

2.

Fundamentação Teórica

Este capítulo tem por objetivo estabelecer uma base teórica necessária ao bom entendimento do desenvolvimento do trabalho.

2.1

Reparos para Dutos

Quando um defeito em algum duto é encontrado, o mesmo deve ser avaliado para saber se ele pode continuar operando na mesma pressão sem intervenção, se ele deve obter alguma intervenção para diminuir a pressão de operação ou, ainda, se é necessário aplicar algum reparo. Abaixo será apresentado um resumo dos principais métodos de reparo, explicando suas vantagens e desvantagens, entre outras informações relevantes.

- **Tipos de Cenários para o Reparo de Dutos:** Os reparos são agrupados em três cenários [17]: (i) reparo para defeitos de perda de espessura externa (causados por corrosão, ou dano mecânico), (ii) reparo para defeitos de perda de espessura interna (causados por corrosão, ou erosão) e, (iii) reparo para defeitos com vazamentos. Alguns reparos só podem ser utilizados para cenários específicos, particularmente, para algum tipo de defeito pertencente a um destes cenários.

- **Reparos Permanentes:** Chamam-se assim os reparos que têm um tempo de vida igual ao tempo de vida da linha (ou igual ao tempo de vida remanescente da mesma). Estes reparos, embora sejam considerados permanentes, devem ser periodicamente inspecionados [18].

- **Reparos Temporários:** São aqueles que devem ser removidos e substituídos por algum reparo permanente na próxima manutenção da linha [19] e, no mínimo, devem ter uma duração de dois anos [18].

2.1.1 Tipos de Reparos

a. Corte e Substituição

Definição: Consiste em remover a seção do duto que contém o defeito e substituí-lo por outro segmento pré-testado.

Aplicação: A substituição de trecho de duto só é recomendável quando este tenha perdido sua estanqueidade, ou o dano seja muito severo, devido ao alto custo que representa parar uma linha de abastecimento e/ou as grandes dificuldades e requerimentos exigidos quando se realizar uma substituição.

Requerimentos:

- O duto deve estar desenterrado o suficiente para estar livre de restrições e não criar tensões no momento do re-alinhamento [20].
- Recomenda-se que o comprimento do duto substituído não seja menor que a metade do diâmetro do duto, ou 3 polegadas, independente de qual seja o maior [20].
- Requer-se a realização de um teste hidrostático depois da substituição do segmento.

Caso o teste hidrostático seja impraticável, todos os seguintes requerimentos devem ser cumpridos: o novo segmento de duto deve ser pré-testado hidrostaticamente; qualquer solda de topo utilizada necessita de uma qualificação, com radiografia em 100% do seu comprimento, ou da inspeção do cordão de soldadura por ultra-som, o qual deve ser aprovado segundo os requisitos estabelecidos na norma de fabricação; deve-se realizar o ensaio de partículas magnéticas, ou líquidos penetrantes no passe da raiz e na solda de topo completa [19].

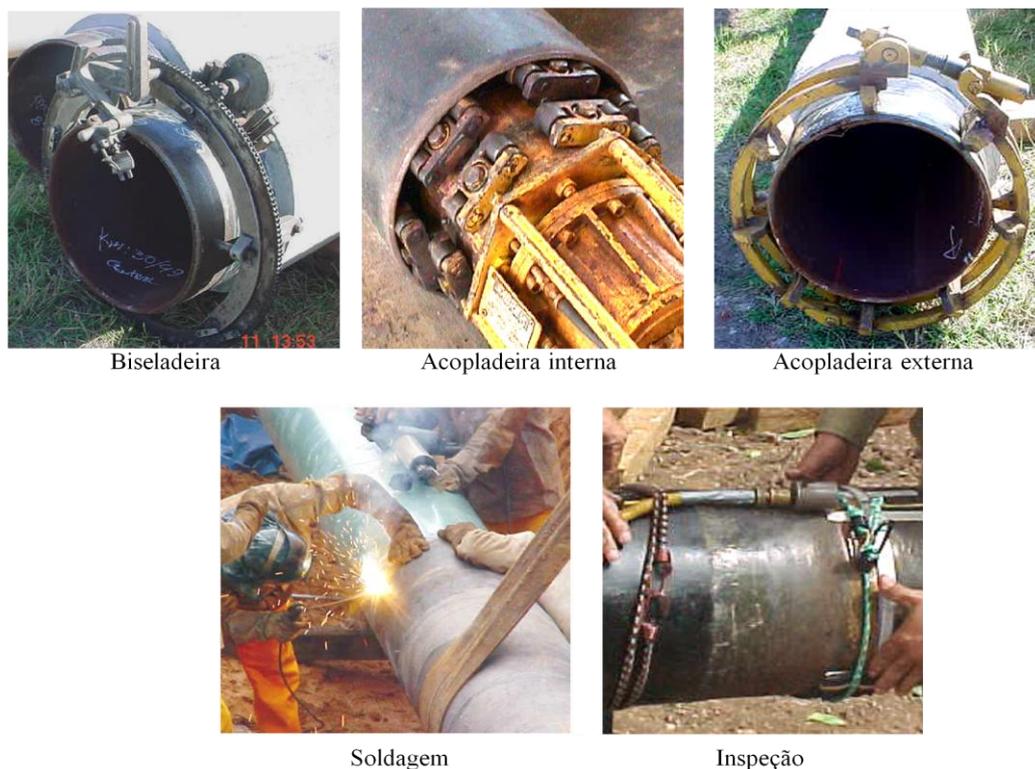


Figura 2.1 Processos na instalação de um novo trecho de duto

Vantagens: Elimina totalmente qualquer tipo de dano que tenha acontecido no duto.

Desvantagens: É necessária a parada operacional, o isolamento e a drenagem da seção de duto que se substituirá. O cumprimento dos requisitos implicam em altos custos.

b. Lixamento

Definição: Consiste em remover o metal ao redor do defeito proporcionando ao mesmo uma superfície com contornos suaves, com o objetivo de reduzir a concentração de tensões, geradas pelo defeito original e/ou remover outras anomalias no material do duto.

Aplicação: É utilizado para reparar defeitos, tais como: imperfeições de solda, queimaduras de arco, rasgos, ranhuras e, em alguns casos, para trincas superficiais [20]. Também é utilizado como procedimento prévio para a execução de outros reparos, como em casos de amassamentos com concentradores de tensões que precisem ser removidos, ou algum outro defeito que precise de reforço adicional.

Instalação: A ASME B31.4 - 1996 [21], permite a realização deste reparo com o duto em operação. Na referência [22], recomenda-se uma redução a 85% da tensão no defeito em relação a que vinha experimentando em operação.

Requerimentos e Restrições:

- Depois de realizado o reparo, o mesmo deve ser inspecionado visualmente e por partículas magnéticas ou líquidos penetrantes. O defeito de queimadura de arco deve ser inspecionado por ataque metalográfico [20].
- A relação mínima entre a profundidade e o comprimento da superfície lixada deve ser de 4 a 1 [20], sendo que a quantidade que pode ser lixada sem a aplicação de algum reforço estrutural, está limitada pela ASME B31.G [23], como se fosse uma perda de material. Em [38], permite-se este reparo para defeitos com profundidade de até 10% da espessura nominal sem a aplicação de algum reforço estrutural.
- As trincas, concentradores de tensões ou defeitos similares localizados em um amassamento, devem ser totalmente removidos por lixamento. Se a espessura remanescente for menor que 87,5% da espessura nominal da parede do duto, é necessário, então, que o conserto seja realizado com algum outro reparo [20].

c. Depósito de Solda

Definição: Consiste em restaurar a continuidade do duto utilizando técnicas de soldagem.



Figura 2.2 Defeito interno reparado com deposição de solda externa [22]

Aplicação: É utilizado para reparar pequenas áreas corroídas, rasgos, ranhuras, queimaduras de arco e imperfeições de soldas produzidas com metal de aporte, desde que não localizados em alguma zona de amassamento [20]. Antes da aplicação do reparo, as imperfeições de soldas, rasgos, ranhuras e queimaduras de arco devem ser

removidas por lixamento. As pequenas áreas corroídas geralmente não precisam ser lixadas, mas limpas [22]. Este tipo de reparo não pode ser aplicado em defeitos trincados, ou amassados, nem em defeitos próximos de algum cordão de solda.

Dados Adicionais: Um importante parâmetro a ser controlado durante a execução do reparo é a penetração da solda. Esta depende do calor no processo de soldagem e da capacidade do fluido transportado (quando executada com a linha em operação) de remover o calor da parede do duto. Esta capacidade dependerá da temperatura do fluido transportado, das suas propriedades térmicas, da pressão e da vazão [22]. Deve-se assegurar a não existência de trincas induzidas por hidrogênio nas zonas termicamente afetadas (ZTA), principalmente nas linhas reparadas em serviço, uma vez que nestas podem se apresentar altas taxas de resfriamento, devido ao fluido transportado [20] [24]. É recomendada a utilização de eletrodos de baixo hidrogênio [20]. Se o reparo é realizado adequadamente, a resistência do duto será restaurada, resistindo inclusive a carregamentos cíclicos [24], mas geralmente não se recomenda a aplicação deste reparo em dutos que serão solicitados ciclicamente [22].

Requerimentos e Restrições: Em [25], permite-se a utilização deste reparo unicamente quando realizado em fabrica durante a manufatura do tubo, já que ao final desta, sempre é realizado um teste hidrostático. É recomendada uma redução da pressão de operação, ou seja, a mesma não deve ser maior que 5.5 MPa [24].

Vantagens: É atrativo pela sua simplicidade, podendo ser aplicável em lugares nos quais um reparo de manga soldada não poderia, ou dificilmente seria aplicado, por exemplo, em tes e curvaturas.

Desvantagens: Representa um risco considerável quando aplicado em uma linha em operação. Este risco depende da espessura remanescente da parede e da penetração da solda.

d. Dupla Calha Soldada

Consiste em envolver o duto com duas meias calhas metálicas na região do duto com defeito. O reparo de dupla calha se subdivide em tipo A e tipo B.

d.1 Dupla Calha Soldada Tipo A

Definição: Este reparo é um reforço estrutural que consiste em envolver o duto com duas meias calhas metálicas que serão unidas entre si por meio de uma soldagem longitudinal, sem contato direto com o duto. A junta pode ser de topo, ou pode-se utilizar uma união sobreposta com solda de filete.

Aplicação: Não pode ser utilizada para reparar defeitos que apresentem vazamentos, nem em defeitos com orientação circunferencial [20], dado que este reparo não restringe as deformações longitudinais que podem ser elevadas, dependendo da extensão circunferencial do defeito.

Instalação: É recomendada a utilização de alguma resina endurecível (ex. epóxi, composto de poliéster, entre outros) entre o duto e as calhas metálicas [20] [22], como ilustrado na figura 2.3, com o propósito de garantir o contato e a transmissão de carregamento do duto ao reparo.

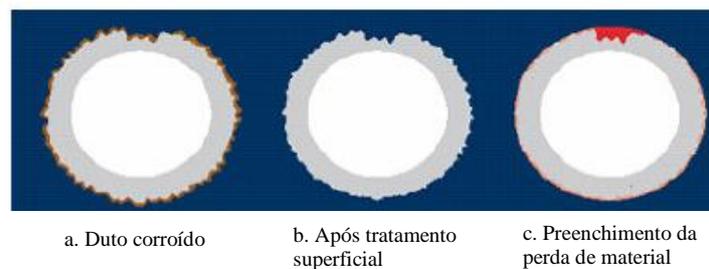


Figura 2.3 Preenchimento da perda do material na superfície do duto a ser reparado

O desempenho do reparo no controle da tensão de membrana pode ser melhorado por uma das seguintes formas [20] [22]: (i) reduzindo a pressão de operação no momento da instalação, (ii) aplicando uma carga trativa nas calhas, ou, (iii) pré esquentando as calhas para facilitar o ajuste.

Existem meios mecânicos para unir os extremos das calhas para em seguida serem soldadas (fig. 2.4a,b). Alguns resultados como os apresentados por L. Meniconi [26] mostram que a utilização destes equipamentos pode não ser muito eficiente, pois não alcança benefícios similares aos obtidos com a redução da pressão. Os resultados,

em [26], mostraram que o aperto alcançado se restringe unicamente à região abaixo das correntes. Isto é devido à flexibilidade das calhas metálicas. Na parte central, mais distante das correntes, o aperto é praticamente nulo. Depois de se ter realizado a junção por soldagem e de se ter retirado o aperto das correntes, as tensões se distribuem, obtendo uma tensão residual trativa na luva bastante pequena. Porém, este método pode ser útil para garantir que o reparo e o duto trabalhem solidariamente obtendo um melhor aporte de carga.

Na pesquisa realizada por Meniconi [26], também se testou a aplicação de luvas pré-aquecidas e os resultados foram ainda menos satisfatórios, obtendo deformações trativas na luva praticamente nulas ao final da instalação.

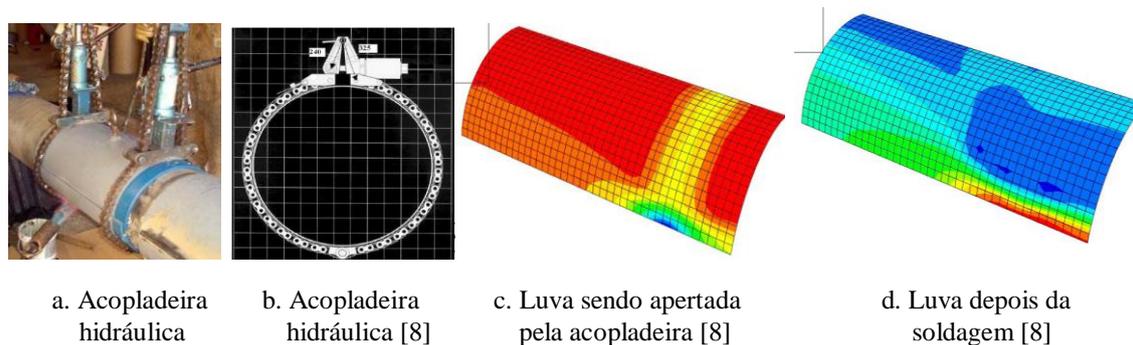


Figura 2.4 Reparo de dupla calha soldada tipo A

Dimensionamento: Em [20], se recomenda que a espessura das luvas não seja menor que $2/3$ da espessura do duto. No caso de defeitos curtos ($L < 20\sqrt{D.t}$, onde L é o comprimento do defeito, D é o diâmetro do duto e t é a espessura de parede) e, para defeitos longos ($L \geq 20\sqrt{D.t}$), é recomendado que a espessura do reparo seja igual, ou maior que a espessura do duto (isto dependerá da resistência do aço utilizado nas luvas). Para ambos os casos, a luva deve se estender pelo menos 50 mm dos limites do defeito sobre o duto sem defeito.

Variantes do Método de Reparo: No lugar de se utilizar a soldagem para unir as calhas, são utilizados parafusos. Além da vantagem de prescindir-se de soldagem, mediante o ajuste dos parafusos, é possível criar-se um pequeno aperto das calhas sobre o duto. Porém, a fabricação do reparo resulta bastante mais sofisticada [27].

A British Gás desenvolveu um método de reparo chamado “Epoxy Filled Shells” (mangas preenchidas com epóxi). Consiste na instalação de duas meias calhas com um espaço anular entre o duto e o reparo (de 3 a 40mm), estas são centradas por meio de parafusos. As duas meias calhas podem estar unidas por meio de solda, ou por parafusos. Nos extremos, o anular formado pode ser selado com epóxi de cura rápida, em seguida, o anular é preenchido com um epóxi de alta rigidez. O total enchimento é comprovado quando o epóxi sai por um furo localizado na parte superior de uma das mangas. Para melhorar o desempenho do reparo, a resina pode ser injetada sob alta pressão, ou pode-se reduzir a pressão de operação da linha e injetar a resina sob baixa pressão (menor que 7 bar) [22].

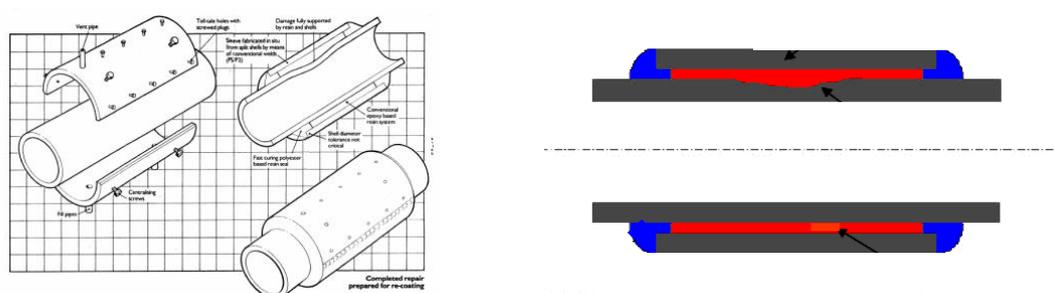


Figura 2.5 Reparo de mangas enchidas de epóxi [27]

Vantagens: A não necessidade de soldagem direta da calha metálica com o duto diminui o risco da criação de trincas, ou de outras anomalias do produto da soldagem. Este reparo vem sendo utilizado na indústria por muitos anos. As empresas já estão familiarizadas com a sua instalação [28].

Desvantagens: Requer soldagem em campo, o que representa uma grande desvantagem nas linhas submarinas. Não contém vazamentos, devido a isso não pode ser utilizado em defeitos de corrosão interna. Não oferece resistência axial. Seu custo é relativamente alto em relação aos reparos substitutos, como os de material compósito, que podem ser utilizados para o reparo de vários dos mesmos tipos de defeitos.

d.2 Dupla Calha Soldada Tipo B

Definição: Consiste em envolver o duto com duas meias calhas metálicas que serão unidas entre si, por meio de uma solda longitudinal e unidas ao duto através de uma solda circunferencial.



Figura 2.6 Reparo de dupla manga soldada tipo B

Aplicação: Pode ser utilizada para o reparo da maior parte de defeitos, mas por sua capacidade de conter a pressão interna é principalmente recomendada para reparar vazamentos, ou defeitos que possam vir a apresentar vazamentos. Também é utilizada para o reparo de defeitos com orientação circunferencial, suportando as tensões longitudinais que podem ser originadas pela própria pressão interna, ou por carregamentos laterais [20]. A referência [19] não recomenda utilizar esta técnica para o reparo de trincas longitudinais, a menos que seja demonstrado que a trinca não se propagará por baixo do reparo durante a operação do duto.

Instalação: Podem-se utilizar os mesmos mecanismos de aplicação dos reparos do tipo A. Para a solda que junta as duas calhas é bastante recomendável utilizar a solda de topo, sobretudo nos reparos que conterão a pressão interna, dado que estas juntas são mais resistentes que as juntas sobrepostas, onde se criam momentos flectores, devido a ação direta da pressão [20]. Nos extremos do reparo, pode se utilizar a solda de filete, assegurando-se da não existência de trincas. Aí, recomenda-se a utilização de eletrodos de baixo hidrogênio, sendo que o processo de soldagem e testes pós-soldagem devem seguir as orientações de alguma norma reconhecida [22]. Em [20] e [29], se recomenda que este reparo não seja instalado próxima a outra luva, numa distância menor, ou igual à metade do diâmetro do duto, uma vez que se pode formar uma espécie de entalhe entre os dois reparos.

Dimensionamento: Em [20], informa-se que o reparo deve ser pelo menos 50mm mais comprido que o extremo do defeito, sendo que não existe um limite superior para o comprimento das calhas. As calhas devem ser projetadas para suportar a mesma capacidade de carga que o duto suporta.

Variantes do Método de Reparo: Existem calhas com configurações especiais como as utilizadas para o reparo de defeitos nas soldas circunferenciais (figura 2.7.a) e existem as utilizadas para o reparo de uniões, ou acoplamentos (estas uniões foram bastante utilizadas na junção de tubos) e no reparo de ovalizações e enrugamentos (figura 2.7.b) [22].

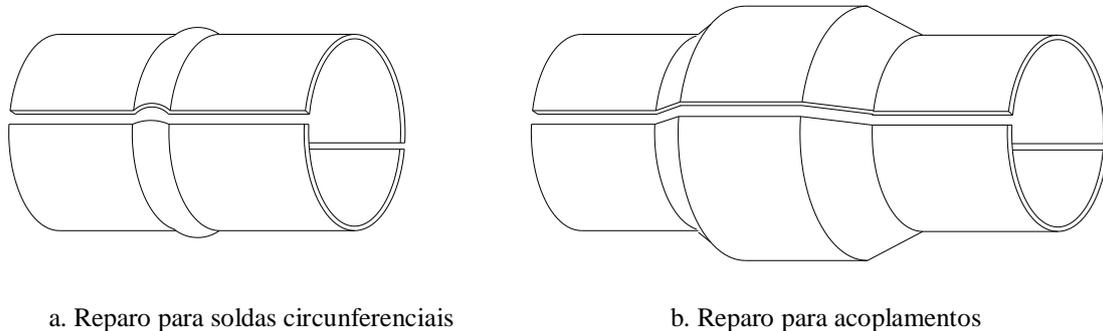


Figura 2.7 Variantes do reparo de dupla calha soldada tipo B

Vantagens: Aplicável a quase todos os tipos de defeitos. Este reparo vem sendo utilizado na indústria há muitos anos. Disto decorre a familiarização das empresas com a sua instalação [28].

Desvantagens: Tem maior probabilidade de apresentar problemas de fabricação que o reparo de tipo A, por exemplo, que tem pouca exatidão na fabricação das calhas e que pode levar a obtenção de uma união soldada de baixa qualidade. Neste caso, a capacidade de carga do reparo encontra-se diminuída. Requer-se a soldagem bastante qualificada. Em casos específicos de vazamentos, o fluido pode corroer o reparo.

e. Reparos de Material Compósito

Definição: Consiste em envolver o trecho corroído com mangas de materiais compostos formados por uma matriz de resina reforçada com fibra.

Aplicação: Podem ser utilizados no lugar de um reparo de calhas metálicas tipo A, na maioria das aplicações. Este tipo de reparo não deve ser utilizado para reparo de trincas nem mesmo em defeitos orientados circunferencialmente. Algumas bibliografias [21,

22] proíbem sua utilização em defeitos que apresentam vazamentos e defeitos de perda de espessura maior.

Materiais: As fibras mais freqüentemente utilizadas são: fibra de vidro (GRP), fibra de carbono (CFRP) e fibra de Aramida (AFRP) [18]. A matriz (que junto com as fibras formam o material compósito) pode ser de: poliéster, vinil-éster e epóxi, sendo que esta última é a mais utilizada [18]. As fibras de vidro, segundo suas propriedades, são encontradas na indústria, com a seguinte designação: a letra A indica resistência à alcalinidade; a letra C, resistência química; a letra E, resistência elétrica; a letra S, alta resistência mecânica. Esta última propriedade é de grande importância uma vez que proporciona a resistência mecânica da fibra (juntamente com a relação volume de fibra por volume de matriz). Da orientação das fibras dependerá a resistência mecânica do compósito, responsável pelo controle das deformações na região reparada. Na figura 2.8, faz se uma comparação da resistência mecânica entre fibras normalmente encontradas [30].

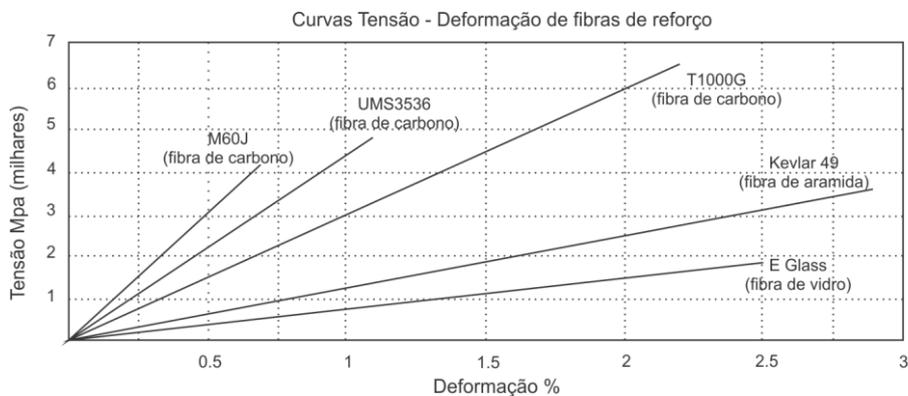


Figura 2.8 Comparação entre as resistências mecânicas de fibras comerciais [30]

Toutanji e Dempsey [31], mostram que os materiais compósitos que se utilizam da fibra de carbono tem melhor desempenho e proporcionam ao duto uma maior capacidade de carga, quando comparados aos reforçados com fibra de vidro e fibra de aramida.

As fibras no compósito podem estar orientadas uni-direcionalmente (fibras em uma única direção), bi-direcionalmente (quando as fibras formam um ângulo de 90° em relação às outras) e randonicamente (quando são distribuídas aleatoriamente) [30]. As fibras orientadas uni-direcionalmente e bi-direcionalmente geralmente são comercializadas em formas de mantas. Já as fibras distribuídas aleatoriamente são

comercializadas em formas de tecido. Estas fibras, acrescidas de resina podem ser aplicadas no duto mediante uma laminação manual, ou processadas em fábrica, mediante pultrusão [9].



a: fibra em forma de tecido laminada manualmente

b: fibra contínua e alinhada em forma de manta

c: produzido por pultrusão

Figura 2.9 Tipos de material compósito formado por fibra de vidro [9]

Na referência [33], são apresentados dados de um reparo comercial de material compósito em forma de lâminas processadas por pultrusão. Estas lâminas têm resistência à tração, no sentido circunferencial, de 414 MPa e módulo de elasticidade de 34 GPa. Ou seja, aproximadamente 1/6 do módulo de elasticidade do aço. Isso significa, segundo [33], que antes que a carga seja totalmente concentrada no reparo o aço deformará a quase 1% além do escoamento.

Para preencher o espaço que se originou pela perda de material, freqüentemente se utiliza alguma resina endurecível, como por exemplo, a de um adesivo epóxi [15].

Dimensionamento: Na literatura podemos encontrar diferentes equações para o cálculo da espessura de reparo necessária, mas como regra geral, a espessura mínima do reparo depende, diretamente, da relação entre os módulos de elasticidade do material do reparo e do material original do tubo [14] e [34]. Em [18], se apresentam equações para calcular a extensão axial do reparo. Diz-se que, de forma conservativa, pode-se utilizar um valor igual a 50 mm, a partir do extremo do defeito. O reparo comercial citado na referência [33] utiliza larguras de 12” e espessuras de 0.5” para todas as aplicações. Recomenda-se, também como mínima, uma extensão além do defeito de 2” sendo que podem ser instalados vários reparos adjacentes nos casos de defeitos longos.

Dados Adicionais: Seu comportamento é praticamente o mesmo que de um reparo de calhas soldadas tipo A, com a diferença que o aporte de carga por parte do reparo será efetivo após as maiores deformações acontecerem na região com defeito. Isto deve ser considerado, segundo os requerimentos da norma que está sendo utilizada. Por exemplo,

a referência [17] indica que a *British Gas Standard prEM13121: GRP tanques e vasos para uso não enterrado*, só permite deformações de 0.25% na região do defeito depois de efetuado o reparo. De forma geral, se o desejo é aumentar o aporte de carga por parte do reparo, deve-se incrementar a sua rigidez, o que se alcança aumentando a espessura do reparo ou, utilizando um material compósito com um módulo de elasticidade mais alto.

- **Reparo de defeitos passantes:** Algumas pesquisas estão orientadas à utilização deste tipo de reparo para defeitos com vazamentos, onde a condição mais importante para o sucesso do reparo é o tratamento superficial da região que contém o defeito [17] [18]. Mas, os resultados até agora alcançados limitam sua utilização, sem poder devolver a condição operacional normal.

Instalação: A preparação da superfície é um dos pontos mais importantes para a boa performance do reparo. Em dutos de aço carbono é possível conseguir uma boa e durável colagem com um simples tratamento superficial, desde um tratamento unicamente por abrasão mecânica, até a utilização de agentes de acoplamento, para obter maior durabilidade ou propriedades anticorrosivas da junta colada [17].

Requerimentos para ser validado como um reparo temporário, ou permanente: Um teste na escala real com um defeito usinado é suficiente para validar um reparo como temporário. Para validar um reparo como permanente deve-se demonstrar que este cumprirá os requisitos do teste hidrostático pelo resto da vida da linha. Normalmente estes dados são tirados dos testes de 1 a 2 anos e logo extrapolados para 20, ou 50 anos. A referência [22] indica que para determinar o desempenho ao longo do tempo deve-se considerar: a tensão de ruptura a tempo longo, a fluência e a fadiga cíclica.

A tensão de ruptura a longo tempo pode ser obtida da seguinte forma: é aplicada uma carga que origine uma tensão um pouco menor que a tensão de ruptura a curto prazo e mede-se o tempo que leva até o espécime romper sob a pressão desta carga constante. O seguinte passo é testar outro espécime sob a pressão da carga menor à carga anterior e mede-se o tempo que leva até a falha. Depois de vários destes testes, se obtém a curva “tensão aplicada vs tempo de falha”, extrapolando os dados até um tempo de 50 anos (por exemplo), num gráfico log-log (figura 2.10.a). Desta forma, pode ser projetado um reparo permanente [22].

Como já apresentado anteriormente, o material compósito está formado por uma matriz polimérica com mais fibras de reforço. Os polímeros são materiais viscoelásticos e se deformam continuamente sob baixa tensão. Por outro lado, as fibras são totalmente elásticas. Então, a fluência do compósito depende da proporção de resina e fibra [30]. Por exemplo, os compósitos com fibras unidirecionais têm boa resistência à fluência a longo tempo (sob carregamento trativo), já que o comportamento totalmente elástico das fibras controla o comportamento do compósito. Compósitos com fibras orientadas aleatoriamente (random) são os menos resistentes a fluência, mas esta resistência poderia ser melhorada (se possível), aumentando a fração da quantidade de fibra no compósito [30].

Há alguns anos, o problema de fadiga nas tubulações não era considerado, mas com as mudanças nos regulamentos e mudanças nas operações, fez-se necessário um estudo sobre a fadiga [22]. Na referência [35], encontramos os resultados de testes com a fadiga em dutos reparados com material compósito, nos quais se demonstra um acréscimo considerável de fadiga na vida nos tubos reparados com fibra de carbono.

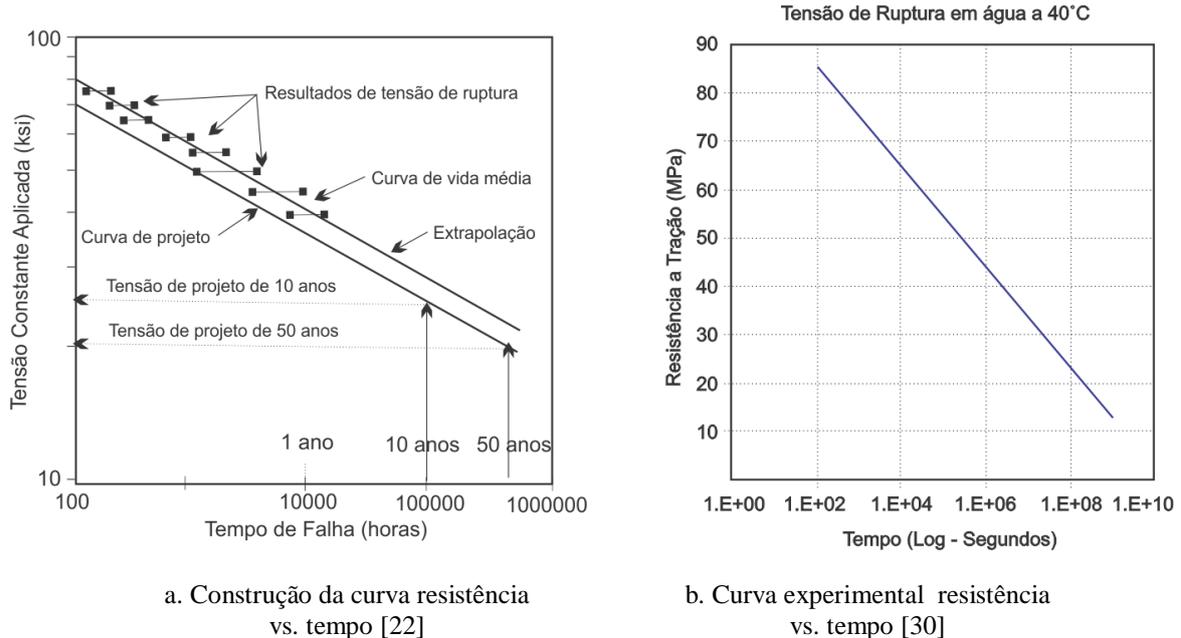


Figura 2.10 Curva de exsudação por trincamento da matriz vs tempo nos materiais compósitos

Na figura 2.10.b mostra-se que o compósito (fibra de vidro com resina poliéster), tem uma vida de 25 anos em relação a uma tensão constante de 15 MPa, o que representa 12.3% da resistência inicial de 122MPa.

Também se deve considerar a possível degradação do compósito devido aos ambientes externos agressivos, como por exemplo, a exposição à luz UV, ambientes úmidos e secos, temperatura elevada e/ou extremos de temperatura, exposição em longo prazo na água do mar, exposição aos produtos químicos. Também o reparo poderia estar exposto ao fogo e às chamas abertas, o que pode ser mitigado com aditivos misturados na resina e/ou recobrimento externo contra o fogo. A referência [36] indica que o comportamento do compósito é influenciado pelo processo de irradiação gama e que a variação nas propriedades mecânicas resulta, principalmente, da degradação produzida na matriz epóxi.

Vantagens: A instalação deste reparo é bastante simples, não necessitando de pessoal altamente qualificado para sua aplicação. Dá-se em um tempo relativamente curto. Podem-se reparar longos comprimentos de duto aplicando reparos múltiplos [28]. Não apresenta nenhum risco de explosão, já que prescinde de soldagem. Na referência [15] mostra-se que reparos de material compósito são, em média, 24% mais econômicos que um reparo de dupla calha soldada e, 73% mais econômicos que a substituição, ou troca da seção danificada. Outra vantagem é a de poder ser utilizado em dutos com geometrias variadas, como apresentado na figura 2.11.



a. Curvatura STD 6" (50% corrosão)
Sem reparo: 4,532 psi
Reparado: 6,780 psi



b. Te STD 6" (50% corrosão)
Sem reparo: 6,546 psi
Reparado: 7,500 psi

Figura 2.11 Reparos utilizando a marca comercial Armor Plate Pipe Wrap [3]

Desvantagens: Trabalha após grandes deformações plásticas terem ocorrido no duto devido ao baixo módulo de elasticidade do compósito, podendo apresentar degradação

com o tempo. Em geral não é aplicado para conter vazamentos e não oferece resistência axial [28].

f. Abraçadeiras Mecânicas

Definição: São estruturas robustas que abraçam o duto na região do defeito, sendo apertadas por meio de grandes parafusos. Nos seus extremos possuem selos mecânicos que podem conter o vazamento do fluido. Estes selos mecânicos são ativados unicamente pela própria pressão do fluido e acionados somente por um carregamento axial que comprime o selo, fazendo com que este se expanda no sentido radial e diminua em seu diâmetro interno.

Aplicação: São utilizadas para o reparo de defeitos com, ou sem vazamentos [20]. Não devem ser utilizadas para reparar defeitos com orientação circunferencial, a menos que o projeto da abraçadeira mecânica contemple a restrição do carregamento axial.

Requerimentos: A abraçadeira mecânica deve ser fabricada tendo condições para suportar a pressão de projeto do duto. A abraçadeira mecânica pode ser totalmente soldada, circunferencial e longitudinalmente, incluindo os parafusos, com o propósito de assegurar o selamento, caso os selos de elastômeros falhem [20].

Dimensionamento: Normalmente são espessas, pesadas e com grandes parafusos, que são necessários ao bom ajuste do reparo. Os extremos da abraçadeira mecânica devem se estender pelo menos 2" (50mm), dos extremos do defeito [20].

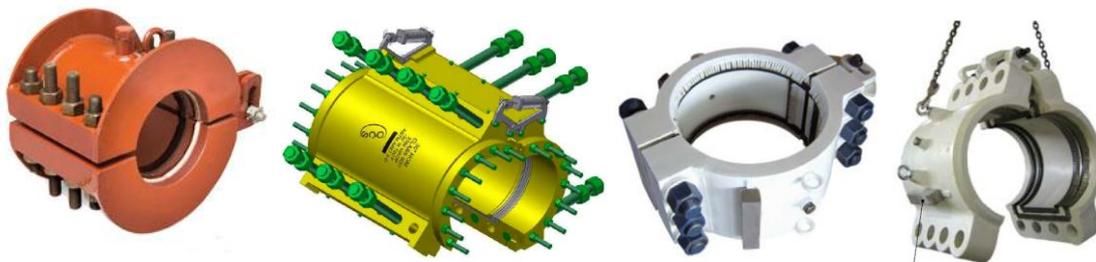


Figura 2.12 Abraçadeiras mecânicas

Vantagens: São de rápida e fácil aplicação, por isso mesmo, bastante utilizadas em casos de emergência, ou em lugares nos quais as condições de trabalho são adversas, como, por exemplo, nas tubulações off-shore.

Desvantagens: São muito dispendiosas e pesadas. Um pequeno desvio circunferencial do duto pode impedir sua utilização, ou seu correto funcionamento. Em geral são limitadas para o reparo de defeitos não muito compridos [28].

g. Hot Tapping

Definição: Também conhecido como “stopple bypass” [20]. Mais que uma técnica de reparo, esta é uma técnica para remover secções de duto danificadas, sem interromper a operação da linha. São quatro “tes” (divididos para serem aplicados no duto). Dois em cada lado são soldados, antes e depois do trecho que contém o defeito. Dois destes “tes” são utilizados para criar um “bypass” e servem para isolar o trecho, bloqueando a passagem do fluido transportado, depois que o “bypass” for instalado. Antes do corte do trecho, o fluido é drenado. Após a substituição do trecho, é liberado o fluxo e é retirado o “bypass”.

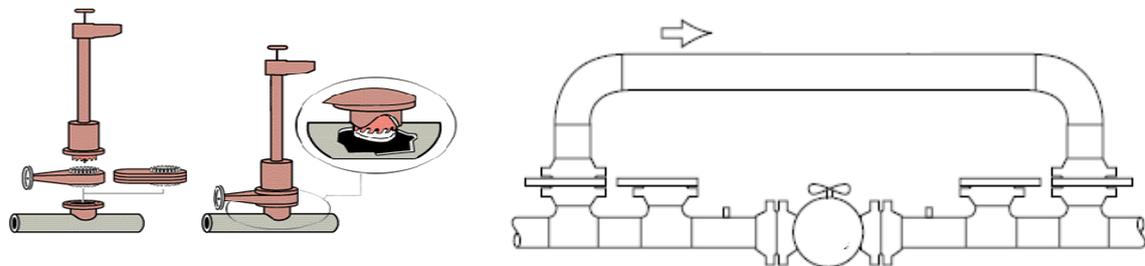


Figura 2.13 Hot tapping [27]

2.2

Normas para Projeto de Reparos de Material Compósito

Nos últimos anos vários trabalhos serviram para a geração das recentemente desenvolvidas ISO/TS 24817 [18] e ASME PCC-2 [37], únicas normas para reparos de material compósito. Nesta seção se faz um resumo das partes mais relevantes (para o objetivo desta tese) destas duas normas, assim como se apresentam equações para o cálculo da espessura de reparo de outras referências.

2.2.1 Norma ISO/TS 24817

A ISO/TS 24817 é uma norma para reparos de material compósito em dutos e tubulações nos quais os tipos de material compósito, aqui descritos, referem-se a qualquer sistema de resina termorrígida, reforçada com fibras. A norma abrange desde a qualificação, projeto, instalação, realização de testes até aos processos de inspeção e pode ser aplicada para o reparo de tubulações, tanques e vasos de pressão. Os defeitos contemplados são: corrosão externa, corrosão interna e dano mecânico (amassamentos, ranhuras e desgaste).

Segundo o tipo de serviço e as condições de operação do reparo, o mesmo deve ser classificado em uma das classes apresentadas na tabela, como segue abaixo:

Tabela 2.1. Classes para reparos de material compósito

Classe do Reparo	Serviço Típico	Pressão de Projeto	Temperatura de projeto
Classe 1	Aplicações sem especificação, por exemplo: drenos, resfriamento, etc	< 1 MPa	< 40°C
Classe 2	Água para incêndio	< 2 MPa	< 100°C
Classe 3	Produção de água e hidro-carbonetos, fluidos inflamáveis e sistemas de gás. Apropriada para sistemas de transporte, incluindo as situações mais críticas	Limite superior de operação do sistema	Limite superior de operação do sistema

A documentação requerida por norma para cada uma das classes do reparo é a seguinte:

Tabela 2.2. Documentação requerida por norma para cada classe de reparo

Documentação requerida	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Cálculos de projeto		X	X
Dados e documentação do material	X	X	X
Documentação da preparação da superfície	X	X	X
Dados de teste de curto prazo	X	X	X
Dados de teste de longo prazo		X	X

Entre os **cálculos de projeto** está a determinação da espessura de reparo que pode ser calculada: (i) conforme a tensão admissível do substrato (parede do duto), (ii) segundo a deformação admissível na lâmina de reparo e/ou ainda, (iii) segundo a tensão

admissível do reparo, baseado no teste de desempenho (o qual determina a tensão de falha a longo prazo do reparo).

Para fins comparativos, se apresenta a equação para o cálculo da espessura do reparo, segundo a tensão admissível do substrato:

$$t_{\min} = \frac{D}{2.S} \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \cdot (P_{eq} - P_s) \quad (2.1)$$

no qual:

E_s : módulo de elasticidade do duto

E_c : módulo de elasticidade da lâmina do reparo em direção circunferencial

D : diâmetro externo do duto

S : tensão admissível do duto

P_{eq} : pressão de projeto (no caso de não existir outros carregamentos adicionais)

P_s : pressão de defeito (máxima pressão de defeito admissível).

Na **documentação do material** devem estar inclusas as especificações da resina e do reforço compreendendo a norma, a compatibilidade do material com o ambiente, as provas da não existência de interação entre o reparo e o duto que podem causar degradação (ex. corrosão galvânica entre o duto e a fibra de carbono). Esta documentação deve estar de acordo às normas apresentadas na tabela 2.3.

É conhecido que a eficácia da junta colada depende diretamente da qualidade da **preparação da superfície**, pelo qual este processo deve ser detalhado desde a preparação até a realização do tratamento superficial.

Outro ponto importante é a realização de **testes a curto prazo**. Estes são feitos para determinar a resistência à tração e o módulo de elasticidade do material compósito, nas direções axial e circunferencial, como também determinar a resistência ao cisalhamento da junta colada. Para a qualificação do reparo como temporário (curto prazo), para defeitos não passantes, um dos testes exigidos é apresentado no anexo C da ISO/TS 24817. Neste teste, a pressão será aquela que origine o escoamento do duto sem defeito. O reparo será considerado aprovado até esta profundidade de defeito se sobreviver à pressão do teste e quando se confirmar que o reparo tem uma resistência ao

cisalhamento inter-laminar, de adesão aceitável. A realização (ou pressurização) do teste deve ser realizado segundo a ASTM D1599. O tempo mínimo admissível para a duração do teste é de 60 segundos.

Para os reparos de classe 2 e 3, a norma indica que devem ser realizados **testes de longo prazo** que determinem a resistência da junta colada entre o material compósito e o material do duto. Opcionalmente pode se determinar a máxima deformação da lâmina de reparo no tempo e também, opcionalmente, se realizarão os testes de desempenho apresentados no anexo E da norma, que têm o objetivo de determinar a tensão (ou deformação) de falha a longo prazo da lâmina de reparo. Em todas as situações, a norma define para longo prazo um tempo maior que, ou igual a 1000 horas.

Tabela 2.3. Propriedades de testes requeridos segundo norma

	Propriedades de Material	Teste Requerido
Propriedades Mecânicas	Módulo de Elasticidade	ASTM D3039, ISO 527-1, ISO 527-4
	Coefficiente de Poisson	ASTM D3039, ISO 527-1, ISO 527-4
	Módulo ao cisalhamento	ASTM D5379
	Coefficiente de Expansão Térmica	ASTM D696, ISO 11359-2
	Temperatura de Transição de vidro da resina ou Temperatura de Distorção de calor da resina	ASTM D6604, ASTM E1640, ASTM E831, ISO 11357-2, ISO 75-3, ASTM E2092
	Dureza Barcol ou Dureza Shore	ASTM D2583, ISO 868, EM 59
Resistência da adesão	Resistência ao cisalhamento	ASTM D3165, EM 1465
Dados de desempenho	Resistência Longo Prazo (opcional)	ISO/TS 24817 (anexo E)
	Razão de liberação de energia (opcional)	ISO/TS 24817 (anexo D)
	Short-term pipe spool survival	ISO/TS 24817 (anexo C)
Compatibilidade ambiental	Descolamento catódico	ASTM G8
	Resistência a ambientes aquosos (segundo seja o caso)	ASTM D543, ASTM C581, ASTM D3681, ISO 10952

Segue abaixo um resumo de alguns requerimentos que complementam as informações apresentadas nessa norma:

- Para todas as classes de reparo é necessário fazer o teste de resistência ao cisalhamento de curto prazo, segundo a ASTM D3165, ou EN 1465. Esta resistência (resistência média ao cisalhamento) não deve ser menor que 5MPa. As lâminas utilizadas devem ser as mesmas que as utilizadas no reparo.
- Para um reparo de classe 3, a durabilidade da junta colada deve ser comprovada. Isto pode ser feito mediante os testes de desempenho apresentados no anexo E da norma, caso contrário deve ser determinada a resistência ao cisalhamento a longo prazo, segundo a ASTM D3165, ou EM 1465. Esta resistência não deve ser menor que 30% do valor determinado no teste a curto prazo.
- No caso de se utilizar o reparo em aplicações nas quais as temperaturas de projeto sejam maiores que 40°C, a temperatura de trabalho não deve ser maior que a temperatura de transição vítrea (Tg) da resina subtraída de 20°C. Se a temperatura de projeto for menor, ou igual a 40°C, só deve ser testada a cura do adesivo mediante a dureza final que este alcança mediante os testes de dureza Barcol, ou Shore. Esta dureza não deve ser menor que 90% da dureza obtida na qualificação do reparo.
- No caso de ser exigido um testes hidrostático, depois da aplicação do reparo, este deve ser realizado a uma pressão de 1.1 vezes maior que a pressão de operação, por um período não menor a 60 min, durante o qual nenhuma mudança de pressão, ou temperatura deve acontecer e nenhum tipo de desprendimento ou dano deve acontecer no reparo. Informações detalhadas de como realizar um teste hidrostático podem ser encontrada na API RP 1110. Em alguns casos pode se requerer um teste hidrostático de 1.5 vezes maior que a pressão de operação.

2.2.2 Norma ASTM PCC-2

A ASTM PCC-2 é uma norma que proporciona os requerimentos para o reparo de dutos e tubulações utilizando um sistema de reparo qualificado [37]. Os materiais recomendados para o reparo são: fibras contínuas de reforço de vidro, aramida ou carbono em uma matriz de polímero termorrígido (por exemplo, poliuretano, poliéster,

viniléster ou epóxi). Esta norma faz recomendações para dois tipos de aplicações: aplicações de alto risco e aplicações de baixo risco. Entre as principais características para uma aplicação ser considerada de baixo risco estão: não transporta fluidos inflamáveis ou fluidos que apresentam riscos para vida e a saúde e, que a pressão interna seja menor que 1MPa.

Muitos dos requerimentos nesta norma encontrados nas aplicações de alto risco são bastante similares a os apresentados na seção 2.2.1, inclusive o método de cálculo da mínima espessura de reparo (equação 2.1), isto devido a que tiveram um mesmo origem.

2.2.3 Outras Referências

Nas referências [49] e [38] pode ser encontrada a seguinte equação para cálculo da espessura de reparo:

$$\frac{p.D}{2} = \sigma_{steel} \cdot t \cdot C + \sigma_R \cdot t_R \quad (2.2)$$

Onde:

p : pressão de falha de um duto com defeito e reparado

D: diâmetro do duto

σ_{steel} : tensão no duto

t : espessura do duto

σ_R : tensão no reparo

$$C = \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t \sqrt{1 + 0.31 L^2 / Dt}}}$$

Esta equação pode ser utilizada para o cálculo de uma espessura mínima e/ou uma espessura máxima. A espessura calculada é mínima quando se utiliza o valor S_u do duto e S_{flow} do reparo na equação (2.2) no lugar de σ_{steel} e σ_R (S_{flow} é um valor entre S_y e S_u do material do duto). A espessura calculada é máxima, quando se utiliza σ_{steel} igual a zero e σ_R é substituído por um valor entre $0.001E_R$ e $0.004E_R$, onde 0.001 e 0.004 são as deformações máximas sugeridas para o material compósito, formado por resina epóxi e fibra de vidro, especificada na norma ISO/TS 24817 [18].

2.3

Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos

Alguns métodos tradicionais de união vêm sendo substituídos pela utilização de juntas coladas, isto graças ao avanço da tecnologia que atualmente proporciona uma ampla gama de adesivos para diferentes aplicações industriais. Dentre outras razões, estão a transferência suave de carga em largas áreas de colagem, a excelente relação resistência-peso, a maior tolerância ao dano, o menor custo sendo este reduzido por conta de processos de fabricação mais baratos, a resistência superior à fadiga, a aparência visual adequada, além da resistência à corrosão no caso de uniões ou juntas de substratos incompatíveis [39].

2.3.1 Junta Colada

O comportamento de uma junta colada depende de dois fatores básicos [40]:

- Da *resistência adesiva* obtida entre o material adesivo curado e as superfícies metálicas. Esta, por sua vez, depende das propriedades adesivas da cola e da superfície metálica especialmente tratada.
- Das propriedades mecânicas do material adesivo curado, o qual é chamado de *resistência coesiva* da junta.

A resistência adesiva está fortemente ligada à qualidade do tratamento superficial e à resistência coesiva que dependerá das condições do curado. Uma boa prática na fabricação de juntas coladas é trabalhar na melhoria destes dois tipos de resistência. Um indicativo de que a junta foi colada de forma adequada é que a falha normalmente é coesiva, dado que, naturalmente, as forças de adesão são maiores que as forças de coesão. Quando a falha é adesiva, normalmente significa que a junta resistiu menos do que poderia ter resistido [41].



Figura 2.14 – Tipos de falhas nas juntas coladas

2.3.2 Projeto de Junta

Uma junta pode estar afetada por diferentes tipos de carregamentos, tais como: carregamentos mecânicos, carregamentos térmicos, químicos, radioativos, além de outros que podem afetar fortemente a vida útil da junta se não são bem considerados durante o projeto.

a. Carregamentos Mecânicos: Os tipos de carregamentos mecânicos que podem ser aplicados estão resumidos na seguinte figura:

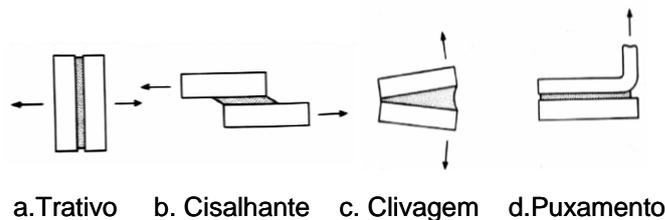


Figura 2.15 – Tipos de carregamentos

b. Comportamento das Tensões nas Juntas Coladas: Normalmente o ponto crítico nas juntas coladas se localizam nos extremos desta, pela concentração de tensões que ali se apresentam, sendo que a primeira falha localizada que aconteça, provocará a ruptura total da junta [40] [41]. É recomendável que no projeto de uma junta colada sejam evitados, na medida do possível, os carregamentos de clivagem e de puxamento, já que este tipo de carregamento origina uma concentração de tensões ainda maior que as que se apresentam com baixos carregamentos trativos e cisalhantes. Por isto, alguns projetos consideram a utilização de restrições com o propósito de que as juntas não experimentem estes tipos de carregamentos [41]. Para a seleção, deve se considerar que um adesivo flexível tem maior resistência a carregamentos de clivagem e de puxamento, maior resistência às falhas coesivas, como também maior resistência à fadiga e

impactos. Já um adesivo rígido tem maior resistência às cargas trativas e de cisalhamento, maior resistência às falhas coesivas, maior resistência à fluência e a temperatura [41].

A resistência da junta depende também da *espessura da camada de adesivo*. Seguem-se as recomendações práticas para se conseguir uma boa espessura: (i) ajustar a viscosidade do adesivo, (ii) aplicar uma tensão pré-calculada durante a cura, ou (iii) aplicar suportes dentro da camada de adesivo [41].

Outro ponto importante a se considerar são os *efeitos residuais*. Estes efeitos geralmente se manifestam em forma de concentração de tensões e de envelhecimento (devido às cargas térmicas, químicas, radioativas, etc). Uma recomendação prática para reduzir a concentração de tensões é selecionar um adesivo com coeficiente de expansão térmica similar ao coeficiente dos substratos ou, ainda utilizar um adesivo relativamente flexível, capaz de se acomodar à concentração de tensões internas [41].

2.3.4 Tratamento Superficial

Um tratamento superficial pode ir desde uma simples limpeza com solvente até a utilização de algum tratamento abrasivo, limpeza e condicionamento químico com algum ácido apropriado. Na referência [42] recomenda-se o seguinte tratamento superficial para os aços carbono: (i) Em primeiro lugar, limpar com solvente para desgordurar a superfície. (ii) O passo seguinte é a utilização de um método de abrasivo, sendo recomendada a criação de uma rugosidade que permitirá melhor ancoragem do adesivo no substrato [39]. Isto pode se conseguir através do jateamento com areia, ou granalha de aço, e até mesmo o lixamento (os dois primeiros são os mais recomendáveis). (iii) Como um terceiro passo é importante limpar a superfície para se eliminar os vestígios do processo mecânico, como por exemplo, da aplicação de algum solvente, como álcool metil-etil, ou iso-propil ou para eliminar algum resíduo de óleo advindo do ar comprimido no processo de jateamento. É necessário ter ciência de que os solventes normalmente contêm água e que esta pode provocar a oxidação no aço, depois dos solventes se evaporarem na superfície do metal. Este pode se resfriar e, num ambiente úmido, pode acontecer a condensação de água que anula os esforços de

limpeza. O melhor tratamento depois do jateamento é limpar com ar seco e livre de impurezas. Solventes de limpeza só devem ser utilizados como último recurso [43]. Imediatamente depois, deve-se aplicar o adesivo, ou utilizar algum primer protetor. No caso de um aço inox, após o processo abrasivo é recomendada a limpeza e o condicionamento químico [43].

Caso seja necessário *armazenar os substratos após o tratamento superficial* por mais tempo que o admissível, duas coisas podem ser feitas: (i) recobrir os substratos e armazená-los num ambiente controlado, ou (ii) aplicar um primer orgânico compatível com o adesivo. Isto deve ser feito imediatamente depois de realizado o tratamento superficial [42]. Alguns primers especialmente formulados continuam protegendo os substratos contra a corrosão, depois da colagem. Em [41], se apresentam dados dos tempos máximos admissíveis que os substratos podem ficar depois do tratamento superficial, sendo que o aço tratado com jateamento de areia pode ficar até 4 horas sem a aplicação do adesivo, ou de algum primer.

- **Primers:** são líquidos aplicados nos substratos antes da aplicação do adesivo. Entre suas principais vantagens estão: o efeito da proteção do substrato que dissolve os possíveis contaminantes orgânicos residuais após o tratamento superficial, o efeito de inibir a corrosão, etc.

- **Promotores da Adesão:** ajudam a adesão a ser forte e duradoura. Podem ser aplicados diretamente no substrato, ou ser misturados no adesivo. No caso dos materiais compósitos de fibra de vidro, sua utilização é necessária, uma vez que a adesão entre as fibras e a resina teria uma resistência relativamente baixa, propensa à ação e à difusão de água na interfase, o que poderia provocar resultados catastróficos. Os mais conhecidos para os materiais compósitos são os silanos³ que têm boa efetividade, quando aplicados nos aços, excelente, quando aplicados à fibra de vidro e baixa, quando aplicados à fibra de carbono [41].

³ Composto químico derivado do silício. Principalmente utilizado como agente de acoplamento para melhorar a adesão de por exemplo: porcelana em compósito, obturações dentárias, fibra de vidro ou fibras naturais numa matriz polimérica.

2.3.5 Adesivos Estruturais

São adesivos utilizados em aplicações que precisam de alta resistência e em aplicações permanentes. Existem adesivos que reagem (ou se solidificam), mediante a mistura com endurecedores, outros que reagem à energia externa como ao calor, à radiação (ex. UV), outros, ainda, catalisam em contato com a superfície e até pela perda de solvente, entre outros [41]. Um exemplo disto são os reparos de material compósito que utilizam um tipo de adesivo que se solidifica com a evaporação da água. Este pode ser comercializado em embalagens herméticas e, uma vez fora deste, o adesivo começa a endurecer.

- **Adesivos de Resistência a Alta Temperatura:** Geralmente isto significa que o adesivo precisa ser curado, também, à elevada temperatura. Normalmente este procedimento produz um adesivo com uma resistência ao puxamento relativamente baixa e a um comportamento relativamente frágil. Às altas temperaturas recomenda-se que os coeficientes de expansão térmica do adesivo e do substrato sejam similares, do contrário a concentração de tensões pode ser alta [41].

- *Adesivos Estruturais mais Utilizados:*

a. Epóxis: Sua capacidade de curar sem formar produtos voláteis e uma contração menor que 0,5%, fizeram destas resinas uma alternativa atrativa para a junção de metais a baixa pressão. Tem boa resistência a diferentes tipos de ambientes. Podem ser encontrados em líquidos, pastas, filmes e sólidos. Na tabela A.1 (tabela no anexo A), se apresentam diferentes tipos de adesivos epóxis encontrados na indústria. Entre os principais ingredientes secundários nos epóxis, tem-se: os diluentes que modificam sua viscosidade; os *fillers* minerais (cargas minerais), que diminuem seu custo, permitem modificar sua viscosidade, modificar seu coeficiente de expansão térmica, criar/melhorar sua condutividade elétrica, entre outros.

b. Epóxis híbridos: Nos epóxis podem ser adicionados uma série de polímeros, que formam assim, os chamados epóxis híbridos. Os polímeros mais conhecidos são: os nitrilos, fenólicos, nylons e as resinas polisulfídicas. Na tabela A.2, se mostram alguns destes epóxis híbridos. Por exemplo, adesivos com resistência a alta temperatura são os

epóxi-fenólicos [40] [41]. Estes adesivos podem trabalhar continuamente a uma temperatura de 177°C (350°F) e pode ter um serviço intermitente até uma temperatura de 260°C (500°F). Estes adesivos também têm muito boa resistência à intempérie, ao óleo, a solventes e misturas; mas têm pouca resistência ao puxamento, impacto e resistência limitada ao choque térmico.

c. Fenólicos modificados: Um exemplo destes adesivos são os nitrílos fenólicos que têm boa resistência ao puxamento, ao cisalhamento (acima de 5000 psi), ao impacto e à fadiga e podem ser utilizados, também, para altas temperaturas.

d. Resinas poliaromáticas de alta temperatura: Estes adesivos podem trabalhar com temperaturas maiores que todos os adesivos anteriormente apresentados. O problema é seu elevado custo e os requerimentos para a sua cura, como a alta temperatura, a alta pressão e, freqüentemente, por ser requerido vácuo para eliminar os produtos voláteis. Um exemplo destes adesivos é a Poliamida que pode trabalhar continuamente de 260°C a 316°C (500°F a 600°F), e em curtas exposições até 538°C (1000°F).

e. Resinas Anaeróbicas: Chamados assim porque curam quando o ar é excluído da resina. Podem ser utilizados em todos os metais, em plásticos, vidros, etc. São mono componentes e curam à temperatura ambiente. A velocidade da cura (geralmente rápida), dependerá da composição química dos substratos. Na tabela A.3 se mostram as principais resinas anaeróbicas

2.3.6 Seleção do Adesivo

Na tabela 2.4, estão listados os fatores que devem ser considerados para a seleção de um adesivo.

Tabela 2.4 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo [15]

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 pós- 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.

Na tabela A-4 do anexo A, se apresentam algumas propriedades dos adesivos mais frequentemente utilizados para junção de metais.

2.4

Resistência de Materiais

2.4.1 Elasticidade em Cilindros

Esta seção apresenta as equações para cilindros de parede espessa, quando sujeitos à carregamentos de pressão interna e externa. Também se apresentam as equações de cilindros concêntricos com interferência.

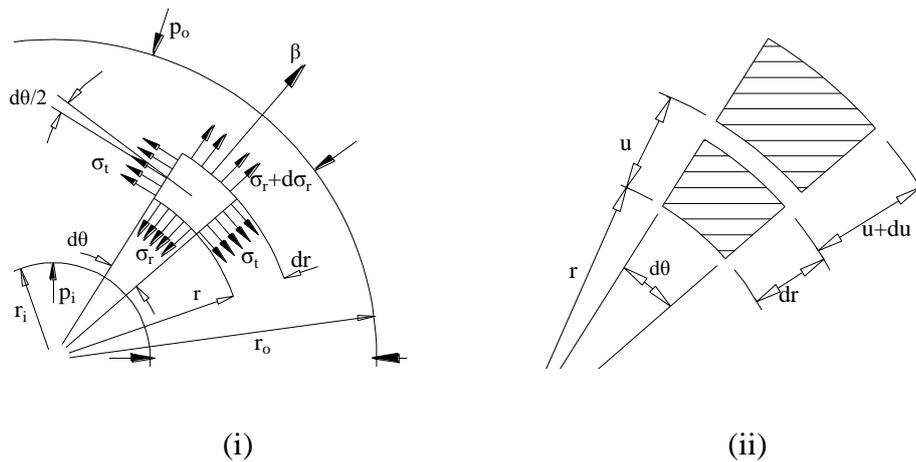


Figura 2.16. (i) Equilíbrio de forças num ponto. (ii) Deslocamentos e deformações num ponto

A equação de equilíbrio num ponto, segundo a figura 2.17 (i) é [44]:

$$\sigma_r(r d\theta dL) + 2\sigma_t(dr dL) \frac{d\theta}{2} - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\theta dL - \beta(r d\theta dr dL) = 0 \quad (2.4)$$

Outras relações necessárias são obtidas, segundo a figura 2.17 (ii) e tem-se:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}$$

Também são utilizadas as relações elásticas constitutivas:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_t + \nu\varepsilon_r) \quad \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu\varepsilon_t)$$

Fazendo as operações necessárias [44], obtêm-se as equações para cilindros de parede espessa, considerando a pressão interna e a externa.

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (2.6)$$

Para considerar cilindros compostos supõe-se que a interferência δ resulta da diferença dos incrementos do cilindro interno sob pressão interna (δ_i) e do cilindro externo (δ_o).

Tem-se que [44]:

$$\delta_o = u_o = b \varepsilon_{to} = \frac{b}{E_o} (\sigma_{to} - \nu_o \sigma_{ro}) \quad (2.7)$$

Onde: $\sigma_{to} = P \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2}$ e, substituindo, tem-se:

$$\delta_o = \frac{bP}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) \quad (2.8)$$

E, da mesma forma:

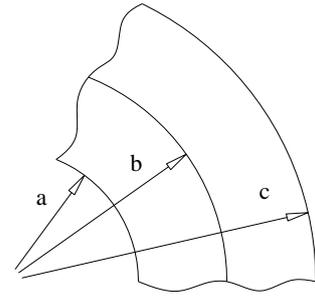
$$\delta_i = -\frac{bP}{E_o} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_i \right) \quad (2.9)$$

Pelo qual a equação para interferência de cilindros fica:

$$\delta = \delta_o - \delta_i = \frac{bP}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) + \frac{bP}{E_i} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_i \right) \quad (2.10)$$

Onde “P” é a pressão resultado da interferência dos cilindros.

A dedução das equações apresentadas nesta seção, foram realizadas devido a que são a base da modelagem analítica apresentada no capítulo 4 desta tese.



2.4.2 Noções Básicas da Plasticidade

2.4.2.1 Relações Elastoplásticas

Devido à natureza das tensões estas não podem ser medidas, mas, sim calculadas. No limite do regime elástico este cálculo resulta nas seguintes equações (2.11) e (2.12) para o critério de von Mises:

$$\sigma_{eq}^e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.11)$$

Onde:

σ_{eq}^e : tensão equivalente no regime elástico

σ_i : tensão na direção principal “i”

Para achar as tensões principais, se resolve o sistema de equações:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]\end{aligned}\tag{2.12}$$

Onde e_i é a deformação na direção principal “i”

No regime elasto-plástico não é possível expressar a tensão, ou a deformação em termos da deformação total, ou tensão total respectivamente. Relações incrementais podem ser encontradas entre os incrementos de tensão e os incrementos de deformação.

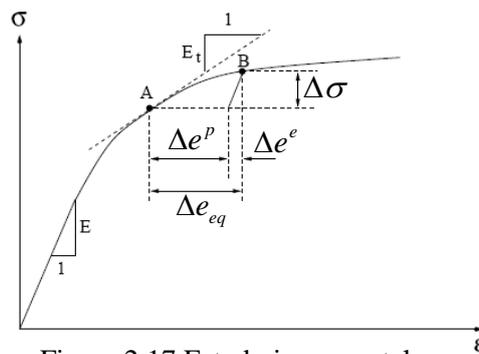


Figura 2.17 Estudo incremental

Cada incremento de deformação equivalente é calculado por:

$$\Delta e_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta e_1 - \Delta e_2)^2 + (\Delta e_2 - \Delta e_3)^2 + (\Delta e_3 - \Delta e_1)^2}\tag{2.13}$$

Mas Δe_{eq} divide-se em duas parcelas, uma elástica (Δe^e) e outra plástica (Δe^p), como podem-se ver na figura 2.2, então: $\Delta e_{eq} = \Delta e^e + \Delta e^p$

No regime plástico se trabalha com a hipótese das deformações a volume constante

$$[44]: \Delta e_1^p + \Delta e_2^p + \Delta e_3^p = 0$$

Onde Δe_i^p é o incremento de deformação plástica na direção “i”.

2.4.2.2 Relações idealizadas tensão – deformação

Para o tratamento analítico do comportamento do material é conveniente idealizar os diagramas tensão-deformação. Abaixo são listados alguns destes modelos idealizados em carregamento monotônico [44]:

a. Elástico perfeitamente plástico

O comportamento plástico não experimenta encruamento e começa quando é alcançado o limite de escoamento.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{para } \sigma < S_y$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \lambda \quad \text{para } \sigma = S_y$$

Onde:
 ε : deformação
 σ : tensão
 λ : toma algum valor entre a deformação de escoamento e a deformação última de ruptura.
 E: módulo de elasticidade
 S_y : limite de escoamento

b. Elástico com encruamento linear

Onde é assumido um módulo tangencial constante (E_t)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{para } \sigma < S_y$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{E_t}(\sigma - S_y) \quad \text{para } \sigma \geq S_y$$

c. Elástico com encruamento exponencial

Tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{para } \sigma < S_y$$

$$\varepsilon = k\varepsilon^n \quad \text{para } \sigma \geq S_y$$

Onde:
 k: constante
 n: expoente de encruamento

d. Ramberg-Osgood

A qual é uma só expressão não linear,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{1/h}$$

Onde:
 H: coeficiente de encruamento
 h: expoente de encruamento

2.4.3 Tensões em Dutos sem Defeito

Segundo a norma ASME B31.4 [20], o cálculo da pressão de projeto para dutos sem defeitos é realizado utilizando-se o critério da Tresca. 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:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P.D}{2.t} = S_y \cdot fator ; \quad (2.14)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material.

A recomendação API 5L [25] e a norma B31.4 usam $S_y = SMYS$ (resistência mínima ao escoamento especificada para o material). O *fator* usado na equação (2.14) decompõe-se em três parcelas: (i) fator de projeto, (ii) eficiência da junção por solda e (iii) temperatura de trabalho, denominadas F, E e T respectivamente. Assim,

$$P_d = \frac{2.t.SMYS}{D} \cdot F.E.T \quad (2.15)$$

onde, F é 0.72 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 [45].

$$MAOP = \min \left(P_d ; \frac{P_{hidrostática(4horas)}}{1.25} \right) \quad (2.16)$$

Para o cálculo da pressão de falha de um duto sem defeito, no caso de um corpo de prova tubular, pode ser utilizada a equação de von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3} \quad (2.17)$$

onde $\sigma_1 = PD/2t$, $\sigma_2 = PD/4t$, $\sigma_3 = -P$ e $\sigma_{eq} = S_u$ (S_u é a resistência a tração do material do duto)

2.4.4 Equações Semi-Empíricas para 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 usando conhecimentos da mecânica da fratura e ajustadas experimentalmente.

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 necessária para um duto falhar, com resistência à falha por colapso plástico, da seguinte forma (se considera $\sigma_r \ll \sigma_c$):

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P_{defeito} \cdot D}{2 \cdot t} \cdot \frac{1}{C} = S_{flow} \quad (2.18)$$

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). Então:

$$P_{defeito} = \frac{2 \cdot t}{D} \cdot S_{flow} \cdot C \quad (2.19)$$

O parâmetro C tem a seguinte forma:
$$C = \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \quad (2.20)$$

Onde:

A : Área longitudinal de material perdido

A_0 : Área longitudinal da seção com defeito

M : Fator de Folias (quantifica o efeito do comprimento do defeito, quando este não é considerado de comprimento infinito)

A equação (2.19) 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.

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 2.5 apresenta um resumo dos métodos usados para defeitos representados por seu comprimento L e com profundidade máxima d, onde se inclui o fator de projeto para calcular a pressão de operação no duto com defeito.

Tabela 2.5 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito [45].

Método	S_{flow}	Formato do defeito	A/A_0	M	Fator de projeto
Grosseiro (ResMat)	$\text{Min}\left\{\frac{S_y + S_u}{2}, 1.2 \times S_y\right\}$	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	$0,85x \frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \left(\frac{L^2}{Dt}\right)^2}$	F.E.T
DNV RP-F101	S_u ou SMUS	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{Dt}}$	$(D/D-t) \times 0.9 \times \text{F.E.T}$
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: $0,893 \cdot \frac{L}{\sqrt{Dt}} > 4$	$P_{\text{defeito}} = 1,1 \cdot P_d \cdot \left(1 - \frac{d}{t}\right)$ 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 possam ser incluídos no mesmo formato das equações anteriores. Resultados em outros trabalhos [46] [47], mostram que a equação DNV RP-F101 é a mais exata e a B31.G é a mais conservadora, quando comparadas com resultados experimentais de espécimes com defeitos longos, 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 2.5:

$$(MAOP_{\text{reduzida}} = P_{\text{defeito}} \times \text{fator de projeto}) \quad (2.21)$$

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

2.5

Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando o Critério de Aceitação RSF da API 579

O RSF (Fator de Resistência Remanescente) define-se como a razão entre as resistências à falha por colapso plástico determinadas para o componente com defeito e para o componente sem defeito.

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (2.22)$$

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 resultados experimentais ou 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:

- Se $RSF < RSF_a$ então.... $MAWP_r = MAWP \cdot \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right)$
 - Se $RSF \geq RSF_a$ então... $MAWP_r = MAWP$
- (2.23)

onde:

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

$MAWP_r$: máxima pressão de operação admissível do componente com defeito.

Um valor recomendado para o RSF_a é 0.9.

2.6

Regra das Misturas

Muitas das propriedades mecânicas dos materiais compósitos podem ser determinados utilizando a regra das misturas, desde que as fibras utilizadas sejam constantes e unidirecionais. Por exemplo, a densidade de um composto é [48]:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad (2.24)$$

Onde:

ρ_c : densidade do compósito

ρ_m : densidade da resina o matriz

ρ_f : densidade da fibra

f_f : fração volumétrica de fibra

f_m : fração volumétrica de resina o matriz