

2

Fundamentos para a Avaliação de Integridade de Dutos

Este capítulo apresenta conceitos básicos da integridade estrutural em dutos e faz o resumo da pesquisa bibliográfica na qual se sustenta parte do estudo feito nesta dissertação. São também apresentados os critérios da Tensão Admissível e o Fator de Resistência Remanescente para avaliar a integridade estrutural de um duto com reparo e critérios para o uso e seleção dos adesivos, assim como o estudo do comportamento das juntas coladas, analisando-se a distribuição das tensões nelas existentes e a forma de ruptura destas juntas.

2.1

Integridade Estrutural em Dutos

Nos dutos em operação, as tensões atuantes são originadas por distintas solicitações ou carregamentos. A análise das tensões é feita através da aplicação de critérios de resistência, que tornam possível comparar um estado triaxial de tensões com o limite de resistência do material, obtido no ensaio de tração uniaxial.

O estado triaxial de tensões em um corpo em equilíbrio é representado pelo paralelepípedo elementar mostrado na figura 2.1.a. As componentes perpendiculares aos planos do paralelepípedo são as tensões normais (σ_{ii}), e as componentes tangenciais, são as tensões cisalhantes (σ_{ij}). Os planos principais são definidos como aqueles onde a componente cisalhante é nula, e as tensões

normais ali atuantes são chamadas tensões principais, como mostrado na figura 2.1.b.

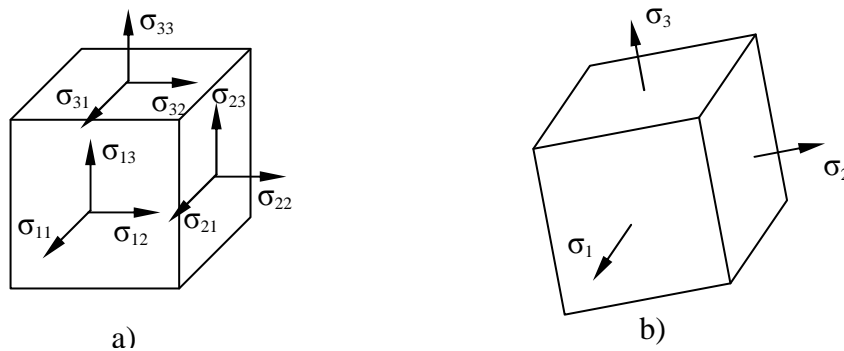


Figura 2.1. Paralelepípedo elementar representativo de um estado de tensão.

No caso de um duto (sem carregamento de torção), as direções dos planos principais são facilmente identificadas, já que estes coincidem com a direção circunferencial, longitudinal e radial do tubo. Em algumas aplicações, as tensões radiais podem se aproximar de zero, então, reduzindo-se a um estado biaxial de tensões.

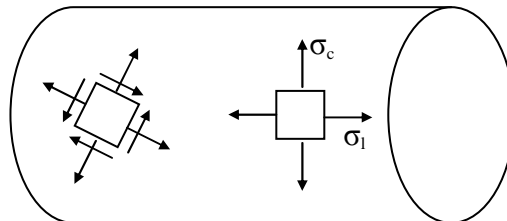


Figura 2.2. Estado de tensões num tubo sem carregamento de torção e pressão interna.

2.1.1

Critérios de Resistência

Dois critérios de resistência para materiais dúcteis são os de Tresca (máxima tensão cisalhante) e o de von Mises (máxima energia de distorção), cujas eficiências são comprovadas através de testes e dos sucessos dos projetos ao longo

da história. Estes critérios podem ser aplicados tanto para o escoamento como para a ruptura dúctil [4].

O critério de Tresca, ou da máxima tensão cisalhante, diz que acontece o escoamento quando no ponto mais solicitado do material a tensão cisalhante máxima atinge um valor crítico.

Considerando um estado de tensões neste ponto representado pelas tensões principais, existem três tensões cisalhantes máximas que assumem valores iguais às metades das diferenças das tensões principais. Chamando-se $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, a maior tensão cisalhante máxima será $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. O valor crítico é representado pela tensão cisalhante máxima obtida do ensaio a tração uniaxial ($\sigma_{tração}/2$) onde $\sigma_1 > 0$ e σ_2 e σ_3 são nulas [5]. No escoamento, $\sigma_{tração} = S_y$ e o critério de Tresca pode então ser representado por:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = S_y \quad (2.1)$$

Esta formulação simples facilita seu emprego em soluções analíticas de problemas elasto-plásticos; mas ignora a influência de uma das tensões principais o que, em alguns casos, tira a exatidão do método.

O critério de von Mises ou da máxima energia de distorção apresenta valores melhores na caracterização do escoamento, sendo menos conservativo que o critério de Tresca [4]. Segundo este critério, acontece o escoamento no ponto mais solicitado em um componente qualquer – estado triaxial de tensões, quando a sua energia elástica de distorção por unidade de volume for igual a energia de distorção que atua no corpo de prova num teste uniaxial de tração no instante do escoamento [6], isto é, quando $\sigma_{tração} = S_y$.

$$U_d = \frac{1 + \mu}{3.E} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} = \frac{1 + \mu}{3.E} \cdot \frac{\sigma_{tração}^2}{2}$$

Então:

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = S_y \quad (2.2)$$

2.1.2

Tensões em Dutos sem Defeito

Segundo a norma ASME B31.4 [7], o cálculo da pressão de projeto para dutos sem defeito é realizado utilizando-se o critério da Tresca [4]. Para um tubo de paredes finas, considera-se σ_1 como a tensão circunferencial (σ_c) e σ_3 como a tensão radial ou pressão interna ($\sigma_r = -P$) a qual pode ser desprezada por ser pequena em relação σ_c . Tem-se então que:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = S_y \cdot \text{fator} ; \quad (2.3)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material.

A recomendação API 5L [8] e a norma B31.4 usam $S_y = SMYS$ (resistência mínima ao escoamento especificada para o material). O *fator* usado na equação (2.3) descompõe-se em três parcelas: (i) fator de projeto, (ii) eficiência da junção por solda e (iii) temperatura de trabalho (F, E e T respectivamente)

$$P_d = \frac{2 \cdot t \cdot SMYS}{D} \cdot F \cdot E \cdot T ; \quad (2.4)$$

onde F é 0.72, E é tirado da tabela A.1 (Apêndice A) e T é igual a 1.

A máxima pressão de operação admissível (MAOP) não poderá ser maior que P_d ; e só poderá ser usada quando for feito um teste hidrostático onde a pressão de

teste máxima deve ser mantida igual a 1.25 x MAOP por pelo menos quatro horas [4].

$$MAOP = \min \left(P_d ; \frac{P_{hidrostática(4horas)}}{1.25} \right)$$

2.1.3

Tensões em Dutos com Defeitos de Corrosão

Nesta seção apresentam-se os principais métodos para avaliação de defeitos de corrosão com orientação longitudinal e carregamento por pressão interna. Estas equações semi-empíricas foram desenvolvidas pelos conhecimentos da mecânica da fratura e ajustadas experimentalmente [9].

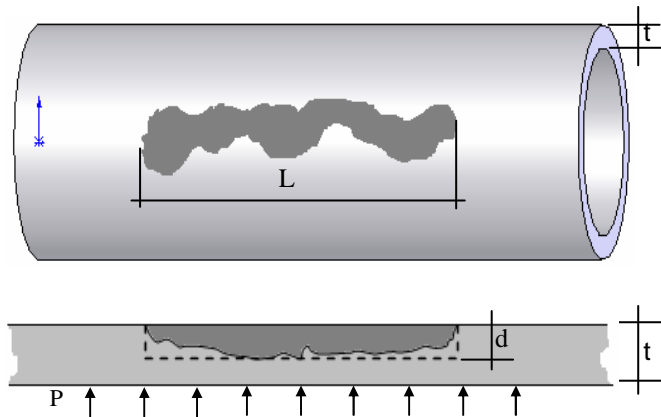


Figura 2.3 – Idealização da geometria de um defeito para a avaliação.

Usando-se o critério de Tresca e um fator de concentração de tensão $1/C$ que envolve a geometria do defeito, pode-se relacionar a pressão que faz um duto falhar com a resistência à falha por colapso plástico da seguinte forma:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_C = \frac{P_{defeito} \cdot D}{2 \cdot t} \cdot \frac{1}{C} = S_{flow}$$

onde resistência ao colapso plástico é dada por S_{flow} , e tem um valor compreendido entre o limite de escoamento e a resistência à ruptura do material (ou limite à tração). Então:

$$P_{defeito} = \frac{2 \cdot t}{D} \cdot S_{flow} \cdot C \quad (2.5)$$

O parâmetro C tem a seguinte forma:
$$C = \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

A : Área longitudinal de material perdido

A_0 : Área longitudinal da seção com defeito

M : Fator de dilatação

Pode-se dividir a equação (2.5) em três parcelas. A primeira depende da geometria original do duto, a segunda depende da resistência considerada para o colapso plástico do material e a terceira da geometria do defeito.

As equações mais conhecidas para o cálculo da pressão de falha num duto com defeito de corrosão tem o mesmo formato da equação anterior com a diferença de alguns parâmetros. A tabela 2.1 apresenta um resumo dos métodos usados para defeitos representados por seu comprimento L e profundidade máxima d , onde se inclui o fator de projeto para calcular a pressão de operação no duto com defeito.

Tabela 2.1 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito [4].

Método	S_{flow}	Formato do defeito	A/A_0	M	Fator de projeto
Grosseiro (ResMat)	$Min \left\{ \frac{S_y + S_u}{2}, 1.2 \times S_y \right\}$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	∞	F.E.T *
Área real	SMYS + 70MPa	Área projetada do defeito	$\frac{A}{A_0}$ $A_0 = Lt$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$	F.E.T
B31.G modificado (Arco e Kiefner)	SMYS + 70MPa	Área do defeito com aproximação retangular média	$0,85 \times \frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \left(\frac{L}{Dt} \right)^2}$	F.E.T
DNV RP-F101	S_u ou SMUS	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{Dt}}$	$(D/D-t) \times 0.9 \times F.E.T$
B31.G	se: $0,893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \leq 4$	1.1 x SMYS	Aproximação parabólica $\frac{2.d}{3.t}$	$\sqrt{1 + \left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$	F.E.T
	se: $0,893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} > 4$	$P_{defeito} = 1,1 \cdot P_d \cdot \left(1 - \frac{d}{t} \right)$ P_d achada na seção sem defeito			

* Critério que usa conceitos básicos de Resistência dos Materiais

Na equação DNV RP-F101 incluem-se fatores adicionais $(D/D-t)$ no fator de projeto para que esta possa ser incluída no mesmo formato das equações anteriores. Resultados anteriores [9; 10] mostram que a equação DNV RP-F101 é a mais exata, e a B31.G a mais conservadora, sendo ambas as mais utilizadas na prática.

No caso de dutos corroídos trabalha-se com a máxima pressão de operação admissível reduzida, determinada pela Tabela 2.1 ($MAOP_{reduzida} = P_{defeito} \times \text{fator de projeto}$), a qual não deverá exceder à MAOP originalmente determinada para o duto sem defeito.

2.1.4

Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando os Critérios de Aceitação

A norma API RP 579 [11] utiliza um ou mais dos seguintes critérios de aceitação para avaliar a integridade de um componente estrutural.

- **Tensão Admissível**

Tem base no cálculo das tensões que resultam de diferentes condições de carregamento, classificação e superposição das tensões, e comparação das tensões calculadas com um valor admissível de tensão. Este valor admissível é geralmente estabelecido como uma fração da tensão de escoamento ou tensão de ruptura, e esta fração pode ser associada com o coeficiente de segurança. Este valor crítico não é muito utilizado, já que se encontram dificuldades do cálculo das tensões em componentes com defeitos.

- **RSF - Fator de Resistência Remanescente**

Define-se como a razão entre as resistências à falha determinadas para o componente com defeito e para o componente sem defeito.

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (2.7)$$

onde:

L_{DC} : carga limite ao colapso plástico do componente danificado.

L_{UC} : carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.

Com esta definição, este critério de aceitação pode ser estabelecido usando fórmulas tradicionais dos códigos de projeto, análise elástica de tensões ou análise elasto-plástica.

Se o RSF calculado for maior que RSF_a , definida como o RSF admissível, o componente danificado pode continuar operando normalmente. Se o RSF calculado for menor que o RSF admissível o componente pode ser reparado, re-classificado ou aplica-se alguma forma de solução para reduzir a severidade do ambiente de operação. A re-classificação da pressão pode ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \blacksquare \text{ Se } RSF < RSF_a \text{ então.... } MAWP_r &= MAWP \cdot \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) \\ \blacksquare \text{ Se } RSF \geq RSF_a \text{ então... } MAWP_r &= MAWP \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde:

$MAWP$: máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código do projeto.

$MAWP_r$: carga limite ao colapso plástico do componente com defeito.

Um valor recomendado para o RSF_a é 0.9.

- **FAD - Diagrama para a Avaliação de Falha**

Este critério é usado para tratar componentes que têm defeitos tipo trinca, para os quais são usados as avaliações limites: fratura, colapso plástico e combinação de ambas.

2.1.5

Noções Básicas da Plasticidade

A grande maioria dos componentes estruturais são projetados para trabalhar no regime elástico. Quando um componente trabalha no regime plástico, ele experimenta grandes deformações com um pequeno incremento da carga aplicada. Se o carregamento for cíclico, as deformações plásticas originadas nos entalhes ou em alguns defeitos, diminuem consideravelmente a vida a fadiga do componente [12].

O comportamento elasto-plástico da maioria dos materiais estruturais pode ser representado a través dos modelos mostrados na figura 2.4, os quais são obtidos a partir de idealizações ou simplificações do ensaio de tração [5].

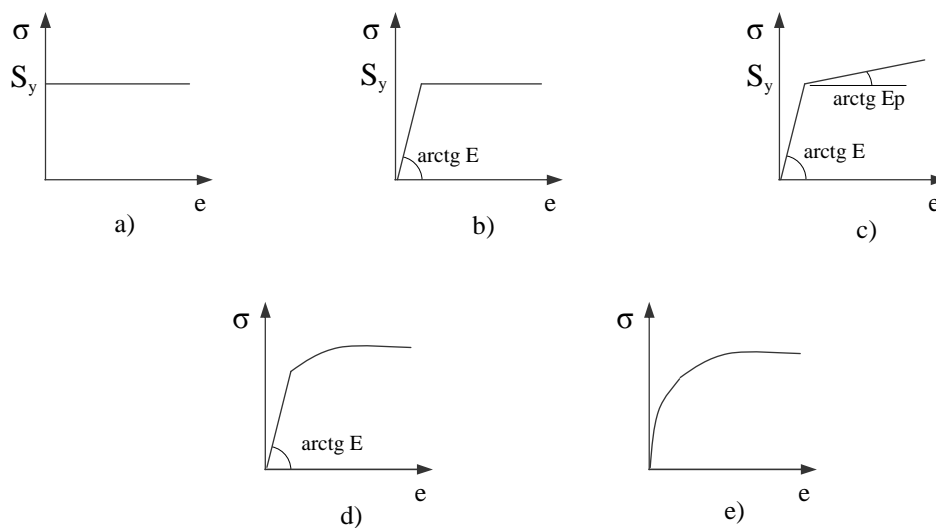


Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns modelos de materiais.

Os modelos mostrados na figura 2.4 são:

- (a) Modelo perfeitamente plástico: o qual não sofre deformação elástica. Assim que toda a deformação que experimenta é permanente.
- (b) Modelo elástico perfeitamente plástico: experimenta deformações elásticas e plásticas. A deformação elástica ocorre até atingir-se o valor da

resistência ao escoamento S_y , a partir do qual o material se deforma indefinidamente sem que haja aumento da tensão.

(c) Modelo de plastificação com encruamento linear: no qual o material tem uma reserva de resistência após do escoamento, fenômeno que é conhecido como “encruamento”. Na figura mostra-se E_p , que é equivalente ao módulo de elasticidade, mas no regime plástico.

(d) e (e) Modelos não lineares: onde no primeiro, a não linearidade tem começo depois de atingido o limite de proporcionalidade do material, e no segundo, a não linearidade tem início desde a aplicação da carga. A resistência ao escoamento nestes modelos é obtida determinando-se a tensão correspondente a valores convencionados de deformação plástica (0.2%) ou de deformação total (0.5%).

2.1.6

Relações Tensão-Deformação

No regime elástico as deformações que se apresentam num determinado material são linearmente relacionadas às tensões pela lei de Hooke. No regime plástico as deformações não são unicamente dependentes das tensões, mas também são dependentes do histórico de carregamento ou de como o estado de tensões foi alcançado [13].

São vários os critérios usados na teoria clássica da plasticidade que relacionam tensões e deformações, mas é comum a observância das seguintes hipóteses [6]:

- O material se comporta isotropicamente
- As deformações plásticas se produzem a volume constante, permitindo escrever-se a equação:

$$de_1^p + de_2^p + de_3^p = 0 \quad (2.9)$$

onde de_i^p é o incremento de deformação plástica na direção “i”.

Como consequência desta última hipótese, a qual é comprovada experimentalmente, se deduz que o coeficiente de Poisson para o regime plástico é igual a 0.5.

Em geral nos planos principais tem-se que [13]:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] + e_1^p + de_1^p \\ e_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_3 + \sigma_1)] + e_2^p + de_2^p \\ e_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] + e_3^p + de_3^p \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde:

e_i : deformação total na direção i.

e_i^p : deformação plástica total na direção i.

Para o cálculo das deformações equivalentes no regime plástico se utiliza a deformação de von Mises

$$de_{eq}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(de_1^p - de_2^p)^2 + (de_2^p - de_3^p)^2 + (de_3^p - de_1^p)^2} \quad (2.11)$$

Para um ensaio uniaxial a tração, os equivalentes plásticos de deformação e o equivalente de tensão, se reduzem a [13]:

$$de_p = de_1^p \quad (2.12)$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \quad (2.13)$$

Então para achar a deformação equivalente e a tensão total equivalente nos estados triaxiais segundo o critério de von Mises, tem-se [13]:

$$e_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.15)$$

2.2

Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos

2.2.1

Materiais Adesivos

Tentando substituir ou suplementar os métodos convencionais de junção, como por exemplo, a soldagem, foram desenvolvidas a técnicas de unir materiais por adesão. Devido ao avanço da tecnologia dos materiais, tem-se disponíveis no mercado novos materiais adesivos que permitem unir materiais, tais como os metais. Isto originou um grande aumento do uso de adesivos nas aplicações de engenharia, sendo estes muito utilizados em indústrias aeronáuticas [14].

Na atualidade se dispõe de um grande número de adesivos, os quais pode-se agrupá-los em adesivos inorgânicos, termofixos, termoplásticos, elastômeros, naturais [14].

2.2.2

Seleção do Adesivo

A performance de uma junta colada não só depende das propriedades físicas ou químicas dos adesivos, mas também de outros fatores como os materiais em contato e sua exposição ao meio, entre outros. Na tabela 2.2 estão listados os fatores que devem ser considerados ao selecionar um adesivo.

Tabela 2.2 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo [14]

FATORES DE PROJETO	CONSIDERAÇÕES
Requisitos para montagem	Colagem, selagem, isolamento, desenvolvimento ou aplicações de produção, reparo e manutenção.
Forma do adesivo	Pó, filme, à base de solvente ou à base de água ou pasta.
Método de aplicação	Manual ou mecânico, pincelamento, laminação ou “spray”.
Necessidade do processo	Consistência, tempo de cura, vida útil, tempo, temperatura, pressão para cura, pré-tratamentos para superfície, equipamentos, processos após montagem e acabamento.
Projeto de junta	Tipos de forças, área de colagem, número de montagens.
Performance exigida	Resistência mecânica, montagem estrutural temporária ou permanente, se o carregamento na junção é contínuo ou intermitente, direção da carga.
Condições de serviço	Calor, frio, umidade, química, radiação e riscos biológicos.
Outras exigências	Custo dos materiais, toxicidade, inflamabilidade, facilidade de manuseio, odor, cor, propriedades corrosivas, ópticas, térmicas e outras propriedades físicas e especificações a serem satisfeitas.

No projeto da junta é recomendável que a área de colagem possua uma rugosidade que permite ao adesivo uma boa ancoragem.

Na tabela 2.3 mostram-se alguns dos principais aderentes adesivos e sua compatibilidade com os aderentes.

Tabela 2.3 - Principais aderentes adesivos [14]

	Adesivos																						
	I	Naturais				Elastômeros				Termoplásticos				Termofixos									
Aderentes	Silicato de sódio	Colas animais	Cola de amina	Dextrina	Caseína	Acrilonitrilo butadieno	Policloropreno	Poliuretano	Borracha natural	Nitrato de celulose	Álcool polivinílico	Acetato de polivinil	Poliacrilato	Resina de silicone	Cianoacrilato	Formaldeído fenólico	Uréia formaldeído	Melamina formaldeído	Poliésteres (insaturados)	Resina epóxi	Poliâmida	Nitrado fenólico	Epóxi fenólico
Metais						X	X		X			X			X					X	X	X	X
Vidros e cerâmicos	X	X					X			X		X			X					X			X
Madeira					X				X	X		X				X	X	X		X			
Papel	X	X	X	X	X					X	X	X											
Couro		X				X	X		X	X													
Têxteis		X				X			X	X		X											
Nitrilo						X									X								
Natural						X			X						X								
Poliuretano						X	X	X															
Cloreto de polivinil						X	X	X												X			
Acetato de celulose									X	X					X								
Nitrato de celulose									X	X					X								
Etil celulose										X					X					X		X	
Poliétileno																				X		X	
Polipropileno																				X		X	
Nylon										X						X				X			
Poliéster																		X	X				
Melamina									X	X										X			
Poliâmida																				X	X		

As características físicas de adesivos são mostradas na tabela seguinte.

Tabela 2.4 - Características físicas de adesivos [14]

Forma Física	Considerações
Líquidos com viscosidade alta ou baixa	Muitas formulações podem existir neste estado. São fáceis de aplicar, com a possibilidade do controle da viscosidade pelo usuário.
Pasta	Esta forma é adequada para produções em massa, onde preenchimento de vazios são necessários. Uma grande variação na consistência pode ser obtida
Filme	Esta forma é restrita a superfícies lisas e são de fácil e rápida aplicação sem desperdício e com espessura da camada de adesivo uniforme
Pó	Esta forma requer a mistura com líquido ou ativação térmica para alcançar o estado líquido. Alguns tipos possuem catalisadores latentes que serão ativados durante a cura. Em geral, são formas econômicas de adesivo com longo período de conservação.
Granulados, cubos e outras formas sólidas.	São formas convenientes para facilitar a aplicação e a cura para aplicações particulares. Longo período de conservação.

Neste trabalho optou-se pelo adesivo em pasta, por ser o mais adequado no preenchimento dos defeitos de corrosão.

O adesivo a ser utilizado no reparo são as resinas epóxi porque têm excelente aderência aos materiais metálicos, geralmente possuem resistência maior do que os outros tipos numa faixa mais ampla de temperaturas, e são ideais para estruturas submetidas a altas tensões ou condições de serviço adversas, tais como calor e umidade.

A resina epóxi é indicada para reforços estruturais e revestimentos, porque depois da cura resulta um polímero termofixo que suporta altas temperaturas (acima de 120°C com aproximadamente as mesmas propriedades mecânicas para o adesivo epóxi usado neste reparo), além de ter resistência ao envelhecimento por calor e resistência química aos diversos tipos de solo e solventes. É importante na seleção do adesivo considerar o tempo de manuseio, a temperatura do duto durante a aplicação, a temperatura de operação do duto, o tempo de aplicação e as condições locais. [14]

2.3

Tensões nas Juntas Coladas

2.3.1

Distribuição de Tensões numa Junta Colada

Existem distintos tipos de juntas coladas, cada qual necessitando de um determinado tipo de análise para o conhecimento da sua distribuição de tensões. Um dos mais conhecidos é o tipo de junta sobreposta simples que se mostra na figura 2.5.

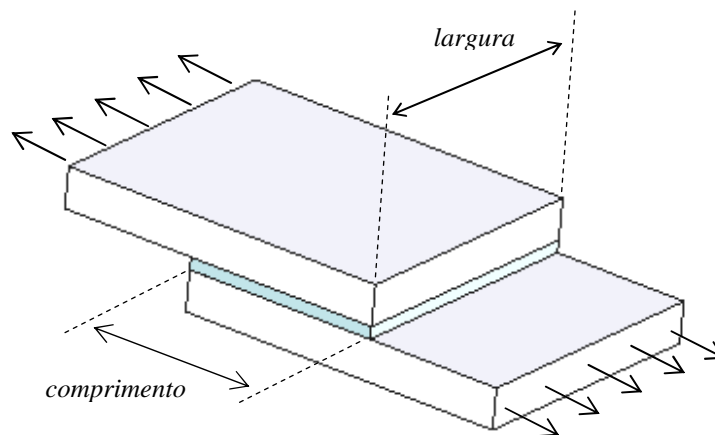


Figura 2.5 – Junta colada simples.

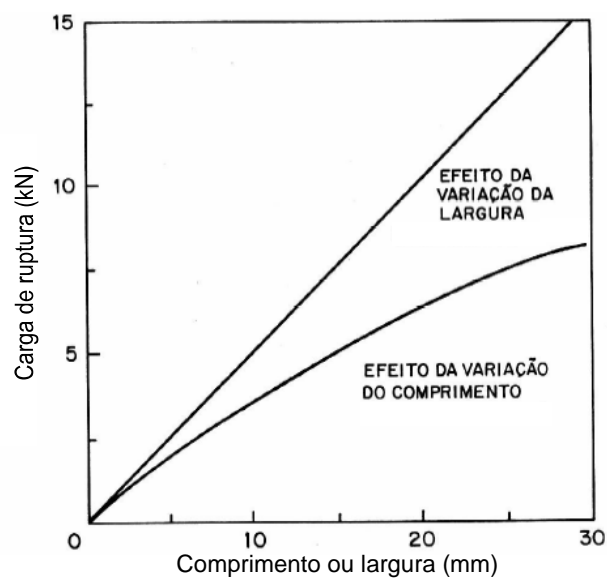


Figura 2.6 Resistência da junta colada simples [14]

Na figura 2.6 (cujo gráfico só tem validade qualitativa) pode-se ver que a resistência da junção não aumenta proporcionalmente com o comprimento sobreposto, e alcança um valor limite para grandes comprimentos, mas a resistência aumenta proporcionalmente com a largura da junção. A resistência ao cisalhamento das juntas coladas também depende da espessura da linha de colagem, obtendo-se maior resistência à medida que a espessura diminui [15].

Para os reparos para dutos usando camadas metálicas coladas serão utilizados os conceitos analisados para juntas simples onde o comprimento sobreposto é igual ao perímetro do duto, como pode-se ver na figura 2.7. A largura da junção é o comprimento do reparo.

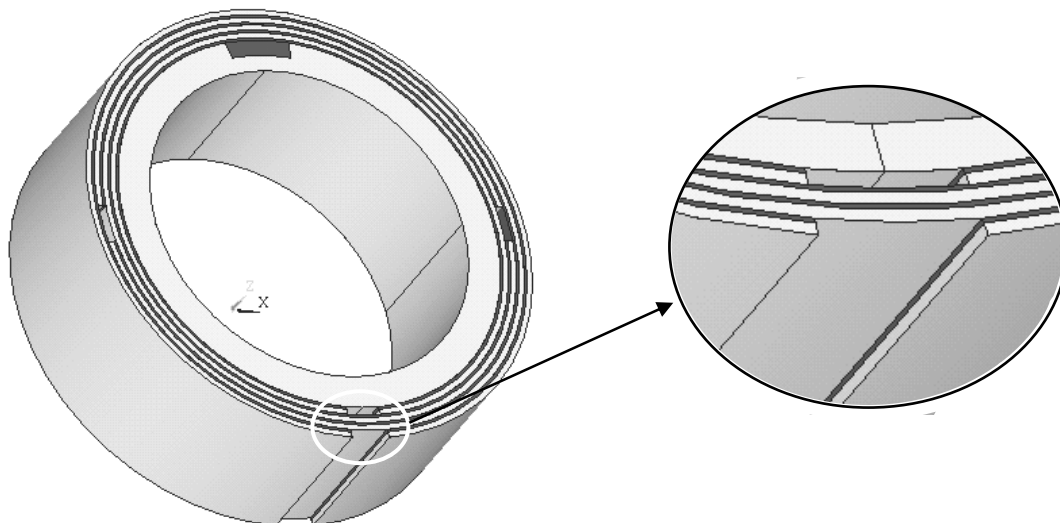


Figura 2.7 – Junta colada no reparo de dutos

O fator de concentração de tensões cisalhantes em juntas coladas é definido pela razão entre a tensão máxima na junta e a tensão média, a qual é definida como a carga dividida pela área real de colagem.

Na análise da distribuição das tensões numa junta colada, podem-se considerar dois tipos de modelos, os que consideram os aderentes (camadas metálicas) e o adesivo com comportamento elástico, e os modelos que consideram os aderentes e o adesivo com comportamento elasto-plástico. Esta consideração da plasticidade do adesivo submetido à tensão cisalhante pode reduzir a concentração de tensões substancialmente, e assim aumentar a resistência prevista das juntas, em

comparação à resistência prevista pelos modelos que só consideram o comportamento elástico da junta [16], conforme mostrado na figura 2.8.

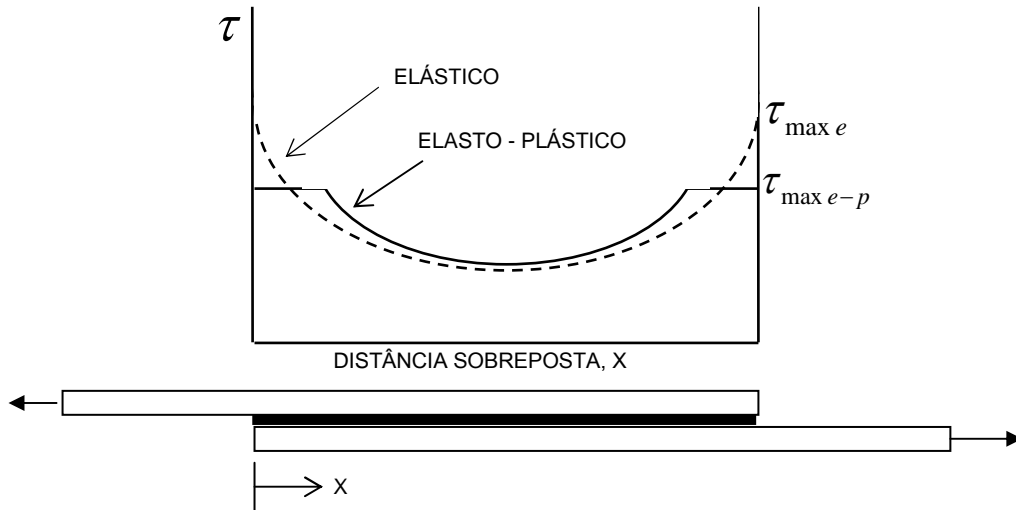


Figura 2.8 Distribuição das tensões cisalhantes na junta colada [17]

2.3.2

Ruptura de uma Junta Colada

As falhas nas juntas coladas podem ocorrer no adesivo, nos aderentes ou na interface adesivo-aderente. As falhas mais comuns são as falhas adesivas e as falhas coesivas. A falha coesiva ocorre no interior do adesivo, e a falha adesiva ocorre na interface adesivo-aderente, como é mostrado na figura 2.9. A que tem mais probabilidade de acontecer é a falha coesiva, já que as forças de adesão por unidade de área são maiores que a resistência à ruptura experimental [14].

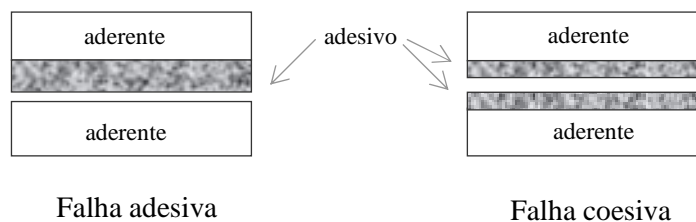


Figura 2.9 – Tipos de falha nas juntas coladas [14].

Neste trabalho, na modelagem por elementos finitos, não são utilizados os elementos de contato, os quais podem ser mais recomendáveis para o estudo de falhas por adesão (este tipo de elemento representa melhor os fenômenos de interação entre as superfícies).

A referencia [17] apresenta a distribuição das deformações presentes numa junta colada, esta foi carregada para induzir uma tensão cisalhante no adesivo. Os resultados são obtidos mediante uma análise numérica, onde considera que só acontece a ruptura quando todos os elementos da junta colada atingem seu limite de tensão cisalhante. Na figura 2.10.a apresentam-se à falha por adesão, enquanto na figura 2.10.b se mostra uma falha coesiva no instante em que ela se inicia no extremo da junta, e logo se vai propagando até o último elemento.

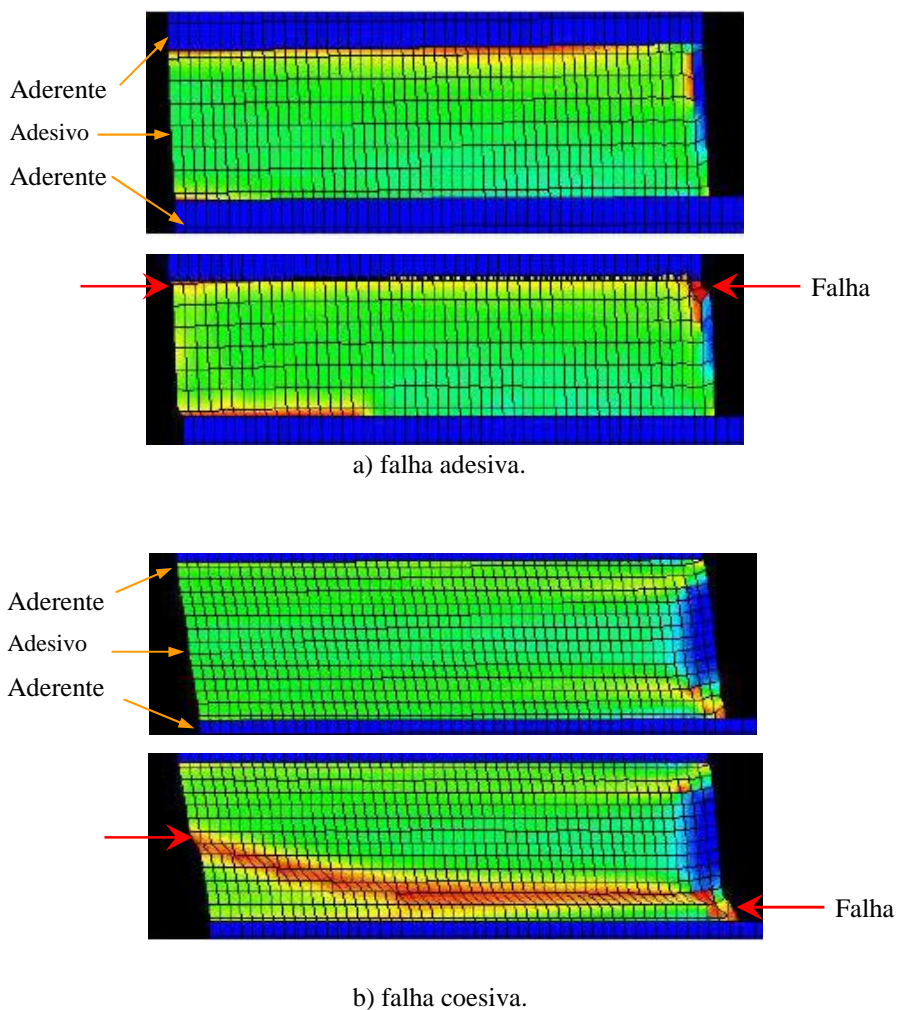


Figura 2.10 - Simulação numérica da falha adesiva e coesiva [13].

Na modelagem numérica desenvolvida neste trabalho, também se considera a falha coesiva quando todos os elementos da camada de adesivo tenham atingido sua resistência máxima ao cisalhamento, como mostrado na figura 2.10, mas neste caso, com um comprimento de área sobreposta igual ao perímetro do duto