

2

Fundamentos para a avaliação de integridade de dutos com perdas de espessura e reparados com materiais compósitos

Este capítulo apresenta um resumo dos fundamentos básicos de avaliação de dutos com e sem defeitos apresentando seus critérios de falha, bem como os critérios mais utilizados na determinação da falha de materiais compósitos.

2.1.

Análise de tensões

A análise de tensões é feita em equipamentos a fim de determinar para seus pontos críticos tensões principais que permitam estabelecer, por meio de critérios de resistência, se o componente pode falhar ou não. As tensões podem ser determinadas por meio da Teoria de Elasticidade, da Resistência dos Materiais, da Análise Experimental de Tensões e por métodos numéricos, como por exemplo, pelo Método de Elementos Finitos.

Em dutos com pressão interna as tensões principais coincidem com a direção radial, longitudinal e circunferencial, sendo a tensão radial no raio externo igual a zero, e $-P$ no raio interno.

As tensões circunferenciais e longitudinais para dutos de parede fina ($D/t > 20$) com tampas são:

$$\sigma_c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \qquad \sigma_l = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} \qquad (2.1.1)$$

onde D e t são respectivamente o diâmetro externo e a espessura do duto. Para dutos com restrições de deslocamentos longitudinais, por exemplo, dutos enterrados, tem-se que:

$$\sigma_l = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \mu \qquad (2.1.2)$$

onde μ é o coeficiente de Poisson.

Para dutos com parede espessa, tem-se que:

$$\sigma_r = \frac{P \cdot a^2 \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.1.3)$$

$$\sigma_c = \frac{P \cdot a^2 \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.1.4)$$

onde a = raio interno, b = raio externo e r = variável que vai de a até b .

2.2. Critérios de resistência

Existem dois critérios de resistência amplamente aplicáveis a materiais dúcteis, que têm sido comprovados por meio de testes e em condições de uso. Estes critérios são o de Tresca ou da máxima tensão cisalhante e o critério de von Mises ou da máxima energia de distorção. Estes critérios podem ser aplicados para casos onde os modos de falha consideram escoamento ou ruptura [24].

O critério de Tresca estabelece que o escoamento do material é produzido quando a tensão cisalhante máxima de um elemento é igual ou maior do que a tensão cisalhante máxima atuante no ensaio de tração no momento de escoamento. A tensão equivalente de Tresca σ_{Tresca} , dada abaixo representa um estado uniaxial equivalente ao estado triaxial no momento do escoamento.

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = S_y \quad (2.2.1)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material e $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ são as tensões principais no ponto examinado.

O critério de von Mises, ou da máxima energia de distorção, diz que ocorre escoamento se a energia de distorção de um elemento em um estado triaxial de tensões for igual ou maior que a energia de distorção que atua nos pontos do corpo de prova do ensaio de tração no instante do escoamento [24].

$$\sigma_{eq} = S_y = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)} \quad (2.2.2)$$

2.3.

Tensões em dutos sem defeito

O cálculo da pressão de projeto para dutos sem defeito segundo a norma ASME B31.4 [25] é realizado pelo critério de Tresca. Em dutos de paredes finas a tensão radial ($\sigma_r = -P$) é desprezada por ser pequena em comparação com a tensão circunferencial. A tensão equivalente de Tresca fica reduzida à tensão circunferencial:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = S_y \cdot fator \quad (2.3.1)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material e "*fator*" leva em consideração um agrupamento de parâmetros de projeto, tais como localização do duto, tipo de união longitudinal soldada para construções dos tubos e temperatura de operação.

2.4.

Tensões e critérios de resistência de dutos com defeitos longitudinais

O critério de Tresca também é usado em dutos com defeitos na determinação do estado de tensão crítico que possa levar um componente ao colapso plástico. O critério de Tresca é utilizado junto com um fator de concentração de tensão $1/C$ que envolve a geometria do defeito:

$$\sigma_{Tresca} = \frac{P_{defeito} \cdot D}{2 \cdot t} \cdot \frac{1}{C} = S_{flow} \quad (2.4.1)$$

onde S_{flow} é a resistência ao colapso plástico, valor compreendido entre o limite de escoamento e a resistência à ruptura do material.

A equação anterior pode ser reescrita em função da $P_{defeito}$, isto é, a pressão que causa o colapso plástico na seção do defeito, como segue:

$$P_{defeito} = \frac{2 \cdot t}{D} \cdot C \cdot S_{flow} \quad (2.4.2)$$

o parâmetro C tem a seguinte forma:

$$C = \left[\frac{1 - \frac{A}{A_o}}{1 - \frac{A}{A_o \cdot M}} \right] \quad (2.4.3)$$

onde A é o parâmetro relacionado com a região de perda metálica, por exemplo, a área longitudinal de material perdido, A_o é o parâmetro relacionado com a região de material inicialmente íntegro, onde houve a perda metálica, por exemplo, área longitudinal da seção com defeito e M é o fator de dilatação ou "bulging factor" ou fator de Folias [26].

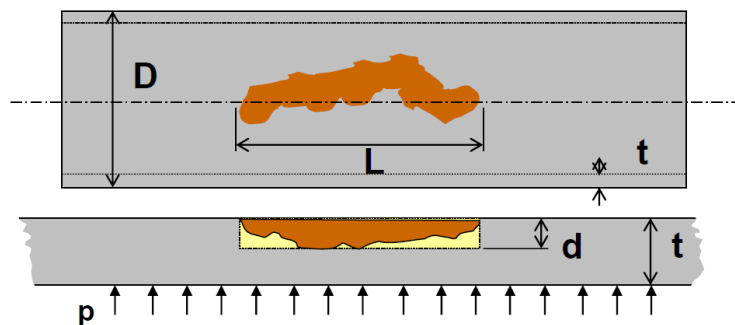


Figura 2.1 - Geometria de um defeito longitudinal para avaliação [24].

A Figura 2.1 apresenta o tipo de geometria avaliada na equação (2.4.2) para defeitos de corrosão com orientação longitudinal.

As equações mais utilizadas no cálculo de pressão de falha em dutos com defeitos de corrosão são encontradas na Tabela 2.1. Estas equações semi-empíricas foram desenvolvidas pelos conhecimentos da mecânica da fratura e ajustes experimentais. Na Tabela 2.1 e Figura 2.1 L é o comprimento e d é a máxima profundidade do defeito.

Na Tabela 2.1 está incluído o fator de projeto para calcular a pressão de operação para um duto com defeito, onde F é um fator relacionado com a classe de localização, E é um fator relacionado com a classe do tubo e T um fator

relacionado com a temperatura de operação, assim como são dados as referências e normas [27] [26].

Método	S_{flow}	Formato do defeito	A/A_0	M	Fator de projeto
Resistência dos Materiais (procedimento baseado na boa prática)	$\min\left\{\frac{S_y + S_u}{2}, 1.2 \times S_y\right\}$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	∞	F.E.T
ASME B31.G	$1.1 \times SMYS$	Aproximação parabólica $L^2 \leq 20.D.t$	$\frac{2.d}{3.t}$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{D.t}}\right)^2}$	F.E.T
		Retangular longo $L^2 > 20.D.t$	$\frac{d}{t}$	∞	
Área real	$SMYS + 70 \text{ MPa}$	Área do defeito	$\frac{A}{A_0}$ $A_0 = L.t$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{D.t}}\right)^2}$	F.E.T
B31.G modificado (Arco e Kiefner)	$SMYS + 70 \text{ MPa}$	Área do defeito com aproximação retangular média	$0.85 \times \frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{D.t} - 0.003375 \left(\frac{L^2}{D.t}\right)^2}$	F.E.T
DNV-RP-F101	S_y ou $SMYS$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{D.t}}$	$(D/D-t) \times 0.9 \times$ F.E.T

Tabela 2.1 - Métodos para a determinação de pressão em dutos com perda de espessuras metálica acentuada na direção longitudinal [24, 26, 27].

2.5.

Critérios de aceitação para a avaliação de componentes estruturais

A norma API 579-1/ ASME FFS-1 [28] trata de critérios de aceitação para componentes tais como vasos de pressão, tanques e tubulações. No desenvolvimento de seus critérios de aceitação, a API 579 usa um dos três caminhos descritos a seguir: tensão admissível, diagramas FAD, fatores de resistência remanescente, RSF.

2.5.1.

Tensão admissível

Este caminho consiste em fazer uma análise de tensões levando em consideração todos os carregamentos atuantes no componente e determinando as tensões nas seções críticas. São comparadas estas tensões com as tensões admissíveis do material que são determinadas tendo como base as normas de projeto e que levam em consideração a tensão de escoamento ou a tensão de ruptura reduzidas por fatores de uso e fatores de segurança.

2.5.2. FAD-Diagrama para avaliação de falha

Este caminho é usado para tratar componentes com defeitos tipo trinca. São usadas duas avaliações limites: falha frágil a partir do que ocorre na ponta ou raiz da trinca (caso típico de um material frágil) ou colapso plástico, considerando o esgotamento de plasticidade da seção reduzida (caso típico de um material que possui grande tenacidade à fratura).

2.5.3. RSF - Fator de resistência remanescente

Este caminho é usado para componentes com defeitos tipo perda metálica localizada que está sujeita a falhas dúcteis. O fator de resistência remanescente é definido como a razão entre as resistências às falhas determinadas para o elemento com defeito e o elemento sem defeito, tem-se que:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad 2.5.3.1$$

onde L_{DC} é a carga limite ou de colapso plástico do componente com defeito e L_{UC} é a carga limite ou de colapso plástico do componente sem defeito.

Os valores de L_{DC} e L_{UC} podem ser estabelecidos por meio de análises elasto - plásticas, usando métodos numéricos ou por meio de ensaios.

Após calculado, o RSF é comparado com o fator RSFa (admissível). Se o RSF calculado for maior que o RSFa o componente pode continuar operando. Se o RSF calculado for menor que o RSFa o componente pode ser reparado ou aplica-se uma solução que reduza a severidade da operação, por exemplo diminuindo-se a pressão de operação. As equações abaixo resumem a determinação de pressão de operação de um componente com defeito.

$$MAWP_r = MAWP \cdot \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad se \quad RSF < RSF_a \quad 2.5.3.2$$

$$MAWP_r = MAWP \quad se \quad RSF \geq RSF_a \quad 2.5.3.3$$

Onde $MAWP$ é a máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código de projeto, $MAWP_r$ é a máxima pressão de operação admissível para o componente com defeito e RSF_a é o valor admissível para o RSF, geralmente igual a 0.90 [28].

2.6.

Critérios de falha para materiais compósitos

Existem muitos critérios para prever o dano de materiais compósitos, a maioria deles assumindo homogeneidade e um comportamento linear da curva tensão - deformação até a ruptura. Algumas das teorias mais conhecidas e utilizadas são descritas a seguir.

2.6.1.

Critério da máxima tensão

O critério da máxima tensão prevê que a falha ocorre quando uma tensão ao longo de um dos eixos principais do material é igual ou maior que a resistência experimental correspondente. A falha ocorre quando alguma ou várias das seguintes condições é cumprida [29]:

$$\sigma_1 \geq \sigma_1^t \rightarrow \text{se } \sigma_1 > 0 \quad \text{ou} \quad \sigma_1 \leq \sigma_1^c \rightarrow \text{se } \sigma_1 \leq 0 \quad (2.6.1.1)$$

$$\sigma_2 \geq \sigma_2^t \rightarrow \text{se } \sigma_2 > 0 \quad \text{ou} \quad \sigma_2 \leq \sigma_2^c \rightarrow \text{se } \sigma_2 \leq 0 \quad (2.6.1.2)$$

$$|\tau_{12}| \geq \tau_{12}^u \quad (2.6.1.3)$$

onde σ_1 e σ_2 são as tensões nos pontos de interesse, σ_1^t e σ_1^c são a resistência à tração e compressão na direção longitudinal, σ_2^t e σ_2^c são a resistência à tração e compressão na direção transversal, τ_{12} , é a tensão de cisalhamento e τ_{12}^u , a resistência ao cisalhamento, quando as tensões principais coincidem com as direções 1 e 2 da manta o $\tau_{12} = 0$ (ver Figura 2.2).

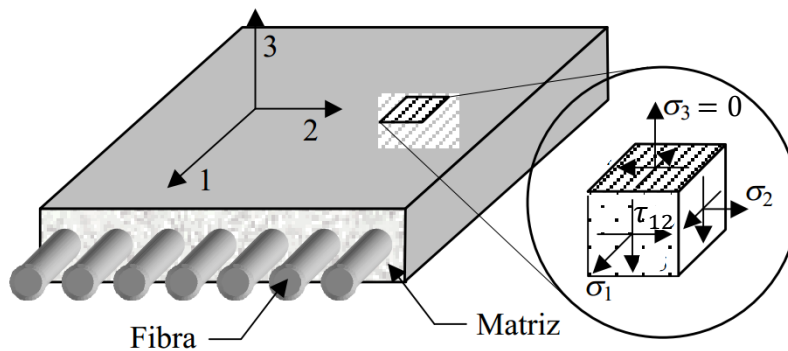


Figura 2.2-Manta unidirecional eixos principais 1 (longitudinal), 2 (transversal) e 3 (normal ao plano da lamina).

Esta teoria tem a vantagem de fornecer informação sobre o modo de falha que ocorre no elemento. Uma desvantagem do critério é que não leva em consideração a interação entre as tensões [30].

2.6.2. Critério da máxima deformação

O critério da máxima deformação prevê que a falha ocorre quando algum componente de deformação ao longo de um dos eixos principais do material é igual ou maior que o valor experimental de deformação correspondente que produz a falha.

Isto acontece quando, pelo menos, uma das seguintes equações é cumprida [29]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &\geq \varepsilon_{1t}^u \rightarrow \text{se } \varepsilon_1 > 0 & \text{ou} & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c}^u \rightarrow \text{se } \varepsilon_1 \leq 0 \\ \varepsilon_2 &\geq \varepsilon_{2t}^u \rightarrow \text{se } \varepsilon_2 > 0 & \text{ou} & \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{2c}^u \rightarrow \text{se } \varepsilon_2 \leq 0 \\ &|\gamma_{12}| &\geq \gamma_{12}^u & \end{aligned}$$

onde $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ são as deformações no ponto de interesse e $\varepsilon_{1t}^u, \varepsilon_{2t}^u, \gamma_{12}^u$ são as deformações de falha. O subscrito "c" indica compressão e o "t" indica tração. A numeração indica as direções como foi descrito na Figura 2.2.

A vantagem e desvantagem deste critério são similares ao critério de tensão máxima, mas devido a que as relações entre tensões e deformações envolvem a relação de Poisson este critério leva em consideração a interação entre tensões em um pequeno grau [30].

2.6.3. Teoria de Tsai-Hill

A teoria de Tsai-Hill é um critério similar ao de von Mises. Ele foi proposto para ajustar dados experimentais de materiais ortotrópicos. De acordo com a teoria para um estado de tensão plano, a falha ocorre se [29]:

$$\frac{(\sigma_1)^2}{(\sigma_1^u)^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{(\sigma_1^u)^2} + \frac{(\sigma_2)^2}{(\sigma_2^u)^2} + \frac{(\tau_{12})^2}{(\tau_{12}^u)^2} = 1$$

onde $\sigma_1^u = \sigma_1^t = \sigma_1^c$ e $\sigma_2^u = \sigma_2^t = \sigma_2^c$.

Os valores de σ_1^t, σ_1^c ou σ_2^t, σ_2^c podem ser usados dependendo do sinal de σ_1 e σ_2 [29]. O critério tem a vantagem de considerar todas as tensões no cálculo, envolvendo qualquer estado de tensão.

2.7. Critérios para determinar espessuras de reparos em dutos com perda de espessura externa

As normas ASME PCC-2 [16] e ISO/TS 24817 [5] apresentam equações para determinar espessuras de reparos em dutos retos com perda de espessura externa, utilizando materiais compósitos.

As normas apresentam equações podendo levar ou não levar em consideração a espessura remanescente do tubo. A seguir são apresentadas as equações (2.7.1) e (2.7.2) que determinam a espessura mínima de reparo onde leva em consideração a espessura remanescente do tubo e a espessura de reparo é determinada com base na deformação ou a tensão.

1. Para uma tensão circunferencial produzida por uma pressão interna, a espessura mínima de reparo pode ser calculada como [5, 16]:

$$t_{min} = \frac{D}{2s} \left(\frac{E_s}{E_c} \right) (P - P_s) \quad (2.7.1)$$

onde D é o diâmetro externo do tubo s é a tensão admissível do tubo, E_s o módulo de elasticidade do aço, E_c é o módulo de elasticidade do compósito na

direção circunferencial, P pressão interna de desenho, P_s é o MAWP para o tubo com defeito determinado pela norma API 579 [28] ou equivalente.

2. Para uma deformação circunferencial produzida por uma pressão interna e reparado em situação na qual a pressão interna é igual a zero, a espessura mínima de reparo pode ser calculada como [5, 16]:

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_c E_c} \left(\frac{PD}{2} - st_s \right) \quad (2.7.2)$$

onde a ε_c é a deformação circunferencial admissível do material compósito e t_s é a espessura remanescente do tubo.

A norma ISO/TS 24817 [5] valida esta ultima equação para espessuras de reparos não maiores a um sexto do diâmetro do tubo ($t_{min} < D/6$).

Estas equações são utilizadas assumindo que o material compósito é elástico e não existem deslocamentos entre as superfícies de contato.

Para uso da equação (2.7.1) é recomendável que a tensão máxima no compósito não seja superior a um valor limite expresso para este material em que a deformação circunferencial admissível ε_c seja obedecida. Valores para ε_c aplicáveis às equações (2.7.1) e (2.7.2) são dadas na norma ISO/TS 24817 [5] e um resumo destes valores para serviço é fornecido na Tabela 2.2 abaixo.

Módulos	Deformação admissível classe 1 %			Deformação admissível classe 2 %			Deformação admissível classe 3 %		
Vida do reparo (anos)	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Para $E_a > 0,5 E_c$									
ε_{co}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
ε_{ao}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
Para $E_a < 0,5 E_c$									
ε_{co}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
ε_{ao}	0,25	0,16	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 2.2 - Deformações admissíveis para mantas de compósitos em função do tempo de vida do reparo.

Onde E_a é o módulo de elasticidade do reparo na direção longitudinal, E_c é módulo de elasticidade do reparo na direção circunferencial, ε_{co} é a deformação circunferencial admissível para o reparo, ε_{ao} é a deformação longitudinal admissível para o reparo.

A classe 1 é designada para reparos em dutos sob pressões inferiores a 1 MPa e temperaturas inferiores a 40 °C.

A classe 2 é designada para reparos em dutos sob pressões inferiores a 2 MPa e temperaturas inferiores a 100 °C.

A classe 3 é designada para reparos em dutos utilizados para todo tipo de fluidos e temperaturas e pressões limites de operação qualificadas.