3
Modelagem do cálculo do reparo

Neste capítulo serão apresentados estudos para o cálculo do número de camadas considerando o defeito do duto e o material de reparo.

3.1.
Introdução

Os dutos são estruturas sujeitas a defeitos, sejam de projeto, fabricação, ação de terceiros, envelhecimento natural ou mesmo decorrente de produtos corrosivos.

Existem três famílias de defeitos possíveis em dutos:

- Defeitos volumétricos: relacionados com a perda de material metálico, como corrosão interna, corrosão externa, cava e sulco;
- Defeitos geométricos: relativos à mudança de forma, como amassamento ou mossa, ovalização, enrugamento e flambagem local;
- Defeitos planares: trincas, dupla laminação, desalinhamento de solda, etc.

As causas de falhas mais comuns em linhas de dutos são:

- Erro de projeto;
- Falha do material;
- Defeito de construção;
- Corrosão externa e/ou interna;
- Falha operacional;
- Defeitos provenientes da ação de terceiros;
- Movimentação do solo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Tais defeitos podem comprometer a integridade estrutural do duto, devendo sofrer uma avaliação criteriosa com o intuito de definir o tipo de intervenção mais adequada sobre a estrutura. Porém, nem todos estes tipos de danos podem ser reparados com material composto. Estes reparos se limitam, em geral, a danos por perda de material metálico. Entretanto, são considerados realmente efetivos quando aplicado à estruturas com corrosão externa de até 80% da espessura da parede do duto. [7]

Os primeiros registros de uso de materiais compostos para reparo externo de dutos datam da década de 80, a partir da coordenação, pelo U.S. Gas Research Institute (GRI), de atividades de um grupo de organizações de pesquisa visando o desenvolvimento de materiais e procedimentos de aplicação para o reparo permanente de gasodutos sob elevada pressão, e sujeitos a fraturas dúcteis, o que resultou na criação do sistema ClockSpring® de reparo de dutos [8]. Assim, foi elaborado um documento final de pesquisa, GRI [53], a partir de um modelo matemático para implementação de um programa computacional GRI WRAP, ensaios de rompimento hidrostático, ensaios de tração, ensaios de cisalhamento, deslocamento de proteção catódica, etc.[32]. O DOT (Departament of Transportation), órgão regulador de operações com dutos nos Estados Unidos, reconhece tal técnica como método eficaz na restauração definitiva da integridade de dutos. [54]

3.2.
Análise Mecânica do Material Composto [54]

Devido a não homogeneidade e a anisotropia* típica dos materiais compostos, é recomendável, no estudo de seu comportamento, o uso de duas metodologias de análise mecânica, contemplando tanto aspectos micro-mecânicos como os macro-mecânicos.

Ambos os modelos, complementares entre si, são constituídos pela conveniente adaptação da teoria da mecânica contínua, segundo as propriedades, a proporção, o arranjo e a aderência entre os componentes dos materiais compostos.

* 15 – Anisotropia – Vide Apêndice E - Glossário

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

3.2.1
Micro-mecânica dos compostos

As propriedades elásticas dos materiais são características mecânicas essenciais para análise de tensões que permite relacionar as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem em um material. Adicionalmente, a maior parte das estruturas mecânicas existentes trabalha em regime elástico durante sua vida útil.

Para materiais isotrópicos como as ligas metálicas, as propriedades elásticas são conhecidas e constantes, amplamente presentes na literatura, e de fácil obtenção através de ensaios muito simples.

Entretanto, para os materiais compostos, as propriedades são sensíveis a inúmeras variáveis, como o tipo de fibra e resina a serem utilizadas, suas frações volumétricas, tipo de cura, além da orientação e teor das fibras.

Para sanar essa dificuldade, usa-se a micro-mecânica que trata de uma técnica de homogeneização que permite o cálculo das propriedades elásticas de um composto a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas.

Desta forma, o modelo micro-mecânico tem como objetivo determinar as propriedades de um material composto a partir das propriedades dos seus constituintes, arranjo e quantidade relativa destes. Para tanto, estabelece-se um elemento padrão denominado elemento representativo do volume (RVE) do composto como objeto de análise. Suas propriedades são então extrapoladas e obtêm-se as propriedades médias efetivas do material composto, vide figura 3.1:

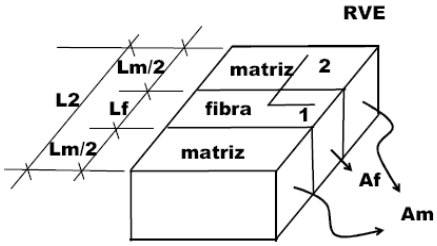


Figura 3.1 – Elemento representativo do Volume (RVE)

Os parâmetros mais relevantes na análise micro-mecânica dos materiais compostos são [64]:

- Fração volumétrica do reforço;
- Geometria do reforço;
- Distribuição espacial do reforço;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- Definição de eixos coordenados que auxiliará na análise do material, conforme figura 3.2 abaixo:

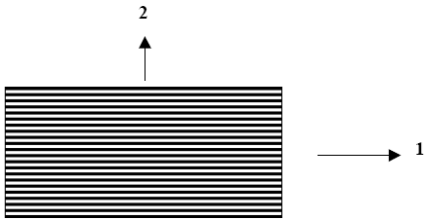


Figura 3.2 – Direções principais 1-2 em uma lâmina de composto

- Distribuição do comprimento do reforço na matriz;

Além destes parâmetros, algumas premissas básicas devem ser adotadas:

- Homogeneidade do material de reforço e do material da matriz;
- Isotropia de propriedades para a matriz e para o reforço;
- Distribuição uniforme do reforço na matriz;
- Alinhamento perfeito das fibras (reforço fibroso);
- Perfeita aderência entre as fibras e matriz (reforço fibroso).

Um método matemático bastante difundido dentro da micro-mecânica dos compostos, face sua aproximação aos resultados obtidos experimentalmente, é a chamada Regra das Misturas, cuja equação geral é expressa por [55,56]:

$$K_{c,i} = K_f v_f + K_m v_m \qquad \text{(eq.3.1)}$$

Onde Kc,i, Kf e Km representam o valor de determinada propriedade no compostos (na direção i), na fibra, e na matriz, respectivamente; vf e vm são as frações volumétricas da fibra e da matriz do composto. Sabendo que uma lâmina de composto possui o volume total (V_T) de material dado por:

$$V_T = V_m + V_f + V_V \qquad \text{(eq.3.2)}$$

Onde:

V_f : Volume de fibras;

V_m: Volume da matriz;

V_V: Volume de vazios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Sendo o volume de vazios (V_V) corresponde ao volume de bolhas de ar e gases que emanam da resina durante a cura e/ou processo de fabricação, as frações volumétricas são dadas por:

$$v_f = \frac{V_f}{V_T}$$
(eq.3.3)

$$v_m = \frac{V_m}{V_T}$$
(eq.3.4)

$$v_V = \frac{V_V}{V_T}$$
(eq.3.5)

Combinando as equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 tem-se:

$$V_T = v_m + v_f + v_V = 1 \qquad \text{(eq.3.6)}$$

Onde:

v f : Fração volumétrica das fibras;

v m: Fração volumétrica da matriz;

v v: Fração volumétrica dos vazios.

Em compostos estruturais de boa qualidade, a fração volumétrica de vazios deve ser necessariamente pequena, idealmente inferior a 1%. Por esse motivo, em geral, é possível desprezar a participação dessa variável e aproximar a equação 3.6 para:

$$V_T = v_m + v_f = 1 \qquad \text{(eq.3.7)}$$

Assim, as constantes elásticas de uma lâmina de reforço unidirecional estão relacionadas com as constantes elásticas dos materiais constituintes. Como exemplo, tem-se o módulo de elasticidade de distintos materiais, constituintes de um material composto, representado na figura 3.3 [57]:

$$E_c = \frac{E_f V_f + E_r V_r}{V_T} \Rightarrow E_c = E_f v_f + E_r v_r$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

$$E_c = E_f v_f + E_r \cdot (1 - v_f) \qquad \text{(eq. 3.8)}$$

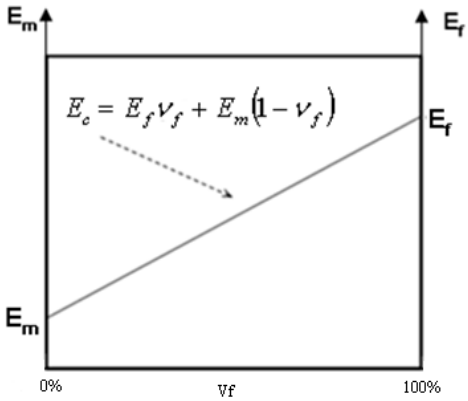


Figura 3.3 – Módulo de Elasticidade dos materiais compostos

Onde:

E_c: módulo de Elasticidade do Composto;

E_f: módulo de Elasticidade da Fibra;

E_m: módulo de Elasticidade da matriz;

V_f: fração do volume de fibra.

Sabendo que neste trabalho a malha utilizada possui uma distribuição de fibras ortogonal, com frações semelhantes em ambas as direções ($v_{f1} = v_{f2}$) e que as fibras na direção 2 não contribuem para o módulo na direção 1, ou seja, $E_{f21}=0$, tem-se que:

$E_C = E_1 = E_{f11} v_{f2} + E_{f21} v_{f2} + E_m (1 - v_f)$, logo:

$$E_1 = E_2 = E_c = E_f v_f + E_m (1 - v_f)$$

3.2.2
Macro-mecânica dos compostos

As propriedades macroscópicas de um elemento estrutural composto são expressas em termos de propriedades efetivas de um material homogêneo equivalente. Desta maneira, as relações constitutivas tensão x deformação são expressas em termos de valores médios de tensão e deformação obtidos experimentalmente.

Assim, tanto o critério da Micro como o da Macro-Mecânica são importantes para análise do material composto isoladamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

3.3
Tensões nas paredes dos dutos

No caso geral de um duto submetido a uma série de esforços simultâneos, em cada elemento da parede do mesmo aparecerão três tensões normais e três tensões de cisalhamento. As tensões normais são a tensão longitudinal σ_l, a tensão circunferencial σ_c, e a tensão radial σ_r, como mostrado na Figura 3.4. As tensões de cisalhamento σ_t atuam em cada um dos planos ortogonais às tensões normais.

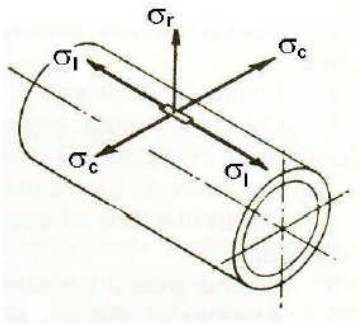


Figura 3.4 - Representação de tensões atuantes em uma tubulação [54].

A tensão longitudinal σ_l é composta das seguintes parcelas:

- Tensão resultante da pressão;
- Tensão resultante do momento fletor devido aos diversos pesos e sobrecargas;
- Tensão resultante dos momentos fletores devidos às dilatações térmicas, aos movimentos dos suportes e pontos extremos, às tensões de montagem, e outros;
- Tensão resultante das cargas axiais.

A tensão circunferencial σ_c é composta das seguintes parcelas:

- Tensão resultante da pressão (é geralmente a tensão predominante);
- Tensão resultante do achatamento local do tubo em consequência dos diversos momentos fletores atuantes. Essas tensões, que são localizadas, causam frequentemente nos tubos de materiais dúcteis, pequenas deformações que podem aliviar e redistribuir as tensões assim atuantes.

A tensão radial σ_r é causada exclusivamente pela pressão. O seu valor é geralmente baixo para os tubos de paredes finas, e por isso costuma ser desprezado nos cálculos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

As tensões de cisalhamento que se desenvolvem no plano perpendicular ao eixo do tubo são provenientes dos momentos de torção. Esse momento só tem valor apreciável nas tubulações não planas, em geral como consequência das dilatações térmicas. As demais tensões de cisalhamento são provenientes dos diversos momentos fletores que atuam sobre o tubo [54]. Elas são geralmente pequenas e neste trabalho consideradas desprezíveis.

3.3.1.
Tensões primárias e secundárias

As tensões que aparecem nas paredes de um tubo, em consequência dos diversos carregamentos, podem ser classificadas em duas categorias denominadas de tensões primárias e tensões secundárias.

Denominam-se tensões primárias as tensões necessárias para satisfazer as condições de equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos externos agindo sobre a tubulação, tais como pressão interna ou externa, pesos, sobrecargas etc. Tensões secundárias são as que resultam não de carregamentos externos, mas dos efeitos das dilatações do próprio tubo ou de outros tubos ligados ao tubo em questão, ou ainda dos movimentos de pontos extremos da tubulação, isto é, resultam de restrições geométricas dos sistemas, que impedem ou limitam a livre dilatação e movimentação do tubo.

Considerando-se um cilindro de paredes delgadas sujeitas a uma pressão interna, pode-se deduzir teoricamente expressões para o cálculo da tensão circunferencial (equação 3.9) e tensão longitudinal (equação 3.10). Vide abaixo as figuras 3.5 e 3.6 que auxiliam no cálculo das tensões circunferencial e longitudinal. Aplicando-se o equilíbrio de forças nas direções circunferencial e longitudinal tem-se [78]:

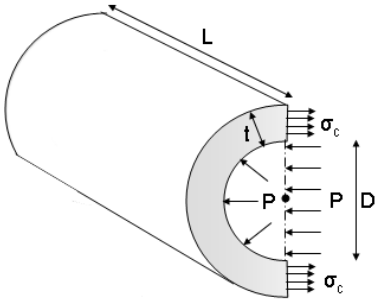


Figura 3.5 – Cálculo da tensão circunferencial

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

$$A = D \cdot L$$
$$F_{ext} = P \cdot A$$
$$a = 2t \cdot L$$
$$F_{\text{int}} = \sigma_c \cdot a \qquad \text{, logo:} \qquad \sigma_c = \frac{PD}{2t} \qquad \text{(eq. 3.9)}$$
$$F_{ext} = F_{\text{int}}$$
$$P \cdot D \cdot L = \sigma_c \cdot 2t \cdot L$$

Ou,

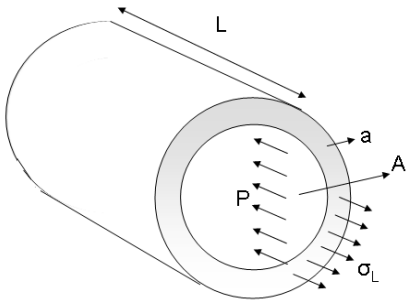


Figura 3.6 – Cálculo da tensão longitudinal

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$
$$F_{ext} = P \cdot A$$
$$a = \pi \cdot D \cdot t$$
$$F_{\text{int}} = \sigma_L \cdot a \qquad \text{, logo:} \qquad \sigma_L = \frac{PD}{4t} \qquad \text{(eq. 3.10)}$$
$$F_{ext} = F_{\text{int}}$$
$$P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \sigma_L \cdot \pi \cdot D \cdot t$$

Onde:

σ_c: tensão circunferencial de tração;

σ_L: tensão longitudinal de tração;

P: pressão interna;

D: diâmetro médio do cilindro;

t: espessura de parede do duto.

Essas fórmulas foram deduzidas para cilindros cuja espessura de parede seja desprezível em relação ao diâmetro.

Tem-se pelas fórmulas que $\sigma_c = 2\sigma_L$, isto é, para igualdade de condições, a tensão circunferencial é o dobro da tensão longitudinal. Esta relação é válida para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

tubos com tampos nas extremidades, não enterrados e sob pressão interna. Deu-se particular atenção a este estado de tensão porque é o estado que ocorrerá nos espécimes tubulares testados nos experimentos deste trabalho.

3.4.
Equações Semi-empíricas para dutos com defeitos de corrosão

Abaixo serão demonstrados os principais métodos para avaliação de defeitos de corrosão com orientação longitudinal e carregamento por pressão interna.

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, $P_{defeito}$, com a resistência à falha por colapso plástico da seguinte forma (se considera $\sigma_r << \sigma_c$). Segue abaixo, na figura 3.7, a idealização geométrica do defeito em um duto e na figura 3.8, o gráfico tensão versus deformação do mesmo:

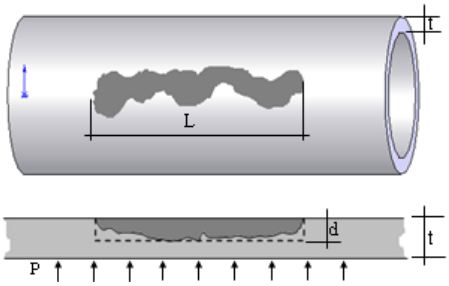


Figura 3.7 – Idealização da geometria de um defeito

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_{Circ} - \sigma_{Radial}$$

$$\sigma_{Tresca} \cong \sigma_{Circ.} = S_{flow}$$

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_C = \frac{P_{defeito} \cdot D}{2t} \cdot \frac{1}{C} = S_{flow} \qquad \text{(eq.3.11)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

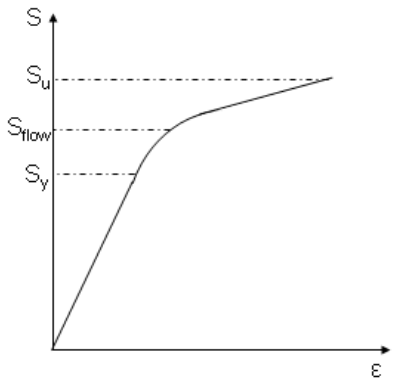


Figura 3.8 – Resistência x Deformação

Onde a 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). Logo:

$$P_{defeito} = \frac{2.t}{D}.S_{flow}.C \qquad \text{(eq.3.12)}$$

O parâmetro C tem a seguinte forma [58]:

$$C = \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0.M}} \right) \qquad \text{(eq.3.13)}$$

Onde, por exemplo, o método da área:

A: Área longitudinal de material perdido;

A_0: Área longitudinal da seção com defeito;

M : Fator de Folias.

A equação 3.12 pode ser dividida 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.

$$P_{defeito} = \underbrace{\frac{2.t}{D}}_{1^o} \underbrace{S_{flow}}_{2^o} \underbrace{C}_{3^o}$$

As equações mais conhecidas para o cálculo da pressão de falha num duto com defeito de corrosão têm formato semelhante ao da equação 3.12, porém com algumas diferenças em alguns parâmetros. A tabela 3.1 apresenta um resumo dos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

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:

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

* Critério que usa conceitos básicos de Resistência dos Materiais, onde E depende da junção da solda, F é um fator de segurança e T um fator relacionado com a temperatura de trabalho.

Tabela 3.1 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito [5].

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 em trabalhos diversos [56,57] mostram que a equação DNV RP-F101 é considerada mais exata, e a B31.G, mais conservadora, sendo ambas as mais utilizadas na prática.

É importante lembrar que, no caso de dutos corroídos trabalha-se com a máxima pressão de operação admissível reduzida, determinada pela Tabela 3.1:

$$MAOP_{reduzida} = P_{defeito} \times fator\ de\ projeto \qquad \text{(eq.3.14)}$$

Onde a $MAOP_{reduzida}$ não deverá exceder à MAOP originalmente determinada para o duto sem defeito.

Um conceito também importante na análise de dutos com defeitos é do RSF (Remaining Strength Factor), ou Fator de Resistência Remanescente. Basicamente se resume à razão entre os carregamentos que levam os componentes com defeito e sem defeito a atingir um estado limite, por exemplo,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

seu colapso plástico. Para vasos de pressão ou tubulações, o RSF é calculado conforme abaixo [59,60]:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \qquad \text{(eq.3.15)}$$

$$MAOP_r = MAOP\left(\frac{RSF}{RSF_a}\right) \qquad \text{se } RSF<RSF_a \qquad \text{(eq.3.16)}$$

$$MAOP_r = MAOP \qquad \text{se } RSF \geq RFS_a$$

Onde:

L_{DC} = carga limite ou de colapso plástico do componente com defeito

L_{UC} = carga limite ou de colapso plástico do componente sem defeito

MAOP = máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código de projeto

MAOPr = máxima pressão de operação admissível para o componente com defeito

RSFa = valor admissível para o RSF, geralmente igual a 0,90

Uma extensão da aplicação deste fator de resistência remanescente pode ser feita para dutos que foram reparados com materiais compostos. Neste caso, a carga de colapso do duto reparado é denominada LRDC e ela substitui a carga de colapso do duto com defeito.

$$RSF = \frac{L_{RDC}}{L_{UC}} \qquad \text{(eq.3.17)}$$

3.5. Análise do conjunto Reparo/Duto

No caso de reparos de material composto (fibra de vidro e matriz polimérica) tipo manga, envolvendo um trecho de duto corroído, o desempenho de material depende basicamente do tipo e da quantidade de fibras utilizadas em uma dada direção. Este reparo, quando utiliza fibra de vidro, começa a agir como reforço efetivo após grandes deformações plásticas terem ocorrido no duto devido, em geral, ao baixo módulo de elasticidade do composto ($E_{fibra\ vidro} \approx 70$ a 90 GPa [61], $E_{composto} \approx 5$ a 60 GPa [62]). Na Figura 3.7 mostra-se o comportamento deste reparo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

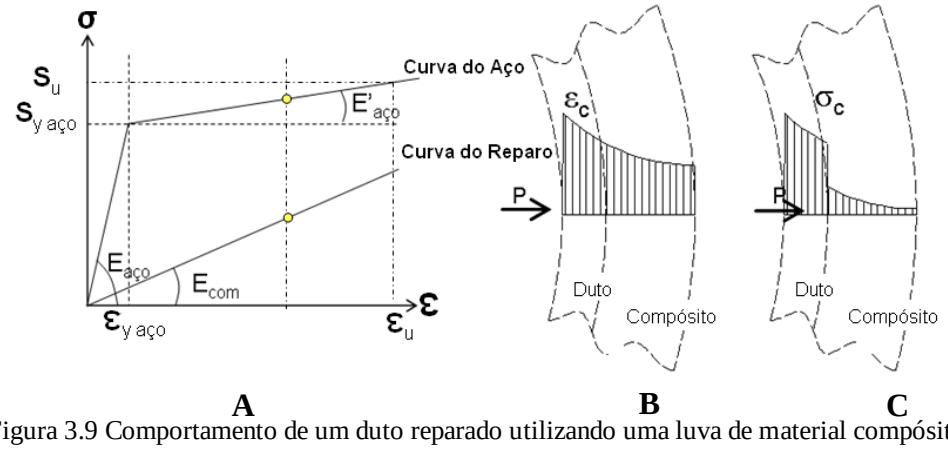


Figura 3.9 Comportamento de um duto reparado utilizando uma luva de material compósito

Nas figuras 3.9 B e C, mostram-se distribuições de deformações e tensões típicas de um cilindro de parede espessa para se ter uma idéia do aporte de carga de cada componente do duto reparado. Nesta, pode-se perceber que, o reparo por ter baixo módulo de elasticidade, tem um aporte de carga baixo quando comparado ao do duto.

Conforme trabalhos já desenvolvidos nesta área [59,63] pode-se perceber que o efeito do reforço gerado pelo reparo de material composto tem sua principal atuação no instante que a parede de aço do defeito inicia seu escoamento. A partir deste instante, o reparo (por ter $E_{composto} > E'_{aço}$) começa a trabalhar efetivamente passando a equilibrar os incrementos de forças circunferências introduzidas na estrutura através dos incrementos de pressão. Desta forma, é valido considerar no cálculo da espessura de reforço, que a parede de aço suportará uma parcela considerável de pressão até seu limite de ruptura, ou até, pelo menos, o seu início de escoamento.

3.6.
Cálculo do número de camadas do reparo

Sendo o objetivo da utilização do reparo estabelecer o comportamento mecânico do duto no que diz respeito às deformações circunferências e pressão mínima de operação, é importante determinar a espessura do reparo necessária. Para esta análise, parâmetros como módulo de elasticidade do aço e do reparo, pressão de ruptura do duto com e sem defeito, tensão de ruptura e escoamento do aço e do reparo são de grande relevância.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Seguem abaixo alguns métodos utilizados no cálculo do número de camadas que o reparo deverá conter. Porém, vale salientar que números diferentes de camadas foram encontrados de acordo com a modelagem adotada. Isto deve-se ao fato de que o modelo da ISO24817 é mais conservador, trabalhando na região elástica, o método desenvolvido [63] é menos conservador, trabalhando na região plástica, e o método desenvolvido [4], é mais localizado, trabalhando região a região.

- **Método desenvolvido em [4]**

Este método baseia-se na teoria de cilindros de parede espessa mediante a identificação de três regiões de comportamento:

1) Três são os componentes considerados nesta análise: material composto, duto e resina de preenchimento do defeito;

2) Todos os componentes do duto reparado encontram-se no estado elástico;

3) O duto trabalha no seu regime plástico (vai deste o início do escoamento do duto até o limite de escoamento da resina);

4) Tanto o duto como a resina trabalham no seu regime plástico (vai desde o escoamento da resina até a ruptura do duto ou a ruptura do material composto).

Uma característica importante deste método é que o mesmo permite o conhecimento das tensões atuantes na região do defeito e no reparo do duto para qualquer pressão de operação.

Desta forma, com base nas equações desenvolvidas no Apêndice E, pode-se analisar o comportamento de um duto reparado até a ruptura de algum dos componentes, em todas a regiões. A figura 3.10 mostra um tipo de comportamento possível para um duto reparado com camadas de material compósito:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

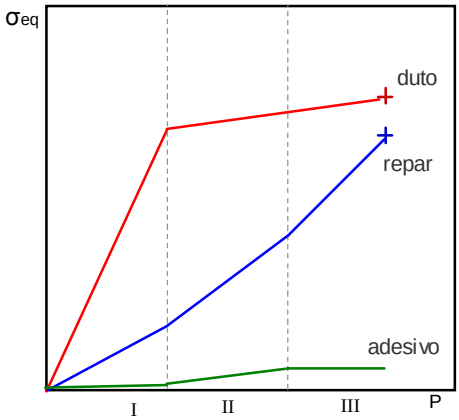


Figura 3.10 – Exemplo de regiões de comportamento de um duto reparado com material compósito. (Região I: Regime elástico / Região II: Regime plástico / Região III: início da planificação)

As três regiões do comportamento, mostradas na figura 3.10, são:

- **Região I:** nesta região, o duto, o reparo e o adesivo trabalham em regime elástico, desde uma pressão interna igual a zero, até uma pressão na qual o material do duto no defeito atinge o escoamento. O aporte de carga de cada componente é proporcional ao seu módulo de elasticidade. Em consequência, o adesivo tem um aporte de carga quase desprezível.

- **Região II:** o duto na região do defeito trabalha em regime plástico, através do qual seu aporte de carga em relação ao incremento de pressão diminui consideravelmente, dado que este aporte depende do encruamento do material. Os incrementos de pressão são resistidos pelo aumento da tensão que ocorre no reparo. Esta região se estende, desde o início da plastificação do duto, até o início da plastificação do adesivo.

- **Região III:** inicia-se a plastificação do adesivo. Esta etapa é quase imperceptível, já que a diferença do aporte de carga do adesivo no regime elástico ou plástico é muito pequena. A região III vai desde a plastificação do adesivo, até a falha do duto ou o reparo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Assim, através deste modelo e considerando as características do duto, defeito usinado e material utilizado para o estudo deste trabalho, determinou-se o número de camadas requeridas, conforme demonstrado abaixo:

Caracterização do duto com defeito retangular usinado no centro:

- Raio médio do duto (r): 37,1mm
- Espessura média do duto ($t_{aço}$): 2,04mm
- Profundidade média do defeito (d): 0,79mm
- Limite de escoamento (a 0,5%) ($S_{yaço}$): 262 MPa
- Limite à ruptura ($S_{uaço}$): 310 MPa
- Deformação máxima ($\varepsilon_{uaço}$): 16%

$$-C = 1 - \left(\frac{d}{t}\right) = 0{,}55$$

Caracterização do material composto (fibra de vidro e matriz polimérica) utilizado como reparo:

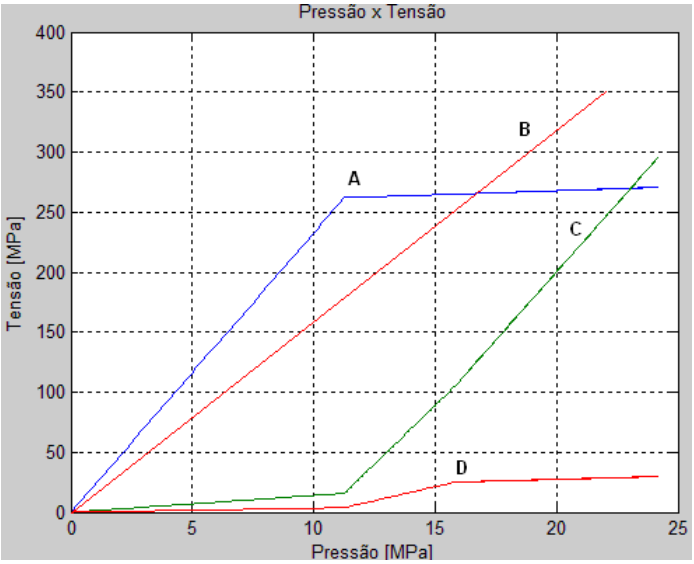
- Espessura (t_{rep}): 1,38mm
- Número de camadas (n): 5 camadas
- Limite de ruptura (S_{uRep}): 322 MPa
- Limite de ruptura da resina (adesivo) ($S_{yadesivo}$): 42 MPa
- Deformação máxima (ε_{uRep}): 1,6%
- Módulo de Elasticidade do reparo (E_r): 23 GPa

Assim, tais dados foram ingressados no modelo analítico e os seguintes resultados foram obtidos:

- Pressão de ruptura do duto novo sem reparo e sem defeito (P_{rup})= 22 MPa;
- Pressão na qual o duto reparado começa a escoar ($P_{yaço}$)= 11,26 MPa;
- Pressão de falha do duto com defeito e sem reparo (P_{falha})= 14,16 MPa.
- Pressão de falha do duto com defeito e com reparo (P_{falha}´)= 24,16 MPa.

Segue abaixo, na figura 3.11 resultado da modelagem matemática representando as curvas de tensão versus deformação do duto sem defeito, com defeito, com defeito e reparado e do reparo:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA



*Linhas: A – duto reparado; B - duto sem defeito; C - reparo; D - adesivo
Figura 3.11 Resultado da modelagem matemática para o duto com reparo de material composto

Considerando que cada camada de reparo possui espessura de aproximadamente 0,31 mm pode-se confirmar que a aplicação de 5 camadas, inicialmente adotadas, são suficientes para que a pressão de ruptura do duto reparado seja maior que a pressão de ruptura de um duto sem defeito, com um RSF - Fator de Resistência Remanescente igual a:

$$RFS_{Analítico} = \frac{L_{RDC}}{L_{UC}} = \frac{24{,}16}{22} = 1{,}10 > 0{,}9$$

Assim, este critério cumpre o requerimento da API 579, o reparo é considerado aceitável quando RFS é maior do que 0,9.

Da norma B31.4 [64] a pressão máxima de operação para o duto sem defeito é calculada por:

$$P_d = \frac{2 \cdot t_{aço} \cdot S_{yd}}{D} \cdot F \cdot E \cdot T = \frac{2 \cdot 2{,}04 \cdot 262}{74{,}2} \cdot 0{,}72 \cdot 1 \cdot 1 = 10{,}37 MPa \qquad \text{(eq.3.18)}$$

Segundo o modelo analítico, a pressão na qual o defeito reparado inicia o escoamento é de 11,26 MPa. Isto significa que com uma pressão de operação de 10,37 MPa, o duto ainda trabalha o seu regime elástico.

A rigidez está relacionada ao módulo de elasticidade do conjunto camada reparo-adesivo. Considerando-se módulos de elasticidade iguais, uma rigidez maior pode ser obtida trabalhando-se com uma maior quantidade de camadas de reparo. Assim, considerando-se projetos de reparo onde deseja-se que o duto reparado suporte apenas uma pressão similar a de um duto novo, a resistência do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

reparo é de fundamental importância. Porém, caso deseje-se também controlar as deformações na região do defeito reparado, o módulo de elasticidade e a espessura total do reparo também devem ser considerados.

Na figura 3.12 foram analisados 3 diferentes espessuras de reparo, todas com mesmo módulo de elasticidade. Pode-se perceber que à medida que se aumenta a espessura do reparo, aumenta a pressão requerida para o início do escoamento.

Desta forma, o projetista tem que fazer um balanço de custo, tempo e qualidade do reparo, considerando que ao utilizar um material menos resistente, terá que trabalhar com mais camadas, utilizar mais adesivo e precisará de mais tempo para aplicar as camadas.

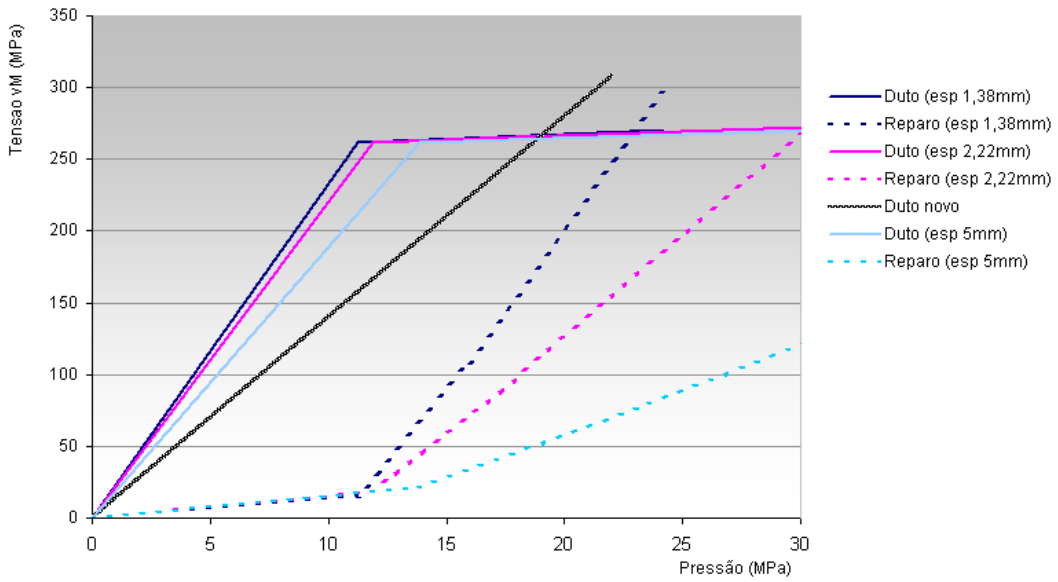


Figura 3.12 - Comparativo entre diversas espessuras de camada de reparo

- **Método desenvolvido em [63]**

Neste método, a espessura mínima do reparo é calculada com base na premissa de que o duto reparado terá a mesma resistência do duto original (novo). Com base na figura 3.13 e através do equilíbrio de forças aplicado na área do defeito, pode ser demonstrado que:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

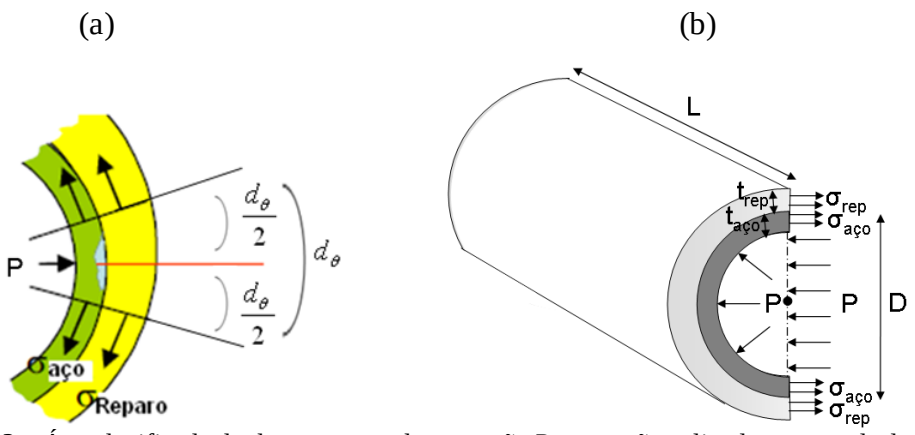


Figura 3.13 – Área danificada do duto, mostrando a pressão P e a tensão aplicada na camada do duto e do reparo.

Aplicando o equilíbrio de força com base na figura b tem-se:

$$P \cdot D \cdot L = 2\left(\sigma_{aço} \cdot t_{aço} \cdot L + \sigma_{rep} \cdot t_{rep} \cdot L\right)$$

$$\frac{P \cdot D}{2} = \left(\sigma_{aço} \cdot t_{aço} + \sigma_{rep} \cdot t_{rep}\right)$$

$$\frac{P \cdot D}{2} = \sigma_{aço} \cdot t_{aço} \cdot F + \sigma_{rep} \cdot t_{rep}$$

$$t_{rep} = \frac{\frac{P \cdot D}{2} - \sigma_{aço} \cdot t_{aço} \cdot F}{\sigma_{rep}} \qquad \text{(eq.3.19)}$$

Onde:

$F = 1 - \frac{d}{t_{aço}}$ (considerando que o comprimento do defeito é ∞)

d = profundidade do defeito

D = diâmetro do duto

P = pressão de colapso plástico de um duto sem defeito

$\sigma_{aço}$ = tensão no duto

$t_{aço}$ = espessura nominal do duto

σ_{rep} = tensão no reparo

t_{rep} = espessura do reparo

Assim, a equação 3.19 pode ser utilizada para cálculo de uma espessura mínima e/ou máxima de reparo. A espessura calculada é mínima quando se utiliza o valor S_u ou S_{flow} do duto e S_u ou S_{flow} do reparo no lugar de $\sigma_{aço}$ e σ_{rep} (S_{flow} é um valor entre S_y e S_u, neste caso se utilizará o valor de S_u). A espessura

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

calculada é máxima quando se utiliza $\sigma_{aço}$ igual a zero (simulando defeito passante) e σ_R é substituído por um valor entre $0.001E_R$ e $0.004E_R$, onde 0.001 e 0.004 são deformações máximas sugeridas para o material compósito especificada na norma ISO/TS 24817 [24].

Com base na equação 3.19, também é importante perceber que t_{rep} e σ_{rep} são parâmetros decisivos para o cálculo do reforço do reparo. Principalmente considerando que σ_{rep} pode variar consideravelmente de acordo com o material utilizado (por exemplo: fibra de vidro, fibra de carbono, etc.).

Assim, tomando como aplicação os dados utilizados e/ou encontrados nos resultados experimentais desta tese, detalhados no capítulo 5, tem-se a seguinte espessura de reparo:

D = 74,2mm

P = 18,22MPa

SuAço = 310MPa

$t_{aço}$ = 2,03

S_{uRep} = 322MPa

d = 0,79mm

E = 23 GPa

- Espessura Mínima:

$$t_{rep.\min} = \frac{\frac{P \cdot D}{2} - S_{uaço} \cdot t_{aço} \cdot F}{S_{u\mathrm{Re}p}}$$

$$t_{rep.\min} = \frac{\frac{18,22 \cdot 74,2}{2} - 310 \cdot 2,04 \cdot F}{322}$$

$$F = 1 - \frac{0,79}{2,04} = 0,61$$

$$t_{rep.\min} = \frac{\frac{18,22 \cdot 74,2}{2} - 310 \cdot 2,04 \cdot 0,61}{322}$$

$$t_{rep.\min} = \frac{290,20}{322} = 0,90mm$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Onde o número de camada é obtido por:

$$n = \frac{t_{rep}}{e_{rep}} = \frac{0,90}{0,31} = 2,91 camadas \approx 3 camadas$$

- Espessura Máxima (utilizando um valor limite de 0.001 [1] de deformação no reparo e considerando que o aço do duto perdeu sua capacidade de resistir à pressão):

$$t_{rep.\max} = \frac{P \cdot D}{2(0,001 \cdot E_{rep})}$$

$$t_{rep.\max} = \frac{18,22 \cdot 74,2}{2(0,001 \cdot 23152)} = 29,20 mm$$

Onde o número de camada é obtido por:

$$n = \frac{t_{rep}}{e_{rep}} = \frac{29,20}{0,31} \approx 94 camadas$$

Desta forma, conforme mencionado no artigo [69], considerando este tipo de análise mais conservadora para o cálculo da espessura máxima, pode-se ser surpreendido com valores superdimensionados como demonstrado acima.

- **Método indicado pela ISO/TS 24817** [1]

Outro método de análise/cálculo do número de camadas é através da ISO/TS 24817. Segue abaixo procedimento de cálculo utilizado com base na mesma.

- Dimensionamento do reparo:

Para este dimensionamento, adotou-se a premissa de um dano Tipo A (não-passante), onde o defeito esta presente, porém ainda não atravessou por completo a parede do duto, ou seja, não há presença de vazamento.

- Projeto baseado na tensão admissível do substrato (Defeito tipo A):

Este método é apropriado quando a contribuição do substrato for inclusa no cálculo da capacidade de carregamento e as equações abaixo só são válidas para $t_{projeto}$<D/6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

O cálculo da espessura mínima deve ser feito, considerando a direção circunferencial e axial, e o resultado será o valor máximo encontrado, a partir das duas direções:

- Direção circunferencial:

$$\varepsilon_{aço} = \varepsilon_{rep,c}$$

$$E_{aço} \cdot \sigma_{aço} = E_{rep,c} \cdot \sigma_{rep}$$

$$\frac{E_{aço}}{E_{rep,c}} \cdot \sigma_{aço} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t_{rep,c}}$$

Onde P = P_{Proj} - P_{def},, logo:

$$\frac{E_{aço} \cdot \sigma_{aço}}{E_{rep,c}} = \left(P_{Proj} - P_{Def}\right)\frac{D}{2 \cdot t_{rep,c}}$$

$$t_{rep,c} = \frac{D}{2 \cdot \sigma_{aço}}\left(\frac{E_{aço}}{E_{rep,c}}\right) \cdot \left(P_{Proj} - P_{Def}\right)$$

(eq.3.20)

Onde:

trep,c = espessura mínima do reparo na direção circunferencial

D = diâmetro do duto

$\sigma_{aço}$ = tensão no duto

$E_{aço}$ = módulo de Elasticidade do aço

$E_{rep,c}$ = módulo de Elasticidade do reparo circunferencial

P_{Proj} = pressão de projeto, ASME 31.4 [64]

P_{Def} = pressão de operação do duto com defeito, podendo ser calculada por uma das opções demonstradas na tabela 3.2. Sendo a B31.G ,uma maneira mais conservadora, e a DNV-RP-F101 [65], uma maneira mais exata.

$$P_{Def} = \frac{2t_{aço}}{D} \cdot S_{flow} \cdot \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}}\right) \cdot Fatordeprojeto \qquad \text{(eq.3.21)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Método	Sflow	Formato do defeito	A / A0	M	Fator de projeto
B31.G	$1.1 \cdot SMYS$	Aproximação parabólica	$\frac{2d}{3t_{aço}}$	$\sqrt{1+\left(0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt_{aço}}}\right)}$	$F.E.T$
DNV-RP-F101 [71]	S_u ou SMUS	Retangular longo	$\frac{d}{t_{aço}}$	$\sqrt{1+0.31\frac{L^2}{D \cdot t_{aço}}}$	$\left(\frac{D}{D-t_{aço}}\right) \cdot 0.9 \cdot F \cdot E \cdot T$

Tabela 3.2 - Fatores para cálculo da pressão de operação (P_{Def}) em dutos com defeitos de corrosão.

Da mesma maneira que para equação 3.20, a equação 3.21 apresenta o módulo de elasticidade e a profundidade do defeito como parâmetros decisivos para o cálculo do número de camadas do reparo, por isso que os mesmos foram analisados e/ou testados nesta tese.

- Direção axial:

$$\varepsilon_{aço} = \varepsilon_{rep,a}$$

$$E_{aço} \cdot \sigma_{aço} = E_{rep,a} \cdot \sigma_{rep}$$

$$\frac{E_{aço}}{E_{rep,a}} \cdot \sigma_{aço} = \frac{P \cdot D}{t_{rep,a}}$$

Onde P é igual a:

$$P = \frac{F}{\frac{A}{2}} = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{2}} = \frac{2F}{\pi D^2}$$

F pode ser calculado através de:

$$F = \frac{\pi}{4} pD^2 + \sqrt{F_{ax}^{\ 2} + 4F_{sh}^{\ 2}} + \frac{4}{D}\sqrt{M_{ax}^{\ 2} + M_{to}^{\ 2}} \qquad \text{(eq.3.22)}$$

Sendo:

F_{ax} = força axial aplicada

F_{sh} = força de cisalhamento aplicada

M_{ax} = Momento axial aplicado

M_{to} = Momento torçor aplicado

Logo, de maneira similar ao calculado para equação 3.20, tem-se:

$$t_{rep,a} = \frac{D}{2 \cdot \sigma_{aço}} \cdot \left(\frac{E_{aço}}{E_{rep,a}}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D^2} - P_{def}\right) \qquad \text{(eq.3.23)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Onde:

$t_{rep,a}$ = espessura mínima do reparo na direção axial

$E_{rep,a}$ = módulo de Elasticidade do reparo na direção axial

F = Força equivalente externa

Considerando ainda a direção circunferencial, existe uma espessura mínima a ser determinada, através da equação abaixo. O resultado final para esta direção será o maior valor encontrado entre as equações (3.20) e (3.25).

$$\varepsilon_{rep,c} = \frac{p_{proj} \cdot D}{2 \cdot E_{rep,c} \cdot t_{rep,c}} - \sigma_{aço} \frac{t}{E_{rep,c} \cdot t_{rep,c}} - \frac{p_{live} \cdot D}{2 \cdot \left(E_{rep,c} \cdot t_{rep,c} + E_{aço} \cdot t\right)} \qquad \text{(eq.3.24)}$$

Onde:

P_{live} = pressão interna durante a instalação do reparo

t = espessura remanescente do aço no local do defeito

Sendo P_{live} = 0, a equação (3.24) pode ser reorganizada em:

$$\varepsilon_{rep,c} = \frac{1}{E_{rep,c} \cdot t_{rep,c}} \left(\frac{D \cdot p_{proj}}{2} - \sigma_{aço} \cdot d \right)$$

$$t_{\min,c} = t_{rep,c} = \frac{1}{\varepsilon_{rep,c} E_{rep,c}} - \left(\frac{D \cdot p_{proj}}{2} - \sigma_{aço} \cdot d \right) \qquad \text{(eq.3.25)}$$

Sob o ponto de vista da análise pós-envelhecimento, a equação 3.25 é de grande importância, uma vez que, através dela, entra-se com a deformação máxima do material composto antes e depois do envelhecimento, buscando encontrar sua respectiva espessura mínima e, então, analisar de quanto seria o incremento de material composto, considerando seu envelhecimento.

- Extensão axial do reparo (l_{rep}):

O comprimento do reparo (l_{rep}) deve estender além da região danificada em, no mínimo, 50 mm ou dado por:

$$l_{rep} = 2l_{extra} + l_{defeito} + 2l_{chanfro} \qquad > 50 \text{ mm} \qquad \text{(eq.3.26)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Assim, o comprimento total do reparo é dado pela equação 3.26, conforme mostrado na figura 3.14:

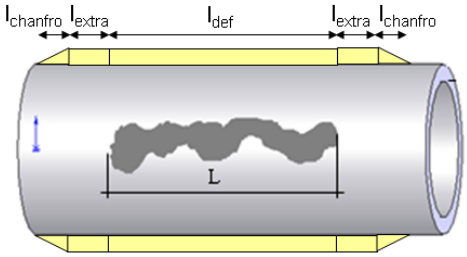


Figura 3.14 – Comprimento total do reparo

Onde l_{extra} pode ser calculado para sulcos ou defeitos circulares conforme abaixo:

Para sulcos:

$$l_{extra} = 2\sqrt{D \cdot t_{aço}} \qquad \text{(eq.3.27)}$$

Para defeitos circulares:

$$l_{extra} = 4d', \qquad \text{(eq.3.28)}$$

Onde:

d' = é o diâmetro do defeito e este deve ser menor que $0{,}5\sqrt{D \cdot t}$.

D = diâmetro do duto

$t_{aço}$ = espessura do duto

O comprimento $l_{chanfro}$ é requerido quando há carregamento axial, e deve ter uma inclinação mínima de 5:1 (X:Y).

Para assegurar que o comprimento do reparo é suficiente para transferir carregamento axial, usa-se a seguinte equação:

$$l_{extra} > \frac{E_a \varepsilon_a t_{rep,a}}{\tau} \qquad \text{(eq.3.29)}$$

Onde:

E_a = módulo de elasticidade do reparo no sentido axial

ε_a = deformação máxima admissível do reparo no sentido axial

$t_{rep,a}$ = espessura mínima do reparo no sentido axial

τ = tensão de cisalhamento entre as camadas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Se a região a ser reparada é tal que o l_{extra} disponível é menor que o mínimo aceitável, 50mm, a espessura da camada deverá ser aumentada através do fator $f_{esp.camada,extra}$, definido como:

$$f_{esp,camadaextra} = \left(\frac{l_{extra}}{l_{disponível}} \right)^{\frac{2}{3}} \qquad \text{(eq.3.30)}$$

Onde:

$l_{disponível}$ = comprimento fisicamente disponível para aplicação do reparo sobre o defeito.

Assim, a nova espessura da camada de reparo será dada por:

$$t' = f_{esp,camadaextra} \cdot t_{rep} \qquad \text{(eq.3.31)}$$

$t_{disponível} \geq 25$ mm, ou, $f_{esp.\ camada,extra} < 2{,}5$

Se há limite da área a ser reparada, é possível que não seja permitido o chanfro. Neste caso, deve-se tentar ao máximo fazer um alisamento no limite entre reparo e substrato, para minimizar a concentração de tensões. Porém, sempre que possível, deve-se buscar situações onde seja permitido o chanfro, principalmente quando há carregamento axial.

Desta maneira, considerando:

- l_{extra} limitado em apenas um lado do reparo, conforme figura 3.15, têm-se:

$$l = l_{extra} + l_{defeito} + l_{chanfro} + l_{disponível} \qquad \text{(eq.3.32)}$$

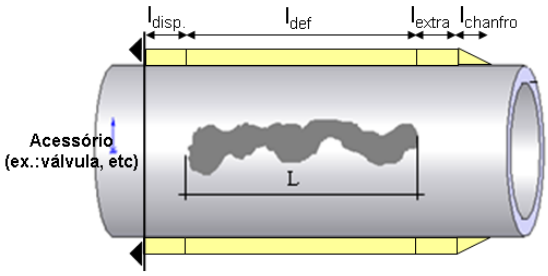


Figura 3.15 – Comprimento total do reparo limitado em apenas um lado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- l_{extra} limitado nos dois lados do reparo, conforme figura 3.16, têm-se:

$$l = l_{defeito} + l_{disponível,1} + l_{disponível,2} \qquad \text{(eq.3.33)}$$

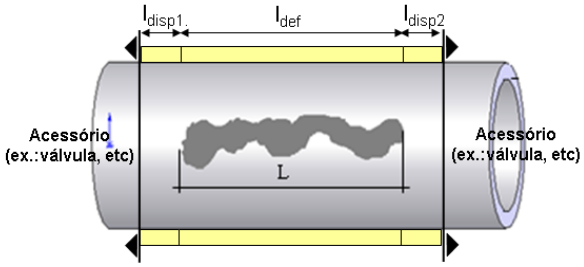


Figura 3.16 – Comprimento total do reparo limitado nos dois lados

- Número de voltas do reparo:

A espessura do reparo deve ser expressa em número de voltas, n, de acordo com a seguinte equação:

$$n = \frac{t_{rep}}{t_{camada}} \qquad \text{(eq.3.34)}$$

Onde:

t_{rep} será o maior valor encontrado entre $t_{rep,a}$ e $t_{rep,c}$

t_{camada} = é a espessura padrão de uma camada de reparo

Segue tabela 3.3 que apresenta uma planilha com resumo das etapas a serem cumpridas para o cálculo do número de camadas conforme ISO 24817:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

CARACTERÍSTICAS DO REPARO			
E_c (MPA) =	21671	t_{camada} (mm) =	0.31
E_a (MPA) =	21671		
CARACTERÍSTICAS DO DUTO			
D (mm) =	74.2	SMYS(MPA) =	262
t (mm) =	2.03	F =	0.72
Es (MPA) =	200000	E =	1.00
SMUS (MPA) =	310	T =	1.00
CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO			
d (mm) =	0.79		
L (mm) =	50		
PRESSÃO DE PROJETO			
$P_{Projeto}$ (MPA) =	10.32		
Pressão de Operação			
	B31.G	DNV-RP-F101	
P_{Def} =	8.99	8.19	
S_{flow} =	288.20	310	
A/Ao =	0.26	0.39	
M =	3.98	2.48	
F_{Proj} =	0.72	0.67	
CÁLCULO DO REPARO			
Espessura			
Considerando B31.G			
$t_{min,c}$ (mm) =	1.73	F_{eq} (N) =	44610.12
Considerando DNV-RP-F101			
$t_{min,c}$ (mm) =	2.79		
Comprimento			
Considerando defeito tipo slot			
l_{extra} (mm) =	24.55	l_{extra} não pode ser < 50mm	
l (mm) =	116.43	$l_{corrigido}$ (mm) =	167.34
Considerando defeito tipo circular			
l_{extra} (mm) =	200.00	l_{extra} não pode ser < 50mm	
l (mm) =	467.34		
$l_{chanfro}$ (5:1) (mm) =	8.67		
Número de camadas			
n =	8.99		

Tabela 3.3 – Planilha de cálculo segundo ISO 24817

Assim, conforme tabela acima, em conformidade com a ISO 24817, são requeridas aproximadamente 09 camadas de reparo.

Segue abaixo a figura 3.17 que apresenta um fluxograma esquemático referente ao procedimento de cálculo utilizado na Tabela 3.3:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

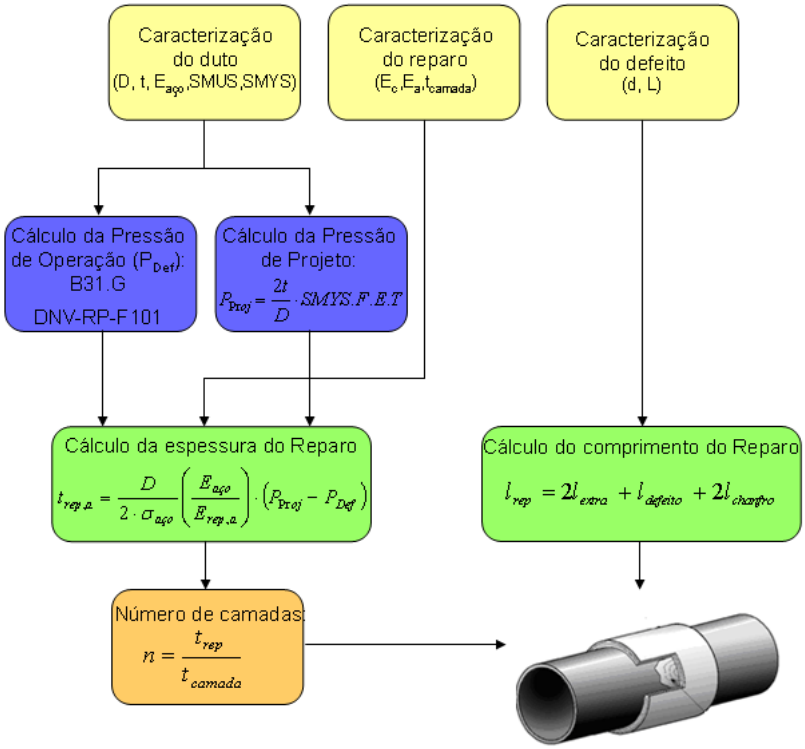


Figura 3.17 – Fluxograma de cálculo do reparo segundo a ISO24817

- Tipos de danos no reparo:

Tanto o processo de estocagem do material composto, como sua forma de aplicação, requerem alguns cuidados especiais para garantir a confiabilidade do reparo. A eficiência do reparo depende diretamente de uma boa adesão com o duto.

Com relação ao processo de estocagem, faz-se necessário um ambiente que tenha controle de temperatura, devendo-se evitar temperaturas extremamente baixas.

Há também danos relacionados a falhas durante a aplicação do reparo, bem como durante a fabricação do material composto. Como exemplo, tem-se o esquema abaixo representado na figura 3.18:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

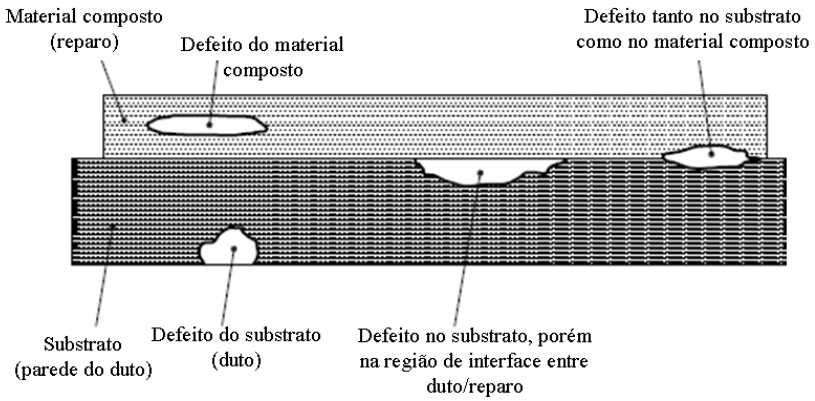


Figura 3.18 - Esquema duto versus reparo. [1].

Alguns problemas, durante a aplicação, podem ocorrer e vir a comprometer a qualidade/confiabilidade do reparo, dependendo da proporção de ocorrência. Dentre eles, tem-se a presença de vazios e porosidades que podem ficar retidas entre as camadas ou mesmo na região próxima à superfície do duto e do material composto. Tais defeitos podem estar associados à falta de pressão na compactação das camadas e a viscosidade do adesivo, que pode estar impossibilitando seu escoamento e espalhamento ao longo da superfície do duto e do próprio material.

Outros problemas também podem vir a surgir devidos a:

- Incompatibilidade com meios extremamente ácidos (pH<3,5), extremamente alcalinos (pH>11) ou algum solvente muito forte (ex.: metanol e tolueno, em concentrações maiores que 25%), mesmo sabendo que materiais compostos apresentam grande compatibilidade com diversos meios (ex.: aquosos e hidrocarbonetos);

- Perda de material do reparo quando este está em contato com um substrato que passa por um processo de degradação – erosão. Em situações deste tipo, recomenda-se a aplicação de uma placa metálica sobre o reparo.

- Procedimentos padrão para aplicação do reparo:

Sendo a aplicação do reparo feita diretamente sobre o duto, na região que contém o dano, fazem-se necessários alguns procedimentos padrão, para que se obtenha uma maior confiabilidade e qualidade no produto final:

- Mão de obra capacitada e treinada para aplicação deste tipo de reparo, segundo a ISO 24817 e procedimentos específicos, de acordo com as particularidades de cada reparo adotado por sua respectiva empresa;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- Tratamento da superfície com jateamento/lixa: retirada de resíduo metálico, ferrugem, graxas e óleos;

- Aplicação de camada de resina base (primer) – não obrigatório;

- Nivelamento da superfície com massa epóxi, quando da presença de reentrâncias;

- Aplicação do adesivo;

- Aplicação das camadas do material composto, até atingir a espessura desejada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA