximo valor que será alcançada em condição de operação no equipamento para uma situação de alívio - condição eventual;
- *Pressão máxima admissível para o equipamento novo* - correspondente à condição em que o equipamento é submetido ao máximo carregamento de pressão interna possível para o componente limitante sem corrosão, que poderá ser o costado, tampos, conexões, flanges, etc,...
- *Pressão máxima admissível para o equipamento corroído* - correspondente à condição em que o equipamento é submetido ao máximo carregamento de pressão interna possível para o componente limitante corroído, que poderá ser o costado, tampos, conexões, flanges, etc,...
- *Teste hidrostático* - correspondente à uma condição onde as tensões admissíveis são mais elevadas e que o equipamento é submetido a deformações mais acentuadas.

As variáveis importantes neste tipo de avaliação são as seguintes :

- **Extensão e Profundidade da perda de espessura** - a utilização de qualquer critério de avaliação de perdas de espessuras localizadas estabelecem um compromisso entre as dimensões da descontinuidade, de tal forma que para maiores profundidades, menores extensões são permitidas. A determinação da curva limite de dimensões para a região de estudo é uma ferramenta útil para decisões rápidas.
- **Tipo de corrosão ou forma de redução de espessura** - esta informação, que significa o próprio perfil da redução local de espessura, permite a avaliação de eventuais concentradores de tensões e utilização de espessuras mínimas médias reduzindo o conservadorismo da análise.
- **Profundidades atingidas na região de perda de espessura** - corresponde à situação de descontinuidades não relevantes do ponto de vista estrutural mas que, pela excessiva profundidade comprometida, favorece a presença de vazamentos em operação.
- **Condições de cálculo** - os valores adotados de pressão interna e temperatura de parede influenciam diretamente o cálculo da espessura mínima requerida, portanto o estabelecimento de todas as condições de operação que irão ocorrer durante o período em que o equipamento estará com a espessura comprometida deverão ser analisados. Poderá se concluir que o equipamento não possui comprometimento para sua operação, no entanto não deverá ser testado hidrostáticamente.
- **Propriedades do material** - os valores de resistência mecânica são utilizados durante o cálculo das espessuras mínimas requeridas traduzidas pela tensão admissível do material. Para o caso de reduções de espessura que levem a concentradores de tensão elevados, a tenacidade do material também torna-se uma propriedade importante.





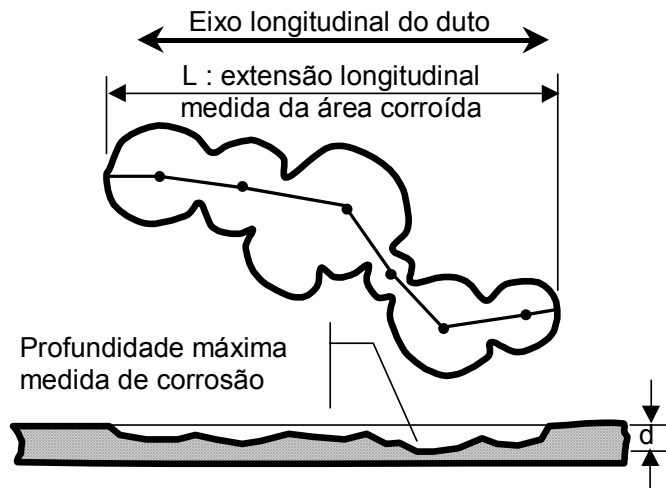


## 2 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE PERDAS LOCALIZADAS DE ESPESSURA

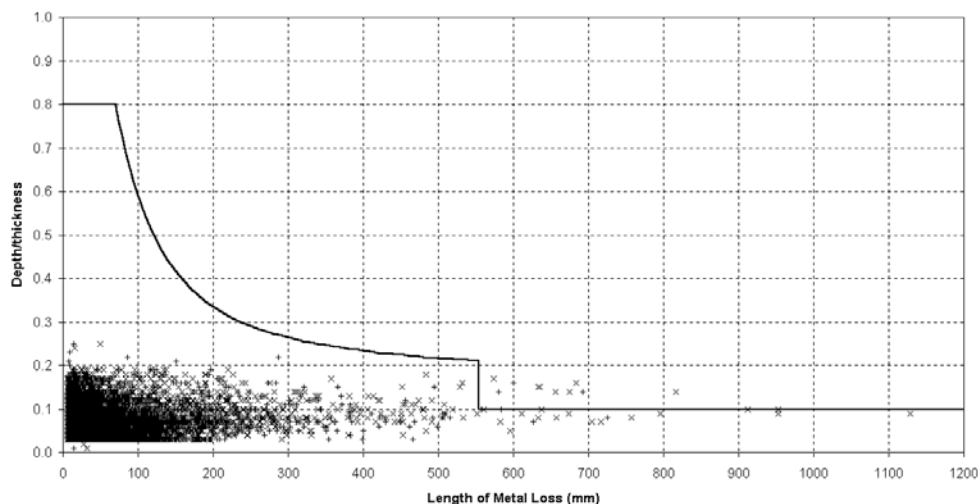
Diversos critérios foram desenvolvidos ao longo dos anos para avaliação de perdas locais de espessura. Os mais utilizados são os seguintes :

**2.1 - ASME B31G : 1991 / Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines** - Critério tradicionalmente utilizado para perdas de espessura em tubulações. Possui restrição significativa para vasos de pressão pelo fato de não considerar a dimensão circunferencial da descontinuidade, o que poderá significar uma avaliação contra a segurança.

O critério do procedimento ASME B31G, utiliza para avaliação a espessura nominal do duto, sendo calculada uma pressão reduzida em função da extensão máxima axial da descontinuidade.



*Fonte: Norma ASME B31G - Convenção para estabelecimento do comprimento  $L$  de um defeito de corrosão de geometria irregular.*



Conforme Parte 2 do documento, temos : % pit depth =  $100.d/t$

$$L = 1,12.B.\sqrt{D.t}$$

$$\text{Onde : } B = \sqrt{\left[ \frac{\frac{d}{t}}{1,1 \cdot \frac{d}{t} - 0,15} \right]^2 - 1}$$

Se  $L_m > L$  Deve-se calcular a pressão reduzida

Se  $L_m < L$  A descontinuidade é aceitável sem cálculos adicionais

Onde : L - máxima dimensão axial admissível da descontinuidade

D - diâmetro externo nominal

B - valor determinado como abaixo

d - máxima profundidade da descontinuidade

t - espessura nominal do duto

$L_m$  - dimensão axial da perda de espessura

Conforme a Parte 4 do procedimento do ASME B31G :  $A = 0,893 \cdot \left[ \frac{L_m}{\sqrt{D.t}} \right]$

$$\text{Para valores de "A" menores ou iguais a 4,0 : } P' = 1,1.P. \left[ \frac{1 - \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{d}{t \cdot \sqrt{A^2 + 1}} \right)} \right]$$

$$\text{Para valores de "A" maiores que 4,0 : } P' = 1,1.P. \left[ 1 - \left( \frac{d}{t} \right) \right]$$

Onde :

$P'$  - pressão máxima admissível para operação do duto com a presença da descontinuidade

P - maior valor de diferença entre o valor da Pressão Máxima de Operação e o valor encontrado através da fórmula :  $P = \frac{2.S.t.F.T}{D}$

F - fator de projeto (conforme norma ASME B31.4, ASME B31.8 ou ASME B31.11)

T - fator de temperatura (conforme código B31 apropriado, se não citado,  $T=1,0$ )

**Exemplo:**

Dimensão axial da perda de espessura ( $L_m$ ) = 600,0 mm

Dimensão circunferencial da perda de espessura ( $L_c$ ) = 500,0 mm

% pit depth = 70

$t = 11,0$  mm

$D = 406,4$  mm

Pressão máxima de operação = 80,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

Tensão admissível do material do duto = 60.000,0 psi = 4.219,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

Eficiência de junta = 100%

$$\% \text{ pit depth} = 100 \cdot d/t \quad \Rightarrow \quad d = 70\% \times 11,0 \text{ mm} = 7,7 \text{ mm}$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1,1 \cdot d/t - 0,15}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{7,7/11,0}{1,1 \times 7,7/11,0 - 0,15}\right)^2 - 1} = 0,524$$

$$L = 1,12 \cdot B \cdot \sqrt{D \cdot t} = 1,12 \times 0,524 \times \sqrt{406,4 \times 11,0} = 39,2 \text{ mm} < 400,0 \text{ mm}$$

Como o valor de "L" é inferior à dimensão axial da descontinuidade, deverá ser calculada a pressão reduzida.

$$A = 0,893 \cdot \left(\frac{L_m}{\sqrt{D \cdot t}}\right) = 0,893 \times \left(\frac{600,0}{\sqrt{406,4 \times 11,0}}\right) = 8,01 > 4,0$$

O valor da pressão máxima admissível do duto é calculada conforme abaixo :

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot t \cdot F \cdot T}{D} = \frac{2 \times 4.219,0 \times 11,0 \times 1,0 \times 1,0}{406,4} = 228,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

Continuando a avaliação da descontinuidade, temos :

$$P' = 1,1 \cdot P \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{t}\right)\right] = 1,1 \times 228,4 \times [1 - 0,70] = 75,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

Como o valor de P' calculado é inferior à máxima pressão de operação do duto, a descontinuidade afeta a integridade da estrutura.

$$\text{"Pressure Ratio"} = P_{\text{oper}} / P' = 80,0 / 75,4 = 1,06 > 1,0$$

**2.2 - DNV - RP - F101 / Recommended Practice - Corroded Pipelines** - Critério desenvolvido recentemente (1999) que utiliza critério de cálculo determinístico equivalente ao definido pela BS-7910.

São excluídos do escopo do documento os seguintes :

- 1 - Materiais diferentes que aços carbono;
- 2 - Materiais com graus superiores ao X80;
- 3 - Carregamentos cíclicos;
- 4 - Presença de trincas;
- 5 - Combinação de corrosão e trincamento;
- 6 - Combinação de corrosão e danos mecânicos;
- 7 - Perda de espessura atribuída a remoção mecânica;
- 8 - Defeitos de fabricação em soldas;
- 9 - Defeitos com profundidade superior a 85% da parede do tubo.

Os critérios do documento somente podem ser aplicados a dutos que possuem como critério de falha esperado o colapso plástico, assim dutos com materiais de tenacidade reduzida devem ser avaliados de acordo com critérios mais conservativos.

Conforme Parte B do documento, temos :

$$P_{sw} = F.P_f$$

$$\text{Sendo : } P_f = \left[ \frac{2.t.UTS.\left(1 - \frac{d}{t}\right)}{(D-t).\left(1 - \frac{d}{t.Q}\right)} \right] \quad Q = \sqrt{1 + 0,31.\left(\frac{l}{\sqrt{D.t}}\right)^2}$$

$$F = F_1.F_2$$

Onde : d - profundidade da área corroída

D - diâmetro externo nominal

t - espessura nominal do duto

l - dimensão axial da perda de espessura

UTS - Limite de resistência do material

$P_f$  - pressão de falha do duto corroído;

$P_{sw}$  - pressão máxima admissível de trabalho.

$F_1$  - fator de modelo (=0,90);

$F_2$  - fator de projeto (dependente do código original de projeto do duto).



**Exemplo:**

Dimensão axial da perda de espessura (l) = 600,0 mm

% pit depth = 70

t = 11,0 mm

D = 406,4 mm

Pressão máxima de operação = 80,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

UTS = 65.000,0 psi = 4.571,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

% pit depth = 100.d/t ⇒ d = 70% × 11,0 mm = 7,7 mm

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \cdot \left( \frac{l}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2} = \sqrt{1 + 0,31 \cdot \left( \frac{600,0}{\sqrt{406,4 \times 11,0}} \right)^2} = 5,10$$

$$P_f = \frac{\left[ 2 \cdot t \cdot UTS \cdot \left( 1 - \frac{d}{t} \right) \right]}{\left[ (D - t) \cdot \left( 1 - \frac{d}{t \cdot Q} \right) \right]} = \frac{\left[ 2 \times 11,0 \times 4.571,0 \times \left( 1 - \frac{7,7}{11,0} \right) \right]}{\left[ (406,4 - 11,0) \times \left( 1 - \frac{7,7}{11,0 \times 5,10} \right) \right]} = 88,44 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$P_{sw} = 0,9 \times 1,0 \times 88,44 = 79,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

Como o valor de P' calculado é inferior à máxima pressão de operação do duto, a descontinuidade afeta a integridade da estrutura.

$$\text{"Pressure Ratio"} = P_{oper} / P' = 80,0 / 79,6 = 1,01 > 1,0$$

**2.3 - API - RP 579 / Recommended Practice for Fitness-for-Service** - Apresenta um procedimento de cálculo subdividido em 3(três) níveis de aplicação. Os níveis 1 e 2 podem ser aplicados se todas as condições a seguir forem satisfeitas :

- a. O critério de projeto original do equipamento segue os códigos ASME, API ou outros códigos reconhecidos internacionalmente;
- b. A temperatura de projeto é inferior a 750°F (400°C) para aços carbono, 850°F (455°C) para aços baixa liga e 950°F (510°C) para aços alta liga;
- c. O Nível 1 pode ser utilizado se o material é considerado dúctil e não sujeito a fenômeno de envelhecimento (embrittlement) durante operação devido a temperatura ou ação do meio. Para situações onde ocorra a redução de tenacidade devido ao fenômeno de embrittlement, um fator de correção poderá ser incluído em um Nível 2 de avaliação.
- d. O componente em avaliação não possui trincas;
- e. A geometria do componente é uma das seguintes :
  1. Costados cilíndricos e cônicos,
  2. Componentes esféricos,
  3. Região central de tampos conformados elípticos e torisféricos,
  4. Bocais integrais.
  5. Seções de sistemas de tubulações,
- f. As limitações de carregamentos são as seguintes :
  1. Nível 1 - limitado para seções sujeitas a pressão interna.
  2. Nível 2 - para seções sujeitas a pressão interna e cargas suplementares.

Um estudo de Nível 3 deverá ser realizado quando os Níveis 1 e 2 não se aplicam :

- a. Geometrias associadas com descontinuidades estruturais não cobertas pelo Nível 2 , tais como :
  1. Zona tangencial de tampos elípticos (fora da região central de 80% do diâmetro),
  2. Região tôrica de tampos torisféricos e transições cônicas,
  3. Junções tampo / costado,
  4. Descontinuidades no costado, tais como anéis de enrijecimento, suportes, etc...
  5. Bocais e conexões com ou sem reforço de anel, sujeitos a pressão interna e cargas externas;
  6. Junção do fundo com o costado de tanques de armazenamento.
- b. Componentes sujeitos a pressão externa e cargas adicionais não cobertas pelo Nível 2.
- c. Componentes sujeitos a serviço cíclicos.

O procedimento de avaliação Nível 1 é descrito a seguir :

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}}$$

$$\lambda = \frac{1,285 \cdot s}{\sqrt{D \cdot t_{min}}}$$

$$M_t = (1 + 0,48 \cdot \lambda^2)^{0,5}$$

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t} \cdot (1 - R_t)}$$

$$P' = P \cdot \frac{RSF}{0,9}$$

Onde :  $t_{mm}$  - espessura mínima medida;

$t_{min}$  - espessura mínima requerida do componente corroído;

$s$  - dimensão longitudinal da região corroída;

RSF - fator remanescente de resistência;

$RSF_a$  - fator remanescente de resistência admissível (=0,90);

FCA - corrosão admitida entre inspeções.

As limitações dimensionais do procedimento são as seguintes :

$$- R_t > 0,20$$

$$- t_{mm} - FCA > 2,5 \text{ mm}$$

A dimensão circunferencial desta LTA deverá ser verificada através das equações abaixo :

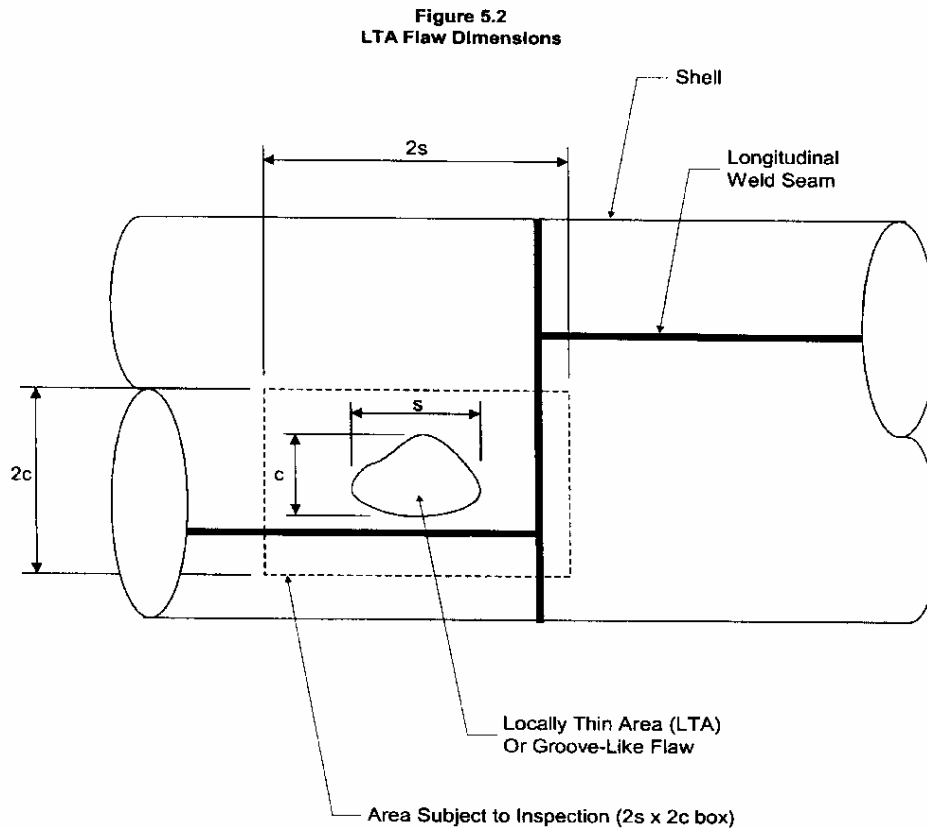
$$R_t = 0,20$$

$$\text{Para } c / D \leq 0,348$$

$$R_t = \frac{-0,73589 + 10,511 \cdot \left(\frac{c}{D}\right)^2}{1,0 + 13,838 \cdot \left(\frac{c}{D}\right)^2}$$

$$\text{Para } c / D > 0,348$$

Onde :  $c$  - dimensão circunferencial da região corroída.

**Notes:**

1.  $s$  - Longitudinal dimension of the Flaw.
2.  $c$  - Circumferential dimensions of the Flaw.
3. See Section 4, paragraph 4.3.3.3 for the procedure to determine  $s$  and  $c$ .

**Exemplo:**

Utilizar o procedimento API-579 Nível 1 para determinar a aceitabilidade de uma redução de espessura devido ao esmerilhamento de uma descontinuidade localizada no material de base da chapa do costado.

**Premissas**

- diâmetro interno do equipamento : 1.981,0 mm = 78,0 in
- espessura nominal : 24,0 mm = 0,94 in
- material do costado : SA-285 Gr.C
- temperatura de projeto : 90,0 °C
- temperatura de operação : 42,0 °C
- pressão máxima de operação corroída e quente : 19,0 Kgf/cm<sup>2</sup>
- tensão admissível do material : 13.800,0 psi = 970,0 Kgf/cm<sup>2</sup>
- tensão de escoamento do material : 30.000,0 psi = 2.109,7 Kgf/cm<sup>2</sup>
- limite de resistência do material : 55.000,0 psi = 3.868,0 Kgf/cm<sup>2</sup>
- sobresspessura de corrosão estimada até a nova parada : 0,2 mm
- eficiência de juntas do costado : 0,85

- Cálculo da Espessura Mínima Requerida

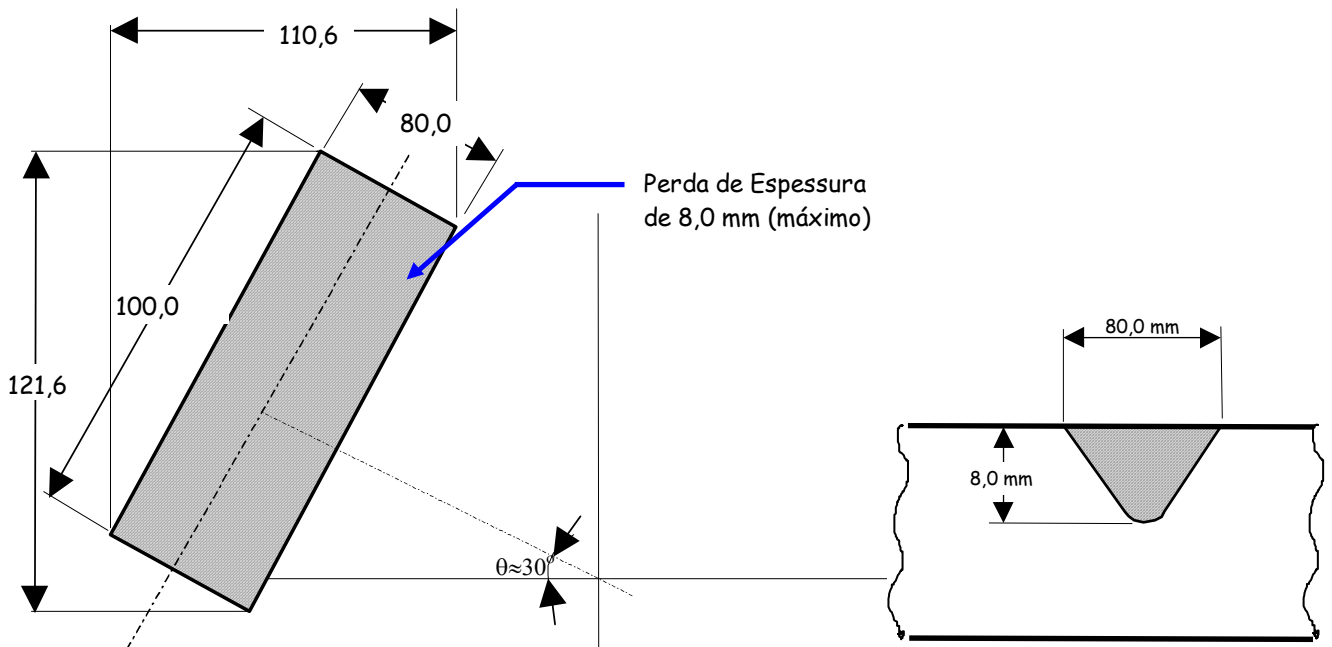
Será verificada a condição de pressão interna máxima admissível para o equipamento.

- Condição de pressão máxima de operação :

$$t = \frac{P.R}{S.E - 0,6.P} = \frac{19,0 \times 1.981,0}{970,0 \times 1,0 - 0,6 \times 19,0} = 19,6 \text{ mm}$$

- Avaliação da Perda de Espessura Localizada

A perda de espessura localizada, após esmerilhamento do defeito localizado possui aproximadamente as seguintes dimensões :



O valor mínimo admissível para o RSF calculado é de 0,9.

$$s = 110,6 \text{ mm}$$

$$c = 121,6 \text{ mm}$$

$$D = 1.981,0 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 19,6 \text{ mm}$$

$$t_{\text{mm}} - FCA = 24,0 - 8,0 - 0,2 = 15,8 \text{ mm}$$

$$R_t = 15,8 / 19,6 = 0,806$$

$$\lambda = \frac{1,285 \times 110,6}{\sqrt{1.981,0 \times 19,6}} = 0,721$$

$$M_t = (1 + 0,48 \times 0,721^2)^{0,5} = 1,118$$

$$RSF = \frac{0,806}{1 - \frac{1}{1,118} \cdot (1 - 0,806)} = 0,975 > 0,9$$

-  $R_t > 0,20$ .....Ok!

-  $t_{mm} - FCA > 2,5 \text{ mm}$ .....Ok!

$$c / D = 121,6 / 1.981,0 = 0,061 \rightarrow c / D \leq 0,348$$

$R_t = 0,806 > 0,20$  .....Ok!

### 3 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE PERDAS GENERALIZADAS DE ESPESSURA

#### 3.1 - API - RP 579 / Recommended Practice for Fitness-for-Service

##### *Determinação da espessura mínima medida*

A avaliação da espessura mínima medida do componente deverá ser realizada através de um dos seguintes métodos :

1 - Medição pontual de espessura - recomendado para componentes cuja espessura mínima medida na região corroída seja superior a 70% da espessura mínima requerida para os carregamentos utilizados na avaliação ou para o caso de perdas de espessura generalizadas;

2 - Medição de perfis de corrosão - recomendado para componentes cuja espessura mínima medida na região corroída seja inferior a 70% da espessura mínima requerida para os carregamentos utilizados na avaliação ou para o caso de perdas de espessura localizadas;

Os limites e recomendações descritos devem ser avaliados pelo engenheiro responsável pelos cálculos, devendo ser verificadas as informações existentes oriundas da inspeção do componente, para a definição do método a ser utilizado para a definição da espessura mínima medida.

Ensaio complementares devem ser utilizados para confirmação do perfil e extensão da área corroída do componente, citando-se como aplicáveis: Inspeção Visual, Inspeção Radiográfica e outros métodos de inspeção capazes de identificar e delimitar regiões com perda de espessura.

A definição se a região com perda de espessura possui caráter generalizado ou localizado pode não ser imediata. Essa classificação depende da extensão da região afetada em relação as dimensões do equipamento, bem como do nível de perda de espessura.

#### **Medições Pontuais de Espessura**

Este método de medição e estabelecimento da espessura mínima medida do componente consiste em determinar os valores mínimo e médio de medições realizadas na região de perda de espessura. A extensão da região de perda de espessura deverá ser definida através de ensaios complementares e o número de pontos de medição para a caracterização da perda de espessura é de responsabilidade do engenheiro responsável pelo cálculo, sendo recomendada a utilização de, no mínimo, 15 pontos de medição.

Os valores obtidos por medições pontuais de espessura são considerados representativos de um valor médio, somente se o desvio padrão calculado para as medições realizadas sejam inferiores a 10% do valor médio desses valores ( $COV \leq 10\%$ ).

O padrão de preenchimento a seguir é sugerido para o registro dos pontos medidos, dentro da região de perda de espessura.

Identificação do Equipamento :	
Tipo de Equipamento :	
Componente :	

Corrosão Futura [mm / ano] :	
Tempo para nova Avaliação [anos] :	
Diâmetro do Componente [mm] :	
Espessura Mínima Requerida [mm] :	

Ponto	Espessura [mm]		$(t_i - FCA)^2$	Ponto	Espessura [mm]		$(t_i - FCA)^2$
	$t_i$	$(t_i - FCA)$			$t_i$	$(t_i - FCA)$	
1				16			
2				17			
3				18			
4				19			
5				20			
6				21			
7				22			
8				23			
9				24			
10				25			
11				26			
12				27			
13				28			
14				29			
15				30			

Soma1 = $\Sigma(t_i - FCA)$	
$t_{mm}$ (menor valor $t_i$ ) =	
$t_{am} - FCA = (Soma1 / N) =$	
Soma2 = $\Sigma(t_i - FCA)^2 =$	
$s = \{[N / (N - 1)].[(Soma2 / N) - (t_{am} - FCA)^2]^{1/2} =$	
$COV = s / t_{am}$	

Se  $COV \leq 0,10$  : utilizar  $t_{am}$  para avaliar a região de perda de espessura  
 Se  $COV > 0,10$  : utilizar a técnica de perfis críticos de corrosão

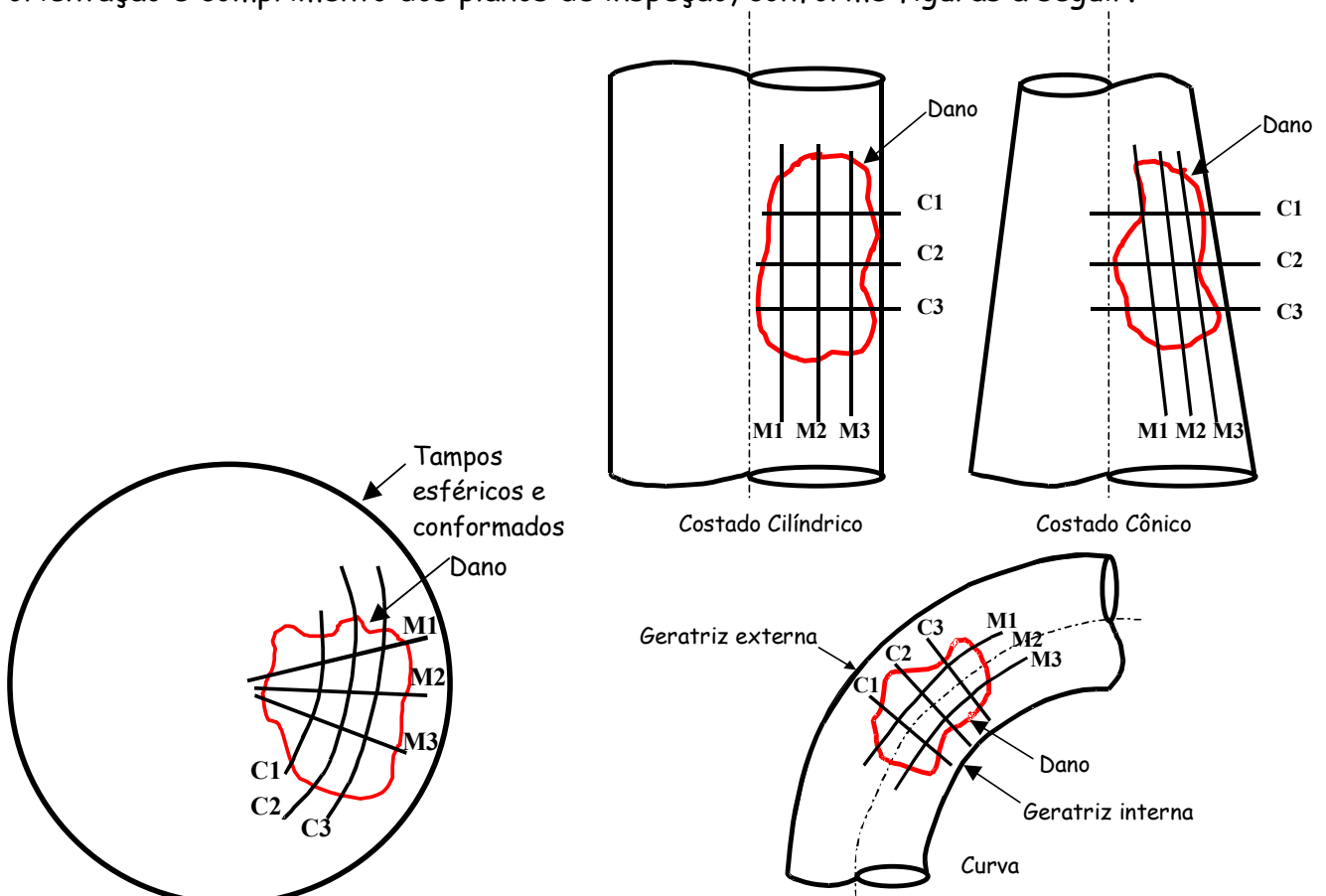


## Definição de Perfis Críticos de Corrosão

Esse procedimento é recomendado para regiões corroídas com variações significativas do perfil de corrosão, bem como em regiões em que a perda de espessura é elevada em relação a espessura mínima requerida do componente.

Os passos para obtenção dos perfis de corrosão, são os seguintes :

1 - Localizar a região de perda de espessura do componente e determinar a localização, orientação e comprimento dos planos de inspeção, conforme figuras a seguir.



2 - Realizar a medição e o registro das espessuras ao longo de cada plano de inspeção, determinando o mínimo valor medido para cada plano,  $t_{\min}$ . O espaçamento entre pontos de leitura deve ser definido de forma a caracterizar o perfil de variação ao longo do plano de inspeção. O espaçamento recomendado é definido pela equação a seguir, principalmente na caracterização de áreas com perda de espessura onde a inspeção visual não pode ser realizada. Não deve ser utilizado um número de pontos de medição inferior a 5 (cinco), para cada plano de inspeção.

$$L_s = \text{máx.} [0,36.(D.t_{\min})^{1/2}; 2.t_{\text{nom}}]$$

Onde :

$L_s$  - espaçamento mínimo recomendado entre pontos de medição;

$D$  - diâmetro interno do componente;

$t_{\min}$  - espessura mínima requerida do componente para a condição de cálculo avaliada;

$t_{\text{nom}}$  - espessura nominal do componente.

O padrão de preenchimento a seguir é sugerido para os pontos medidos ao longo dos planos de inspeção. O espaçamento acima definido entre pontos de medição poderá ser alterado em função da extensão e o perfil da área com redução de espessura.

Identificação do Equipamento :	
Tipo de Equipamento :	
Componente :	

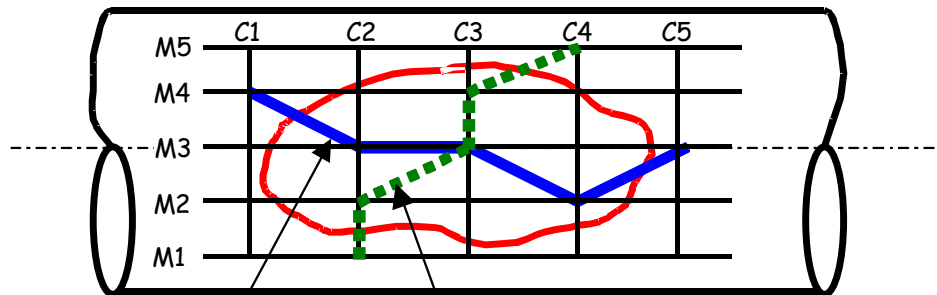
Corrosão Futura [mm / ano] :	
Tempo para nova Avaliação [anos] :	
Diâmetro do Componente [mm] :	
Espessura Mínima Requerida [mm] :	

Plano de Inspeção n° : _____		Plano de Inspeção n° : _____		Plano de Inspeção n° : _____		Plano de Inspeção n° : _____	
Ponto	t [mm]	Ponto	t [mm]	Ponto	t [mm]	Ponto	t [mm]
$t_{\text{mm}}$		$t_{\text{mm}}$		$t_{\text{mm}}$		$t_{\text{mm}}$	
$t_{\text{am}}$		$t_{\text{am}}$		$t_{\text{am}}$		$t_{\text{am}}$	

3 - Determine os Perfis Críticos sobre os quais a espessura medida é inferior à espessura mínima requerida,  $t_{min}$ . Utilizar a geometria descrita na figura abaixo para a definição dos Perfis Críticos nas direções das máximas tensões principais do componente.

a - Direção meridional ou longitudinal é obtida pela mínima espessura a cada projeção ao longo dos planos de inspeção M1-M5. O comprimento da perda de espessura ao longo da direção longitudinal, denominado de "s", é determinada utilizando o Plano Crítico e a espessura mínima requerida do componente;

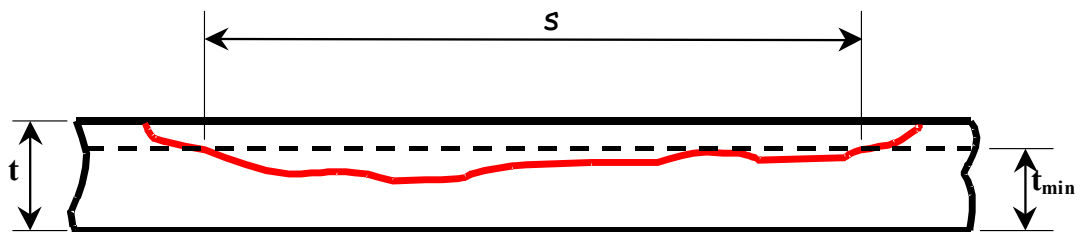
b - Direção circunferencial é obtida pela mínima espessura a cada projeção ao longo dos planos de inspeção C1-C5. O comprimento da perda de espessura ao longo da direção circunferencial, denominado de "c", é determinada utilizando o Plano Crítico e a espessura mínima requerida do componente.



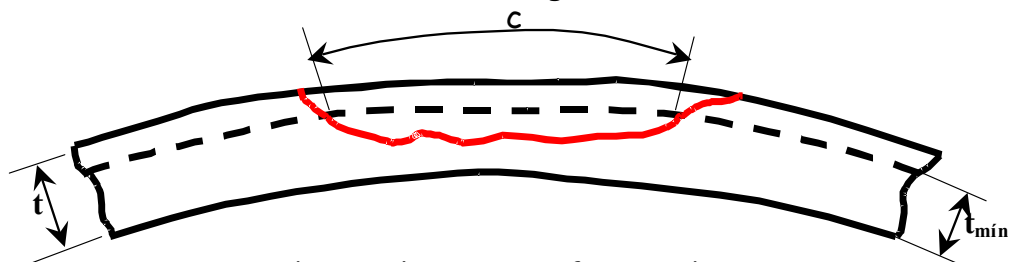
Linha indicando o caminho de espessuras mínimas medidas na direção longitudinal

Costado Cilíndrico  
Linha indicando o caminho de espessuras mínimas medidas na direção circunferencial

#### Planos de Inspeção - Planos Críticos



Plano Crítico Longitudinal



Plano Crítico Circunferencial

### *Critérios de Avaliação*

No caso da redução de espessura do componente medida ser inferior ao valor admissível de corrosão estabelecido em projeto, não é necessária a avaliação segundo os critérios definidos.

Os passos seguintes devem ser utilizados para a avaliação de perdas de espessuras em componentes pressurizados. O critério a ser utilizado depende do método de inspeção escolhido para a caracterização da região com perda de espessura.

#### A - Medições Pontuais de Espessura onde $COV \leq 10\%$

**Passo 1** : Determine a espessura mínima requerida do componente,  $t_{min}$ , baseado nas condições de avaliação (pressão e temperatura). Os valores a serem utilizados podem estar representando uma condição de projeto, máxima de operação ou uma condição de alívio do equipamento. Esta definição deverá estar claramente indicada na avaliação realizada no equipamento.

**Passo 2** : Utilizar os seguintes critérios:

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{am} - FCA \geq t_{min}$

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{mm} - FCA \geq \text{máx.}[0,5.t_{min} ; 2,5 \text{ mm}]$

Onde :  $t_{am}$  - espessura média dos pontos medidos.

$t_{min}$  - espessura mínima requerida do componente.

FCA - perda de espessura prevista até a próxima inspeção.

**Passo 3** : Se os critérios definidos no Passo 2 não forem atendidos, as seguintes opções devem ser analisadas :

- a. Reparar o componente ou reduzir a pressão interna no equipamento;
- b. Ajustar o valor de FCA através de técnicas de remediação do dano;
- c. Alterar a eficiência de junta soldada, para perdas de espessuras em soldas do componente, através de inspeção complementar;
- d. Analisar a perda de espessura pelos Níveis 2 e 3 do procedimento do API RP 579.

**B - Medições Pontuais de Espessura onde COV > 10% ou Método de Perfis Críticos de Corrosão.**

**Passo 1** : Determine a espessura mínima requerida do componente,  $t_{\min}$ , baseado nas condições de avaliação (pressão e temperatura). Os valores a serem utilizados podem estar representando uma condição de projeto, máxima de operação ou uma condição de alívio do equipamento. Esta definição deverá estar claramente indicada na avaliação realizada no equipamento.

**Passo 2** : Definir as dimensões da área com perda de espessura.

**Passo 3** : Calcular a relação de espessura remanescente :  $R_t = (t_{\text{mm}} - FCA) / t_{\min}$

Onde :  $t_{\text{mm}}$  - espessura mínima medida na região de perda de espessura;

**Passo 4** : Determinar o valor do comprimento máximo admissível da região de perda de espessura, L.

$$L = Q \cdot [D \cdot t_{\min}]^{1/2}$$

Onde : D - diâmetro do componente;  
Q - fator definido pelas expressões abaixo.

$$Q = 1,123 \cdot \left[ \left( \frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad \text{para } R_t < RSF_a$$

$$Q = 50,0 \quad \text{para } R_t \geq RSF_a$$

Onde :  
RSF<sub>a</sub> - fator remanescente de resistência (valor recomendado : RSF<sub>a</sub> = 0,90).

**Passo 5** : Utilizar o critério abaixo.

Se  $s \leq L$ , a dimensão meridional ou longitudinal da região de perda de espessura é aceitável. Nesse caso, verificar a dimensão circunferencial, conforme item 2.3.

Se  $s > L$ , a região de perda de espessura deverá ser avaliada através dos critérios para perdas de espessura localizada (ver item 2.3) ou avaliar conservativamente através dos critérios abaixo definidos. Opcionalmente a região deverá ser reparada.

**Passo 6** : Utilizar opcionalmente os critérios a seguir, no caso de não atendimento aos critérios definidos no item anterior.

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{mm} - FCA \geq t_{min}$

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{mm} - FCA \geq \text{máx.}[0,5.t_{min} ; 2,5 \text{ mm}]$

Se não atendidos os critérios acima, a região de perda de espessura deverá ser avaliada através dos critérios para perdas de espessura localizada (ver item 2.3) ou avaliar através dos critérios abaixo definidos. Opcionalmente a região deverá ser reparada.

**Passo 7** : Utilizar opcionalmente os critérios a seguir, baseados nos Perfis Críticos de Corrosão, no caso de não atendimento aos critérios definidos no item anterior.

a - Determine as espessuras médias  $t_{am}^C$  e  $t_{am}^L$  para as direções das tensões principais do componente. Esses valores são obtidos calculando-se a média de espessuras em um comprimento de extensão L com centro localizado no ponto de mínima espessura  $t_{mm}$ .

b - Verificar os critérios abaixo definidos, em função da geometria do componente.

b.1 - Componentes cilíndricos :

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :

$$t_{am}^C - FCA \geq t_{min}^C$$

$$t_{am}^L - FCA \geq t_{min}^L$$

b.2 - Componentes esféricos ou tampos :

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{am} - FCA \geq t_{min}$

Onde :  $t_{am}$  - menor valor entre os obtidos pelos Planos de Inspeção definidos para o componente.

b.3 - Qualquer componente :

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO** :  $t_{mm} - FCA \geq \text{máx.}[0,5.t_{min} ; 2,5 \text{ mm}]$

**Exemplo 1 - Medição Pontual de Espessuras**

Determine se o costado cilíndrico com características definidas a seguir está apto para operação normal avaliando uma perda de espessura generalizada detectada na inspeção.

Condições de projeto : 3,85 Mpa @ 380°C

Diâmetro interno = 484,0 mm

Espessura nominal = 16,0 mm

Perda de espessura = 3,0 mm

Corrosão futura = 2,0 mm

Material : SA - 516 Gr.60

Eficiência de junta soldada = 100%

Ponto	Espessura [mm]		$(t_i - FCA)^2$	Ponto	Espessura [mm]		$(t_i - FCA)^2$
	$t_i$	$(t_i - FCA)$			$t_i$	$(t_i - FCA)$	
1	13,0	11,0	121,0	16	---	---	---
2	12,0	10,0	100,0	17	---	---	---
3	11,0	9,0	81,0	18	---	---	---
4	13,0	11,0	121,0	19	---	---	---
5	10,0	8,0	64,0	20	---	---	---
6	12,0	10,0	100,0	21	---	---	---
7	11,0	9,0	81,0	22	---	---	---
8	12,0	10,0	100,0	23	---	---	---
9	13,0	11,0	121,0	24	---	---	---
10	13,0	11,0	121,0	25	---	---	---
11	11,0	9,0	81,0	26	---	---	---
12	12,0	10,0	100,0	27	---	---	---
13	12,0	10,0	100,0	28	---	---	---
14	13,0	11,0	121,0	29	---	---	---
15	13,0	11,0	121,0	30	---	---	---
Soma1 = $\Sigma(t_i - FCA)$					151,0		
$t_{mm}$ (menor valor $t_i$ ) =					10,0		
$t_{am} - FCA = (Soma1 / N) =$					10,07		
Soma2 = $\Sigma(t_i - FCA)^2 =$					1533,0		
$s = \{[N / (N - 1)].[(Soma2 / N) - (t_{am} - FCA)^2]^{1/2} =$					0,9608		
COV = $s / t_{am}$					0,095 (9,5%)		
Se $COV \leq 0,10$ : utilizar $t_{am}$ para avaliar a região de perda de espessura							
Se $COV > 0,10$ : utilizar a técnica de perfis críticos de corrosão							

Espessura mínima requerida do componente :

$$t_{\min} = P.R_c / (S.E - 0,6.P) = 3,85 \times (242,0 + 2,0 + 3,0) / (96,2 \times 1,0 - 0,6 \times 3,85) = 10,13 \text{ mm}$$

Critérios de aceitação :

$$t_{\text{am}} - FCA \geq t_{\min} \rightarrow 10,07 < 10,13 \dots\dots\dots \text{Não !}$$

$$t_{\text{mm}} - FCA \geq \text{máx.}[0,5.t_{\min} ; 2,5 \text{ mm}]$$

$$10,0 - 2,0 > \text{máx.}[0,5 \times 10,13 ; 2,5] = 5,06 \dots\dots\dots \text{Ok!}$$

Como os critérios não foram atendidos, as seguintes opções devem ser analisadas :

- Reparar o componente ou reduzir a pressão interna no equipamento;
- Ajustar o valor de FCA através de técnicas de remediação do dano;
- Alterar a eficiência de junta soldada, para perdas de espessuras em soldas do componente, através de inspeção complementar;
- Analisar a perda de espessura pelos Níveis 2 e 3 do procedimento do API RP 579.

### Exemplo 2 - Perfis Críticos de Corrosão

Uma corrosão em uma junta longitudinal em um costado cilíndrico foi detectada pela inspeção. Avaliar se o equipamento poderá operar em suas condições normais.

Condições de projeto : 300 psig @ 350°F

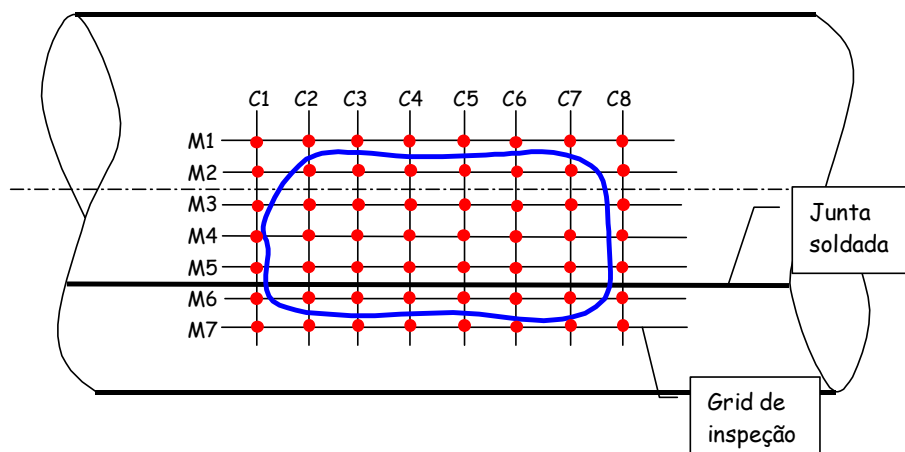
Diâmetro interno = 48 in

Espessura nominal = 0,75 in

Corrosão futura = 0,10 in

Material : SA 516 Gr.70

Eficiência de junta soldada = 0,85





Planos de Inspeção Longitudinais	Planos de Inspeção Circunferenciais								Circunferencial CTP
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
M1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
M2	0,75	0,48	0,52	0,57	0,56	0,58	0,60	0,75	0,48
M3	0,75	0,57	0,59	0,55	0,59	0,60	0,66	0,75	0,55
M4	0,75	0,61	0,47	0,58	0,36	0,58	0,64	0,75	0,36
M5	0,75	0,62	0,59	0,58	0,57	0,48	0,62	0,75	0,48
M6	0,75	0,57	0,59	0,61	0,57	0,56	0,49	0,75	0,49
M7	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Longitudinal CTP	0,75	0,48	0,47	0,55	0,36	0,48	0,49	0,75	

Espessura mínima requerida :

$$t_{\min}^C = P.R / (S.E - 0,6.P) = 300 \times (24,0 + 0,10) / (17.500,0 \times 0,85 - 0,6 \times 300) = 0,492 \text{ in}$$

$$t_{\min}^L = P.R / (2.S.E + 0,4.P) = 300 \times (24,0 + 0,10) / (2 \times 17.500,0 \times 0,85 + 0,4 \times 300) = 0,242 \text{ in}$$

$$t_{\min} = \max [0,492 ; 0,242] = 0,492 \text{ in}$$

Cálculo da relação de espessura remanescente :

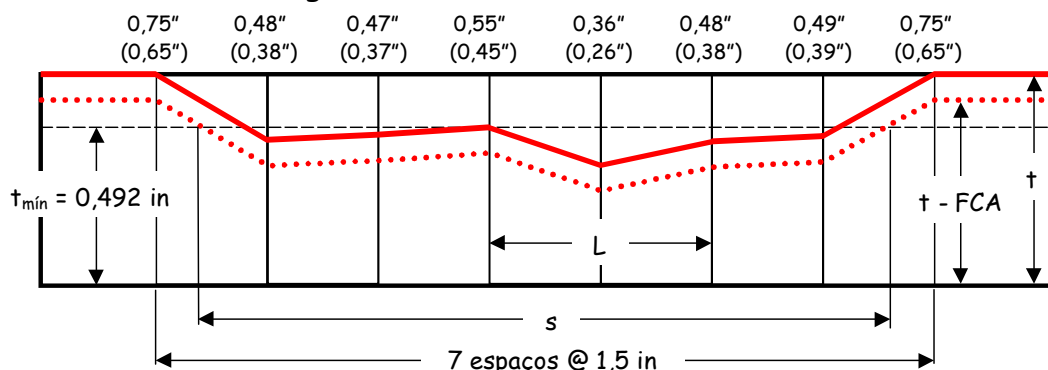
$$R_t = (t_{\min} - FCA) / t_{\min} = (0,36 - 0,10) / 0,492 = 0,528$$

Cálculo do valor do comprimento máximo admissível da região de perda de espessura, L.

$$Q = 1,123 \cdot \left[ \left( \frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} = 1,123 \cdot \left[ \left( \frac{1 - 0,528}{1 - 0,528 / 0,90} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} = 0,62 \quad p / R_t < RSF_a$$

$$L = Q \cdot [D \cdot t_{\min}]^{1/2} = 0,62 \times [48 \times 0,492]^{1/2} = 3,0 \text{ in}$$

Perfil Crítico de Corrosão Longitudinal



$$s = 5 \times 1,5 + [(0,492 - 0,38) / (0,65 - 0,38)] \times 1,5 + [(0,492 - 0,39) / (0,65 - 0,39)] \times 1,5 = 8,71 \text{ in}$$

O perfil crítico de corrosão circunferencial não necessita ser analisado, desde que :

$$t_{\min}^C > t_{\min}$$

$$\text{Como } s > L : t_{am} = t_{am}^s = (0,55 + 0,36 + 0,48) / 3 = 0,463 \text{ in}$$

$$t_{am} - FCA = 0,463 - 0,10 = 0,363 < t_{\min}^L \dots\dots\dots \text{Não !}$$

$$t_{mm} - FCA = 0,36 - 0,10 = 0,26 \text{ in} > \text{máx}[0,5 \cdot t_{\min}, 0,10"] = 0,246 \text{ in} \dots\dots\dots \text{Ok!}$$

Como a região não é aceitável, conforme Nível 1 de avaliação, a pressão interna no equipamento deve ser reduzida, a região reparada, ou através de inspeção complementar, a eficiência de junta deverá ser aumentada.

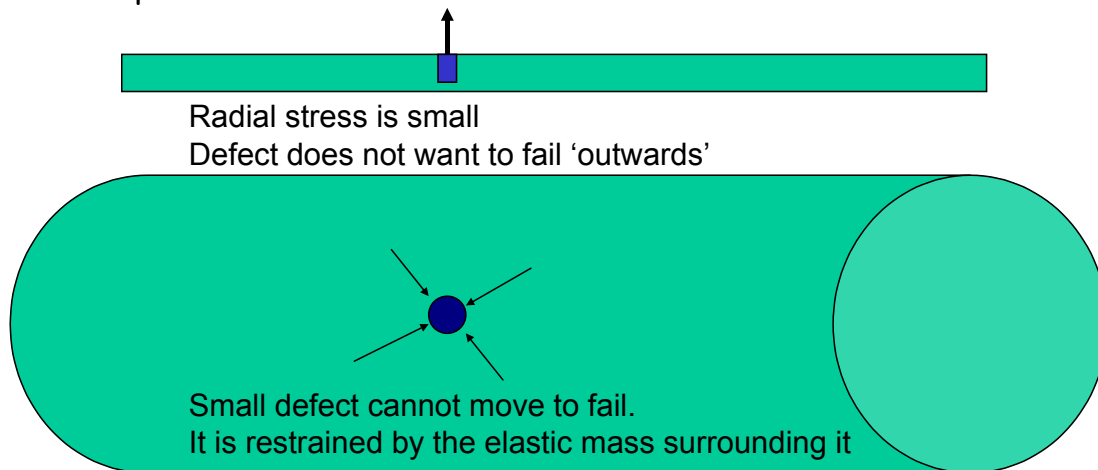
A pressão reduzida é definida como a seguir.

$$PMA = t \cdot S \cdot E / (R + 0,6 \cdot t) = 0,38 \times 17.500,0 \times 0,85 / ((24,0 + 0,10) + 0,6 \times 0,38) = 207 \text{ psig.}$$

## 4 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE PITES

### 4.1 - API - RP 579 / Recommended Practice for Fitness-for-Service

Um único pite não pode ser responsável pela ruptura do componente, desde que o material ao redor em regime elástico compensa localmente a ausência de material impedindo a falha de grandes proporções. Nesse caso, a falha esperada está relacionada a vazamento do pite.



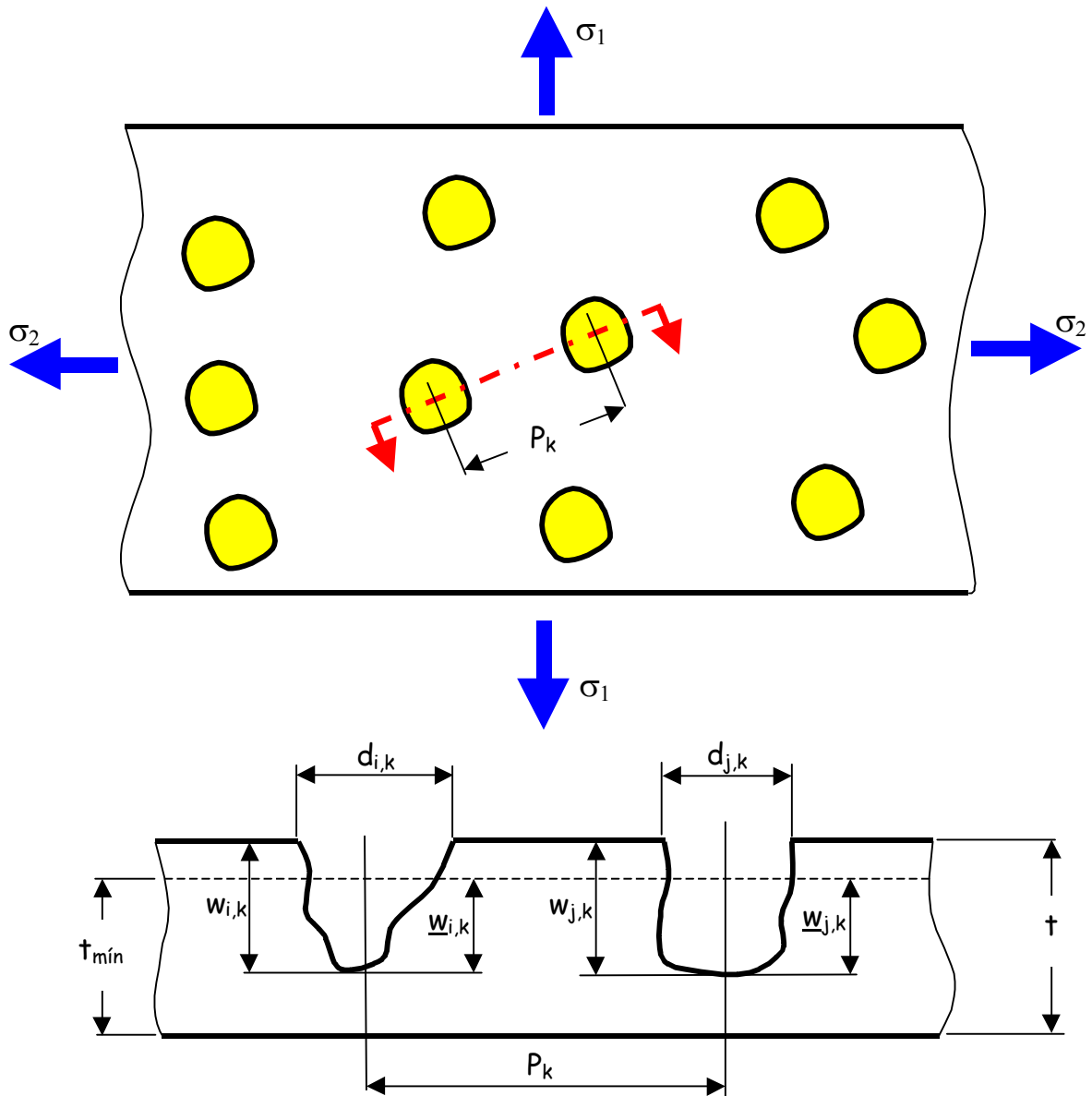
A presença de diversos pites próximos pode enfraquecer o componente alterando sua capacidade de resistir a tensões primárias. Os procedimentos de avaliação tem como objetivo identificar a influência de colônias de pites no material.

Sobrecargas no componente, tais como um teste hidrostático, podem ser insuficientes para identificar regiões com pites e a falha por vazamento poderá ocorrer logo após o teste, durante operação normal do equipamento.

O nível 1 do API RP 579 (Capítulo 6) trata de avaliar a presença de pites em componentes. O procedimento avalia pares de pites próximos. Para caracterizar um par de pites são necessárias as seguintes informações :

- diâmetro de cada pite;
- profundidade de cada pite;
- distância entre os pites.

Para avaliar uma região com pites, um número representativo de pares devem ser utilizados. Se a distribuição de pites é uniforme, um número mínimo de 10 pares é recomendado. Se a distribuição é não uniforme, um número adicional pode ser necessário.



### Parâmetros para análise de pites

Os parâmetros a seguir devem ser registrados, para cada par de pites :

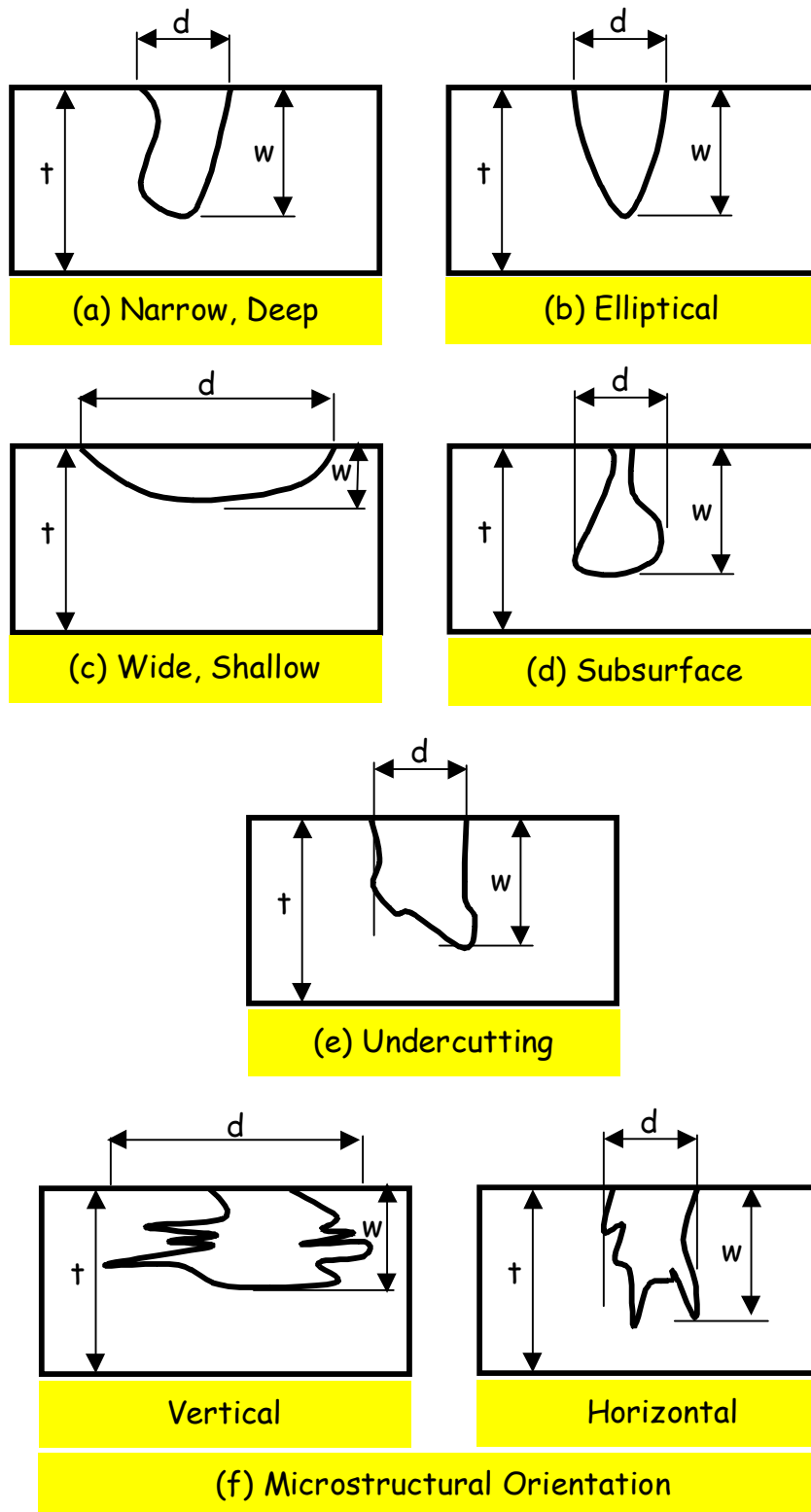
$d_{i,k}$  - diâmetro do pite "i" no par "k";

$d_{j,k}$  - diâmetro do pite "j" no par "k";

$P_k$  - distância entre os pites do mesmo par "k";

$w_{i,k}$  - profundidade do pite "i" no par "k";

$w_{j,k}$  - profundidade do pite "j" no par "k".



*Diferentes geometrias de pites*

Os seguintes passos devem ser seguidos para a avaliação Nível 1.

**Passo 1** : Determine a espessura mínima requerida do componente,  $t_{\min}$ , baseado nas condições de avaliação (pressão e temperatura). Os valores a serem utilizados podem estar representando uma condição de projeto, máxima de operação ou uma condição de alívio do equipamento. Esta definição deverá estar claramente indicada na avaliação realizada no equipamento.

**Passo 2** : Determine a profundidade de cada pite, abaixo da espessura mínima requerida  $t_{\min}$ , como abaixo.

$$\underline{w}_{i,k} = w_{i,k} - (t - FCA - t_{\min})$$

$$\underline{w}_{j,k} = w_{j,k} - (t - FCA - t_{\min})$$

**Passo 3** : Determine a profundidade média de cada par de pites.

$$\underline{w}_{\text{avg},k} = (\underline{w}_{i,k} + \underline{w}_{j,k}) / 2$$

**Passo 4** : Determine a profundidade média, considerando todos os "n" pares de pites.

$$\underline{w}_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \underline{w}_{\text{avg},k}$$

**Passo 5** : Determine o diâmetro médio de cada par de pites.

$$d_{\text{avg},k} = (d_{i,k} + d_{j,k}) / 2$$

**Passo 6** : Determine o diâmetro médio, considerando todos os "n" pares de pites.

$$d_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n d_{\text{avg},k}$$

**Passo 7** : Determine a distância média entre pites.

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n P_k$$

**Passo 8** : Calcular o valor de RSF. Se  $\underline{w}_{\text{avg}} \leq 0,0$ , RSF = 1,0 e o Nível 1 está satisfeito e o Passo 11 deverá ser verificado.

$$\text{RSF} = \min \left[ \left\{ 1,0 - \frac{\underline{w}_{\text{avg}}}{t_{\min}} + \frac{E_{\text{avg}} \cdot (t - FCA + \underline{w}_{\text{avg}} - t_{\min})}{t_{\min}} \right\}, 1,0 \right]$$

$$\text{Onde : } E_{\text{avg}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \mu_{\text{avg}} \quad \mu_{\text{avg}} = \frac{P_{\text{avg}} - d_{\text{avg}}}{P_{\text{avg}}}$$

**Passo 9** : Se a região de pites abrange uma região significativa do componente.

**CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO :**

Se  $RSF \geq RSF_a$  , a região é aceitável;

Se  $RSF < RSF_a$  , o componente deve ser reparado ou a pressão interna reduzida.

**Passo 10** : Se a região de pites é localizada, avaliar como uma perda de espessura localizada com dimensões limites "s" e "c" avaliadas pela extensão do dano e com a espessura mínima corrigida como a seguir.

$$t_{eq} = RSF \cdot t_{mín}$$

**Passo 11** : Se um pite isolado não atender aos requisitos a seguir, o mesmo deverá ser avaliado como uma perda localizada de espessura.

$$d \leq Q \cdot [D \cdot t_{mín}]^{1/2}$$

$$R_t \geq 0,20$$

Onde :  
 d - diâmetro do pite analisado;  
 D - diâmetro do componente;  
 $t_{mín}$  - espessura mínima requerida do componente;  
 Q - fator definido pelas expressões abaixo.

$$Q = 1,123 \cdot \left[ \left( \frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad \text{para } R_t < RSF_a$$

$$Q = 50,0 \quad \text{para } R_t \geq RSF_a$$

$$R_t = (t_{mm} - \underline{w} - FCA) / t_{mín}$$

Onde :  
 $t_{mm}$  - espessura mínima medida no pite;  
 FCA - corrosão futura no componente.

**Exemplo 1** - Uma região de pites foi detectada em um costado cilíndrico, afetando uma parte significativa do componente. Determine se o vaso está apto para operação normal.

Condições de projeto : 500 psi @ 450°F

Diâmetro interno = 60,0 in

Espessura de parede = 1 1/8 in

Perda uniforme de espessura = 0,03 in

Corrosão futura = 0,05 in

Material : SA 516 Gr.70

Eficiência de junta soldada : 0,85

Nº Par	$P_k$ [in]	$d_{i,k}$ [in]	$w_{i,k}$ [in]	$d_{j,k}$ [in]	$w_{j,k}$ [in]
1	3,5	0,5	0,5	0,6	0,4
2	4,2	1,6	0,6	1,8	0,65
3	2,7	0,9	0,5	0,9	0,75
4	2,1	1,0	0,7	1,2	0,6
5	4,6	0,7	0,6	1,2	0,5
6	3,1	1,1	0,5	2,2	0,45
7	2,9	0,8	0,65	0,5	0,6
8	3,1	0,5	0,4	1,0	0,75
9	2,6	1,3	0,5	0,8	0,2
10	2,2	0,4	0,55	0,3	0,75
11	1,8	1,5	0,4	0,8	0,5
12	2,5	0,6	0,75	0,5	0,7
13	3,8	2,4	0,5	1,6	0,75
14	1,9	0,4	0,25	0,8	0,5
15	1,8	1,0	0,7	0,8	0,5
16	1,0	0,6	0,75	0,2	0,7
17	2,5	0,9	0,3	1,2	0,4
18	1,5	0,6	0,5	0,6	0,7
19	1,3	0,8	0,4	0,5	0,7

Espessura mínima requerida :

$$t_{\min}^C = P.R/(S.E - 0,6.P) = 500 \times (30,0 + 0,03 + 0,05) / (17.500,0 \times 0,85 - 0,6 \times 500) = 1,032 \text{ in}$$

$$t_{\min}^L = P.R/(2.S.E + 0,4.P) = 500 \times (30,0 + 0,03 + 0,05) / (2 \times 17.500,0 \times 0,85 + 0,4 \times 500) = 0,501 \text{ in}$$

$$t_{\min} = \max[1,032 ; 0,501] = 1,032 \text{ in}$$



$$\underline{w}_{1,1} = 0,50 - (1,095 - 0,05 - 1,032) = 0,487 \text{ in}$$

$$\underline{w}_{2,1} = 0,40 - (1,095 - 0,05 - 1,032) = 0,387 \text{ in}$$

$$\underline{w}_{\text{avg},1} = (0,487 + 0,387) / 2 = 0,437 \text{ in}$$

A profundidade média, considerando todos os pares de pites :  $\underline{w}_{\text{avg}} = 0,5435 \text{ in}$

O diâmetro médio e a distância média, considerando todos os pares de pites :

$$d_{\text{avg}} = 0,9237 \text{ in}$$

$$P_{\text{avg}} = 2,5842 \text{ in}$$

$$\mu_{\text{avg}} = \frac{P_{\text{avg}} - d_{\text{avg}}}{P_{\text{avg}}} = (2,5842 - 0,9237) / 2,5842 = 0,6426$$

$$E_{\text{avg}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \mu_{\text{avg}} = 0,5565$$

$$\begin{aligned} \text{RSF} &= \min \left[ \left\{ 1,0 - \frac{\underline{w}_{\text{avg}}}{t_{\text{min}}} + \frac{E_{\text{avg}} \cdot (t - \text{FCA} + \underline{w}_{\text{avg}} - t_{\text{min}})}{t_{\text{min}}} \right\}, 1,0 \right] = \\ &= \min \left[ \left\{ 1,0 - \frac{0,5435}{1,032} + \frac{0,5565 \times (1,095 - 0,05 + 0,5435 - 1,032)}{1,032} \right\}, 1,0 \right] = 0,7734 \end{aligned}$$

Como  $\text{RSF} < \text{RSF}_a$ , o componente não é aceitável.

A pressão reduzida pode ser determinada como a seguir.

$$\text{PMA}_R = \text{PMA} \cdot \text{RSF} / \text{RSF}_a = 500 \times 0,7734 / 0,90 = 430 \text{ psig.}$$