

PREFÁCIO



O Xará, Francisco Xavier de Carvalho, é meu parceiro e amigo desde 1971, quando iniciei minhas atividades profissionais. Sempre tive com ele grande afinidade. As ideias inovadoras expostas nestes livros foram criticadas e amenizadas por ele.

Mais de três décadas separam estas obras do lançamento, em 1992, do livro **FIBERGLASS X CORROSÃO**, que também tive a honra de prefaciar. Como o livro anterior, também estes são uma luz para a tecnologia dos compósitos.

Neste intervalo de mais de três décadas, o autor participou como consultor dos projetos mais importantes em compósitos realizados na América do Sul. Ele foi incentivador e líder das comissões que criaram as primeiras normas brasileiras para compósitos, bem como membro de comissões internacionais de normalização, como a ISO 14692.

O Carvalho sempre me surpreendeu pelas suas soluções inovadoras e ousadas, sempre suportadas por evidências de resultados obtidos e relatados na literatura. Além dessa capacidade de interpretação e de inovação, ele nunca deixou de divulgar suas conclusões através de trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais, o que lhe trouxe como resultado o respeito e o reconhecimento da comunidade de compósitos no Brasil e no exterior.

Os seis livros agora publicados vão muito além do clássico **FIBERGLASS X CORROSÃO**, de 1992. Novos conceitos são introduzidos e muitos dos conceitos hoje aceitos são desafiados a toda hora. Estes livros abrem caminhos novos, claros e seguros para o desenvolvimento dos compósitos.

A maioria dos conceitos apresentados nestes livros são originais e inovadores, desenvolvidos pelo autor e apresentados de maneira objetiva e clara. Estes livros são uteis para profissionais, acadêmicos e estudantes.

Os profissionais vão encontrar soluções para problemas considerados insolúveis.

Os acadêmicos vão encontrar abordagens inéditas

Os estudantes vão encontrar descrições que facilitam o entendimento de forma rápida, segura e bem fundamentada em conceitos básicos.

A indústria dos compósitos pode considerar estas obras como um tratado completo para desenvolver produtos para uso industrial, cobrindo as matérias primas, passando pelo projeto e cálculo estrutural, variáveis do processo e até mesmo a solução do problema da durabilidade.

Estes livros são marcos para a tecnologia dos compósitos. Junto me à comunidade de compósitos para agradecer a mais esta contribuição que, somada às demais, faz de Antônio Carvalho o maior agente para o desenvolvimento dos compósitos no Brasil.

Francisco Xavier de Carvalho

CAPÍTULO 1

As matérias-primas

1 – Introdução. Este capítulo trata das matérias-primas usadas na indústria de compósitos. Ele foi escrito para dar aos leitores o entendimento básico para entender este livro. Acreditamos que esse conhecimento possa facilitar o entendimento dos tópicos que serão discutidos neste livro.

O que são os compósitos? Existem duas definições para os compósitos, uma geral e abrangente e outra particular e restrita. Vamos ver essas duas definições:

- **Definição abrangente.** *A definição abrangente diz que os compósitos são materiais formados por duas ou mais fases, com propriedades superiores às de cada fase considerada isoladamente. A fase contínua é chamada de matriz. As fases descontínuas podem ser constituídas por materiais fibrosos ou particulados. Pelo conceito abrangente, a madeira (matriz de linina com fibras de celulose) e o concreto (matriz de cimento com agregado e areia) são considerados compósitos. A natureza é pródiga no uso de compósitos. Como exemplos, podemos citar a já mencionada madeira, os ossos, os dentes, as unhas, etc.*
- **Definição restrita.** *A definição abrangente é muito ampla, tendo pouca utilidade prática. A definição restrita é mais útil. Pelo conceito restrito, os compósitos são materiais de engenharia constituídos por uma matriz plástica reforçada com fibras de vidro, carbono ou aramida. Este é o conceito normalmente aplicado aos compósitos.*

Os conceitos citados concordam que os compósitos são caracterizados por duas ou mais fases e que essas fases quando combinadas têm desempenho melhor que teriam isoladamente.

Este livro trata apenas dos compósitos com matrizes plásticas de resinas poliéster ou viniléster, reforçadas com fibras de vidro. Nada será dito neste livro sobre as matrizes de

epóxi ou de outras resinas. As fibras de carbono e de aramida também serão ignoradas. E, mesmo dentro desse universo restrito, nosso foco será orientado unicamente para os compósitos usados em aplicações industriais. Os compósitos usados em aplicações náuticas, militares, transporte, construção civil, etc. não são tratados neste livro.

Este é um livro especializado, escrito para especialistas.

2 – Véu de superfície. As superfícies dos equipamentos em contato com ambientes agressivos devem ter uma ou mais lâminas de resina não-reforçada (sem fibras), que em alguns casos serve de acabamento e em outros serve de barreira protetora. Nas aplicações que precisam de bom acabamento superficial, como barcos e piscinas, essa lâmina de resina é conhecida como gelcoat. Os gelcoats são pigmentados para ter acabamento colorido, liso e brilhante. Eles são aplicados no molde, no estado líquido, onde curam antes de receber o laminado estrutural. O processo de fabricação deve ser interrompido durante a cura do gelcoat, o que atrasa a produção. Os gelcoats não são usados em equipamentos industriais.

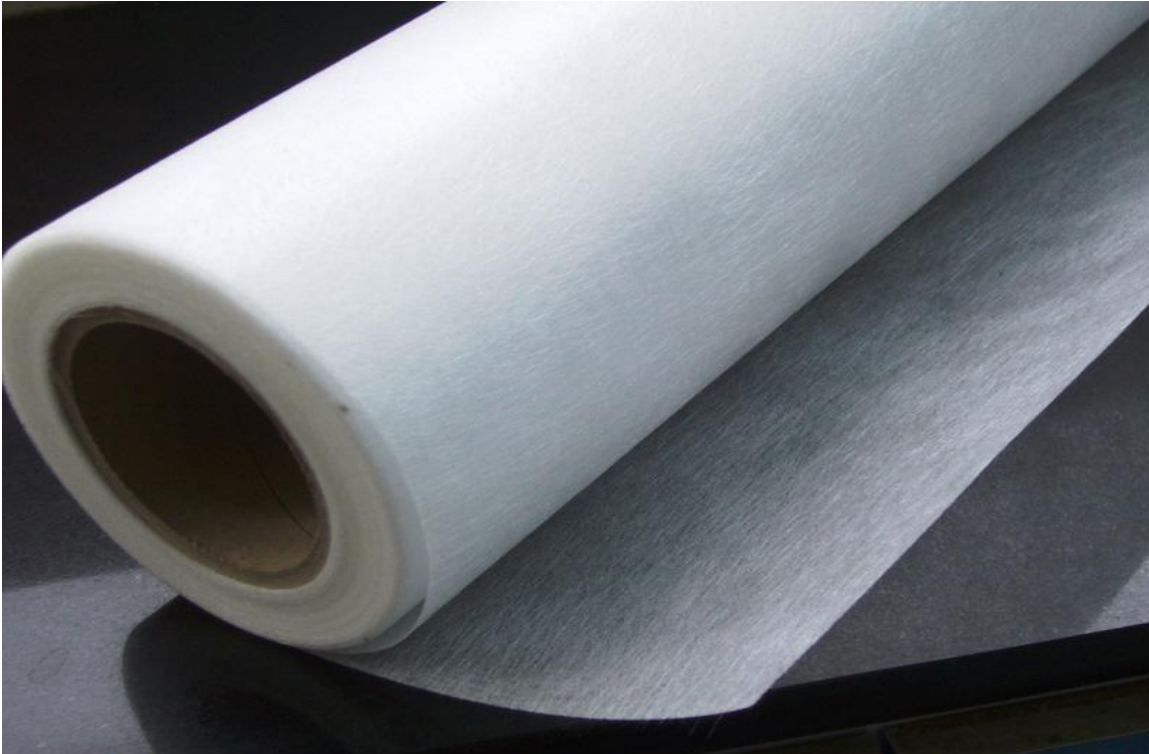
Nos equipamentos industriais, que não precisam ter acabamento colorido, liso e brilhante, o gelcoat é substituído por uma lâmina de resina com véu de superfície. O véu de superfície é uma manta de baixa gramatura (35 g/m² a 40 g/m²), feita com fibras de poliéster ou de vidro C. Quando impregnada com resina, essa manta forma uma lâmina fina na superfície do equipamento. Essa lâmina – geralmente conhecida como liner – é rica em resina e tem espessura entre 0,3 mm e 0,5 mm.

Os liners feitos com véu de superfície e resina desempenham nos equipamentos industriais as mesmas funções que os gelcoats nas aplicações de consumo. Os liners diferem dos gelcoats em dois pontos:

- *Os liners são feitos com véu de superfície e resina. Os gelcoats não têm véu de superfície.*
- *Os liners não usam pigmentos. Os gelcoats usam resinas pigmentadas.*

As lâminas feitas com resina pura, sem véu, são melhores para retardar a penetração de produtos químicos que as feitas com resina e véu. A questão que surge é: Por que usar véu de superfície no liner dos equipamentos industriais? Não seria melhor aplicar a resina sem o véu? Essa pergunta é respondida a seguir.

- *O véu assegura a uniformidade de espessura do liner*
- *O véu permite fazer a laminação úmido-sobre-úmido, sem parar o processo. Essa facilidade é essencial nos processos de enrolamento, laminação hoop-chop e pultrusão.*



Os véus de superfície são mantas de baixa gramatura, feitas com fibras de vidro C ou de poliéster. Eles são usados para fazer o liner rico em resina dos equipamentos industriais.

3 – Roving para laminação. Os equipamentos industriais usados em ambientes agressivos devem ter barreiras de fibras de vidro picadas – barreiras de corrosão – aplicadas sobre os liners. As barreiras de corrosão podem ser feitas com mantas (mais detalhes em seguida) ou com rovings. As fibras contínuas dos rovings devem ser cortadas em comprimentos pequenos (em geral 2,5 cm) antes de ser impregnadas com resina para formar barreiras de corrosão. Existem duas variedades de rovings que servem para isso.

- **O roving de pistola** tem tratamento superficial de PVA, que o torna fácil de cortar e de espalhar nos moldes. Mas, como o PVA tem baixa solubilidade em algumas resinas, o roving de pistola pode produzir laminados com fibras esbranquiçadas e secas, que facilitam a penetração de produtos agressivos. Se o equipamento de compósito for usado em ambientes não agressivos, como água, etanol, formol e outros, isso não é problema. Mas, nas aplicações em contato com produtos químicos agressivos, essas fibras secas podem reduzir a vida química dos equipamentos. A barreira de corrosão não deve ser feita com roving de pistola.
- **O roving de telhas** tem tratamento superficial feito com polímeros de alta solubilidade em resinas poliéster, produzindo laminados sem fibras secas ou esbranquiçadas. Esse roving é difícil de cortar e de espalhar, mas é muito bom para fazer barreiras de corrosão.



Os rovings para laminação são feitos com tratamentos superficiais de baixa solubilidade (roving de pistola) ou de alta solubilidade (roving de telhas). A baixa solubilidade do tratamento superficial explica a formação de fibras brancas nos laminados.



Vista frontal da bolsa de tubo para saneamento. As fibras brancas resultam da baixa solubilidade do PVA usado no tratamento superficial dos roving de pistola. O cilindro do tubo (parte superior da foto) foi feito com roving UD e não apresenta fibras brancas.

4 – Roving UD. O roving UD tem os filamentos rigorosamente paralelos, sendo usado para fazer lâminas unidirecionais (conhecidas como lâminas UD) e lâminas tecidas, usadas nos laminados estruturais dos equipamentos industriais. Da mesma maneira que o roving de telha, o roving UD tem tratamento superficial de alta solubilidade nas resinas e não produz laminados com fibras brancas.

As lâminas feitas manualmente com tecidos ou feitas por enrolamento com roving UD, têm propriedades mecânicas mais altas que as feitas com fibras picadas. Mas, ao contrário das lâminas feitas com fibras picadas, elas são anisotrópicas e suas propriedades variam com a direção das fibras. O livro “Propriedades mecânicas dos Compósitos” mostra métodos simples e precisos de estimar as propriedades mecânicas de laminados feitos com fibras UD e usados na fabricação de tubos e de tanques.



Os rovings UD têm as fibras rigorosamente paralelas. Eles são usados para fazer tecidos ou para fazer laminados por enrolamento. Esses rovings têm tratamento superficial solúvel na resina e não produzem laminados com fibras brancas.

5 – Mantas. As mantas de fibras picadas são fornecidas em rolos com gramaturas de 225 g/m², 450 g/m² ou 600 g/m². Elas são feitas com fibras de vidro cortadas e aglutinadas com ligante de resina poliéster bisfenólica. As mantas feitas com esse ligante são usadas para fazer as barreiras de corrosão, as emendas e também as estruturas de laminados. As mantas são designadas por suas gramaturas expressas em gramas por metro quadrado, como M225, M450 e M600.



As mantas são feitas com fibras picadas aglutinadas com ligante de resina poliéster bisfenólica. As fibras têm tratamento superficial solúvel nas resinas e não produzem laminados com fibras brancas.

O leitor deve notar a diferença entre o ligante usado para aglutinar as fibras picadas das mantas e o tratamento superficial aplicado nas fibras. O ligante é feito com resina poliéster bisfenólica. O tratamento superficial é feito com vários ingredientes, como silanos, formadores de filme, lubrificantes, etc. As fibras usadas para fazer mantas têm tratamento superficial solúvel em estireno. O ligante de resina bisfenólica também é solúvel em estireno.

6 – Tecidos. Os tecidos feitos com roving UD são fornecidos comercialmente em rolos com várias gramaturas, sendo as mais comuns 600 g/m^2 e 800 g/m^2 . As lâminas de fibras tecidas aumentam a resistência ao impacto e outras propriedades mecânicas dos laminados. Os tecidos disponíveis comercialmente são compatíveis com resinas epóxi, vinil éster ou poliéster, sendo designados neste livro por suas gramaturas, como T600 e T800.



Os tecidos são feitos com rovings UD em várias gramaturas e construções. Este livro enfatiza os tecidos T600 (600 g/m²) e T800 (800 g/m²).

7 – Escamas de vidro. As escamas de vidro são minúsculas placas de pequena espessura, muito parecidas com as escamas de peixe. Em Inglês elas são conhecidas como “glass flakes”, que alguns traduzem como “flocos de vidro”. As escamas não são flocos. Elas

são placas de pequenas dimensões, ligeiramente cilíndricas, para não aglomerar e formar flocos quando misturadas na resina. Elas são usadas para fazer o liner de revestimentos aplicados sobre substratos rígidos de aço ou de concreto. As lâminas feitas com escamas de diâmetro nominal 0,40 mm são aplicadas com pistola. As feitas com escamas de diâmetro 3,2 mm são aplicadas com desempenadeira.

As lâminas de resinas com escamas de vidro têm baixa permeabilidade e são muito usadas para retardar a penetração de produtos agressivos na barreira de corrosão dos revestimentos de compósitos. Infelizmente as lâminas de resina com escamas são quebradiças e trincam com facilidade, o que limita seu uso ao revestimento de substratos rígidos de aço ou de concreto.



As escamas são placas de vidro com alta relação diâmetro/espessura. Elas reduzem a permeabilidade da barreira de corrosão e aumentam a vida química dos revestimentos. A inclusão de escamas torna o liner suscetível a trincas e por isso elas são usadas apenas em revestimentos de substratos rígidos.

8 – Resinas. As resinas poliéster e viniléster têm importância fundamental no desempenho dos equipamentos usados em ambientes agressivos. A vida química e a máxima temperatura de uso dos equipamentos dependem da resina.

As resinas são fornecidas e processadas no estado líquido. Quando ativadas com catalisadores e aceleradores, elas se transformam em sólido rígido, infusível e insolúvel. A cura das resinas pode ser feita na temperatura ambiente e sem pressão, o que permite o uso de processos de fabricação com moldes abertos. A flexibilidade de processamento,

associada à excepcional resistência à ambientes agressivos, explicam o enorme sucesso das resinas poliéster e vinil éster em aplicações industriais. Existem vários tipos de resinas poliéster e vinil éster.

- **Poliéster isoftálico e tereftálico** – Essas resinas têm bom desempenho em ambientes ácidos, mas não devem ser usadas em ambientes alcalinos. Alguns poliésteres dessa categoria têm bom desempenho em presença de solventes.
- **Poliéster bisfenólico** - Apresenta o máximo de resistência a ambientes oxidantes, alcalinos ou ácidos. Essa resina combina baixa absorção de água com alta temperatura de distorção térmica (HDT) e por isso é muito usada em ambientes aquosos e altas temperaturas.
- **Vinil éster** – As resinas viniléster são notáveis por combinar alta tenacidade com alta temperatura de termo-distorção (HDT). Elas têm bom desempenho em ambientes ácidos, oxidantes e alcalinos.



As resinas poliéster e viniléster são processadas no estado líquido. A transformação delas de líquido a sólido é conhecida como cura.

9 – Sistemas de cura. As resinas e as fibras são aplicadas simultaneamente nos moldes. Depois de aplicadas, as resinas gradualmente se transformam do estado líquido ao estado sólido. Essa transformação é conhecida como cura. As substâncias adicionadas na resina líquida para fazer essa transformação são conhecidas como sistemas de cura. Os sistemas de cura são formados por um acelerador (promotor) e um catalisador (iniciador). A cura das resinas na temperatura ambiente exige o uso simultâneo de dois produtos, sendo um o

catalisador e o outro o acelerador. Os sistemas de cura mais usados são os formados pelas duplas

MEKP + Cobalto

BPO + DMA.

O sistema MEKP + Cobalto é notável pela sua versatilidade e facilidade de uso, o que lhe assegura praticamente a universalidade das aplicações. O sistema BPO + DMA é usado em aplicações especiais.



O sistema MEKP + cobalto é de uso geral e universal. O MEKP é mostrado à esquerda.



O sistema BPO + DMA é usado em aplicações especiais. O BPO fornecido em pasta é mostrado à direita.

10 – Estireno. O estireno é usado para baixar a viscosidade e para interligar as resinas. Ele é fornecido pré-misturado na resina. O transformador adiciona estireno apenas para fazer pequenos ajustes de viscosidade, ou como veículo para introduzir pequenas quantidades de aditivos.

11 – Inibidores. A cura das resinas diluídas em estireno avança espontaneamente, mesmo na temperatura ambiente. Os inibidores são usados para retardar esse avanço na cura e alongar o tempo de estocagem das resinas. Os mais usados são o terc-butil catecol (TBC), a hidroquinona e a parahidroquinona. Esses inibidores são adicionados na resina pelo fabricante, sendo usados pelos transformadores apenas em casos extremos, para ajustar o tempo de gel ou para reduzir o pico exotérmico na cura da resina.

Alguns inibidores específicos, como o naftenato de cobre e a pentanodiona, são adicionados à resina pelos transformadores. Detalhes sobre esses inibidores podem ser encontrados no livro “Cura e Pós-cura”.

12 – Absorvedores de UV. Os absorvedores de UV dissipam de forma inócua a alta energia das radiações Ultra-Violeta. Eles são adicionados na resina da lâmina externa dos equipamentos (topcoat), como proteção contra os raios solares. Os absorvedores de UV perdem a função protetora após 2 a 3 anos de uso. Em vista disso, acreditamos que a melhor maneira de proteger os equipamentos de compósitos contra a ação dos raios solares, seja fazendo pintura periódica, com tintas específicas para uso exterior. Essas tintas são muito usadas na construção civil para essa finalidade.



Absorvedor de UV

13 – Corantes. Em seu estado natural os compósitos são incolores e translúcidos. Os corantes são substâncias solúveis na resina que dão cor aos compósitos sem afetar sua translucidez. Os corantes são usados para fazer compósitos coloridos e translúcidos.



Os corantes são solúveis na resina, produzindo laminados coloridos e translúcidos. Por serem solúveis na resina, eles não produzem o efeito cavalo de Tróia e podem ser usados em ambientes agressivos. Os pigmentos são insolúveis na resina e produzem o efeito cavalo de tróia. O efeito cavalo de Tróia é explicado no capítulo 3.

14 – Pigmentos. Os pigmentos servem para dar cor e para proteger laminados contra os raios solares. Eles são insolúveis na resina e por isso tornam os laminados opacos. Os pigmentos são usados apenas no topcoat (lâmina externa) dos equipamentos.

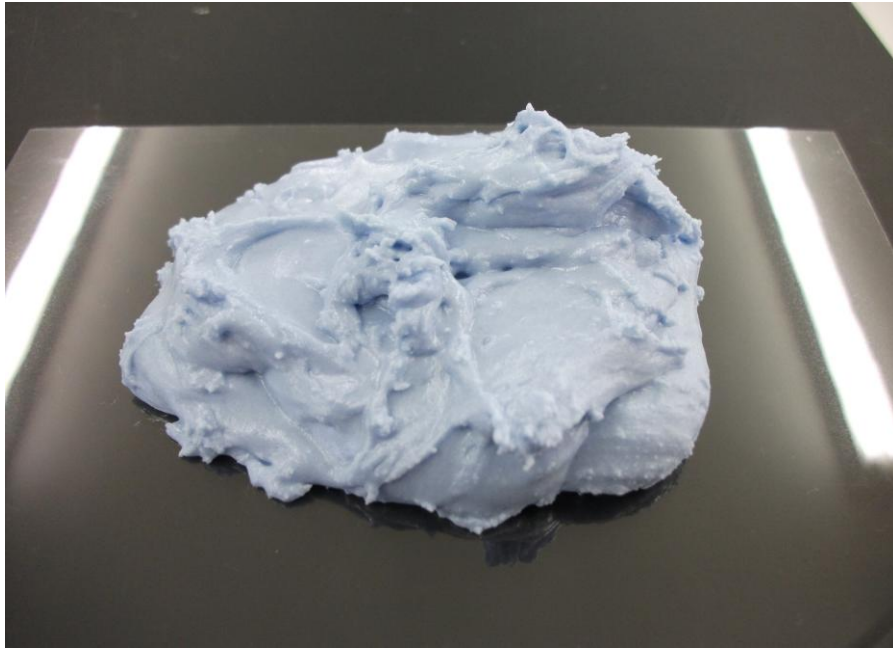


Os pigmentos são partículas sólidas insolúveis na resina. Eles são difíceis de dispersar e por isso são fornecidos como pastas concentradas, pré-dispersas em resina não reativa. Por serem insolúveis, os pigmentos facilitam a infiltração de produtos agressivos pelo efeito cavalo de Tróia.

15 – Cargas. As cargas são partículas minerais misturadas na resina para fazer as bases usadas em revestimentos de substratos de aço ou de concreto. Elas servem também para encher cavidades e para nivelar irregularidades na execução de reparos. As cargas usadas em ambientes agressivos devem ser inertes e devem ter baixo coeficiente de dilatação térmica. As mais usadas são a sílica (areia) e o grafite. A alumina hidratada é usada em

algumas aplicações, para reduzir a propagação de chamas e a liberação de fumaça dos laminados.

16 – Massa de reparo. As massas de reparo são usadas para arredondar cantos, encher cavidades e acertar irregularidades na execução de emendas ou de reparos. Elas são feitas com resina, agente tixotrópico, catalisador e acelerador, podendo conter também cargas minerais inertes e fibras de vidro moídas. A massa de reparo deve ser feita com cargas inertes e a mesma resina usada na barreira de corrosão dos equipamentos.



A massa de reparo é usada para encher irregularidades e nivelar superfícies.

17 – Agente tixotrópico. O longo tempo de gel permite que as resinas líquidas de lâminas espessas escorram quando aplicadas em paredes inclinadas. Os agentes tixotrópicos são adicionados nas resinas para evitar esse escorrimento. Os mais usados são as sílicas sintéticas (aerosil, cab-o-sil) e as argilas organofílicas.



Os agentes tixotrópicos de sílica são adicionados na resina para evitar escorrimento em paredes inclinadas. Os agentes tixotrópicos são difíceis de dispersar e normalmente são fornecidos pré-dispersos na resina.

18 – Parafina. O oxigênio e a evaporação do estireno inibem a interligação da resina que cura exposta ao ar. Essa situação ocorre em uniões (emendas), em revestimentos e em reparos. A parafina é adicionada na resina para evitar isso.

A parafina migra para a superfície durante a cura, formando uma barreira que dificulta a evaporação do estireno e reduz a penetração do oxigênio atmosférico. Todas as superfícies de equipamentos que curam expostas ao ar (topcoats, reparos) devem ser feitas com resina parafinada.



A parafina sólida é solubilizada em estireno antes de ser adicionada na resina do topcoat (lâmina externa) dos equipamentos. A parafina reduz a inibição da cura e melhora a resistência do topcoat às intempéries, aos respingos e aos vapores corrosivos.

CAPÍTULO 2

Processos abertos

1- Introdução. Este livro foi escrito para dar confiança aos usuários de equipamentos de compósitos. Ele não foi escrito para ensinar fabricantes como fazer ou montar equipamentos. Os usuários não precisam conhecer detalhes dos processos de fabricação. Para eles basta saber “como os equipamentos são feitos” e quais as características dos processos que podem afetar seu desempenho.

Este capítulo foi dividido em quatro partes. A primeira faz uma ligeira introdução aos três processos de molde abertos usados comercialmente, conhecidos como laminação com pistola, laminação manual e laminação por enrolamento. As partes que seguem tratam desses três processos sem dar cobertura completa a nenhum deles.

Vamos iniciar a apresentação dos processos fazendo uma rápida e superficial menção aos aspectos essenciais dos laminados usados para fazer equipamentos industriais.

2 – Laminados industriais. A figura 1 mostra a construção padrão da parede de equipamentos usados em aplicações industriais, evidenciando as posições do liner, da barreira de corrosão, da estrutura e do topcoat.

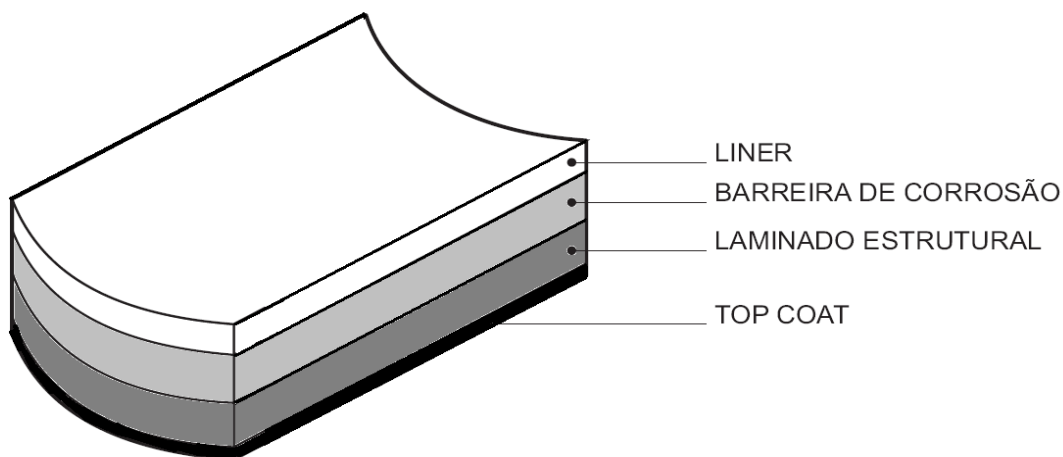


Figura 1

Corte transversal da parede de equipamentos de compósitos usados em ambientes agressivos. O liner, com 90% de resina, tem como função retardar a difusão de produtos químicos. A barreira de corrosão, com 70% de resina, serve para impedir contato direto do laminado estrutural com produtos agressivos. Os equipamentos podem trabalhar sem liners, mas não dispensam as barreiras de corrosão. O laminado estrutural não deve ter contato direto com produtos agressivos. O topcoat serve de proteção externa contra raios solares e respingos agressivos. A vida química dos equipamentos de compósitos é determinada pela rapidez de difusão e pela intensidade da deterioração do laminado estrutural pelos produtos agressivos.

Antes de falar sobre os processos de laminação, vamos descrever rapidamente a função dos laminados mostrados na figura 1.

2.1 - O liner. Todos equipamentos de compósito para uso industrial devem ter uma lâmina interna rica em resina, conhecida como liner. Os liners são feitos impregnando véus de superfície com resina devidamente ativada para curar na temperatura ambiente.

Os véus são mantas finas formadas por fibras de poliéster ou de vidro. Os véus de vidro são feitos com ligante solúvel e fácil de impregnar com resina. Os véus de poliéster não têm ligante, sendo por isso difíceis de impregnar. Alguns especialistas alegam que o ligante presente nos véus de vidro reduz o desempenho do liner. Isso de fato não ocorre, porque a quantidade de ligante é muito pequena e também porque ele é totalmente solúvel na resina.

Os véus de superfície são usados pelas razões seguintes:

- *Asseguram uniformidade da espessura (mínimo 0,30 mm) do liner.*
- *Aumentam a resistência do liner à abrasão e ao impacto.*
- *Permitem a laminação imediata da barreira de corrosão, sem esperar pelo tempo de toque.*

Das três razões acima, a possibilidade de fazer laminação sem esperar pelo tempo de toque é a mais importante. Essa espera é necessária para laminados feitos com resina pura, sem véus, para evitar que as fibras penetrem nela e aflorem na superfície interna do equipamento. A penetração das fibras na resina líquida, antes de ela curar, inutiliza a função do liner. Por isso, a laminação sem véu deve ser interrompida até a resina atingir o chamado “ponto de toque”. A presença do véu impede a penetração das fibras na resina líquida, possibilitando a laminação imediata da barreira de corrosão, sem esperar pelo tempo de toque.

Mesmo sabendo que as fibras do véu facilitam a penetração de produtos químicos nos laminados (efeito cavalo de tróia), todos liners de equipamentos industriais são feitos com véu de superfície. Os liners feitos sem véu (conhecidos como gelcoats) são usados apenas em produtos de consumo que exijam excepcional acabamento superficial, como barcos e piscinas.

Ao contrário das barreiras de corrosão, que nunca trincam, os liners trincam com facilidade, principalmente sob impacto ou em presença de ambientes agressivos.

2.2 - A barreira de corrosão. As barreiras de corrosão são feitas com fibras de vidro picadas, impregnadas pela mesma resina usada no liner. Elas devem ter no mínimo 900 g/m² de fibras picadas, que dão 2,0 mm de espessura. Em ambientes extremamente agressivos, como cloro ou dióxido de cloro, ou extremamente penetrantes, como ácido clorídrico, a espessura da barreira de corrosão deve ser maior que esses 2,0 mm mínimos.

Alguns engenheiros substituem as barreiras de corrosão depois delas serem penetradas por produtos agressivos. Eles fazem isso para evitar contato desses produtos com os laminados estruturais dos equipamentos. Nesses casos, a espessura da barreira de corrosão determina

o intervalo entre as paradas para manutenção. Nossa opinião sobre isso é apresentada nos capítulos 10 e 16 deste livro.

Para dar a espessura mínima de 2,0 mm, a barreira de corrosão deve ter pelo menos 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado. As fibras picadas podem ser laminadas com pistola, ou manualmente com mantas.

2.3 - O laminado estrutural. Os laminados estruturais podem ser feitos com fibras de vidro picadas, tecidas ou contínuas, dependendo do processo de fabricação. Esses detalhes serão discutidos mais adiante. A espessura do laminado estrutural é calculada para resistir aos esforços atuantes no equipamento.

Os laminados estruturais são construídos para ter altos módulos de elasticidade, e não para ter baixa permeabilidade. Os produtos agressivos difundem com maior rapidez nos laminados estruturais que nas barreiras de corrosão. Por essa razão, muitos usuários trocam as barreiras de corrosão penetradas por produtos agressivos. Nesses casos, os laminados estruturais nunca têm contato com produtos agressivos, tendo vida química infinita. Mas, se essa operação não for feita (como acontece com tubos de pequenos diâmetros) os laminados estruturais são penetrados e deteriorados, tendo grande relevância na vida química dos equipamentos.

2.4 - O topcoat. Os topcoats são lâminas de resina pura, sem fibras, com 0,3 mm de espessura, aplicados na superfície externa dos equipamentos. Eles asseguram proteção contra atmosferas agressivas e intemperismo, sendo feitos com resina parafinada e geralmente sem véu de superfície. A aplicação da resina pode ser feita com pistola ou com rolo.

A ausência do topcoat facilita o ataque do ambiente à superfície externa do equipamento. Em casos extremos, como atmosferas ricas em cloro, ou com grande incidência solar, esse ataque pode remover a resina da superfície externa, deixando as fibras expostas. A exposição das fibras deixa os equipamentos “lanudos”, como mamutes.

Em seguida vamos dar uma rápida descrição dos três processos de fabricação que usam moldes abertos. Esses processos são discutidos com mais detalhes no livro “Introdução aos Compósitos”.

Vamos iniciar pela laminação com pistola.

3 - Laminação com pistola (spray-up). A laminação com pistola é feita com máquinas laminadoras especiais, que cortam as fibras de vidro contínuas e as atiram em moldes abertos simultaneamente com a resina. As fibras picadas e a resina são assentadas no molde, onde ocorre a impregnação. O ar ocluído é eliminado com roletes ou pincéis, antes do início da cura.

Antes de iniciar a laminação, a superfície do molde deve ser coberta com desmoldantes. Os mais usados são soluções aquosas de álcool polivinílico, ceras e filmes de poliéster. Os liners são aplicados sobre moldes devidamente cobertos com esses desmoldantes.

O liner é o primeiro a ser aplicado. Ele é laminado manualmente, com véu de superfície e resina devidamente catalisada e acelerada para curar na temperatura do ambiente. Os catalisadores e os aceleradores para curar o liner devem ser usados em suas formas mais concentradas, para evitar excesso de plastificantes. Os agentes tixotrópicos, insolúveis na resina, devem ser evitados para minimizar o efeito cavalo de tróia. O fabricante deve esmerar na laminação dos liners, espalhando a resina nos moldes antes de aplicar o véu.

Os liners que trabalham em ambientes muito agressivos podem trincar e perder sua função protetora. Nesses casos eles devem ser aplicados sobre uma lâmina de fibras picadas ou de fibras tecidas, que nunca trincam. Essa tecnologia, conhecida como split-liner, é discutida no capítulo 10.

A barreira de corrosão é aplicada em seguida, sem esperar pela cura da resina do liner. A laminação é feita com pistola capaz de cortar fibras de vidro e as atirar no molde junto com a resina. O material é assentado e compactado no molde com roletes e pincéis, enquanto a resina ainda está líquida. A barreira de corrosão tem espessura mínima de 2,0 mm, o que pode ser obtido aplicando 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado.

O laminado estrutural também é feito com pistola, como a barreira de corrosão. A roletagem deve ser feita imediatamente após a aplicação, lâmina por lâmina, até ser atingida a espessura desejada. Como regra geral cada passagem da pistola acrescenta 1,5 mm à espessura. Por exemplo, um equipamento de espessura 5,0 mm, requer pelo menos três passagens da pistola. Os equipamentos com espessuras muito grandes devem ser construídas em estágios, para permitir a dissipação do calor liberado na cura da resina. Não é aconselhável laminar mais que 6 mm de espessura por vez. A laminação deve ser feita esperando pelo esfriamento dos primeiros 6 mm, antes de prosseguir com a aplicação das demais lâminas.

A figura 2 mostra o processo de laminação. As fibras de vidro contínuas são cortadas na pistola, antes de ser atiradas sobre o molde. A resina é bombeada de tambores e aplicada simultaneamente com as fibras. Naturalmente que a resina deve ser ativada para curar na temperatura do ambiente. O processo de laminação com pistola aplica apenas fibras picadas. Os tecidos de vidro, se usados, devem ser laminados manualmente. A espessura do laminado estrutural varia conforme a necessidade da aplicação.



Figura 2

A laminação com pistola é usada para construir peças de geometria complexa, onde é difícil conformar as mantas e os tecidos nos moldes. Esse processo aplica a resina e as fibras usando máquinas conhecidas como laminadoras.

A peça permanece no molde até completar a cura. Terminada a cura, ela é desmoldada e preparada para a montagem do equipamento e a colocação das conexões. A preparação é feita com ferramentas pneumáticas de lixamento e de corte. A montagem das conexões e as uniões com outras peças são feitas manualmente usando tiras de mantas e de tecidos. A montagem das conexões é descrita em normas e especificações de equipamentos, como a ASME RTP-1. O leitor interessado nesses detalhes deve consultar o livro “Cálculo Estrutural de Tanques e Tubos de Compósitos”.

A inspeção do equipamento é feita durante todo o processo, desde a aplicação do desmoldante até a montagem das conexões. Terminada a inspeção, o topcoat é aplicado e o equipamento pode ser pintado.

O topcoat é feito com resina contendo parafina e absorvedor de raios UV. A parafina impede a inibição da cura da resina e retarda a degradação causada por intempéries.

Se o equipamento for usado em ambientes especialmente agressivos, é bom que ele seja pós-curado. Se usado para armazenar alimentos, além de pós-curado, ele deve ser lavado com vapor.



Figura 3
Laminação com pistola. A roletagem do laminado é feita antes da resina gelear.

4 - Laminação manual (hand lay-up). No processo de laminação manual a resina, o véu, as mantas e os tecidos são aplicados manualmente. A resina, é claro, deve ser previamente ativada para curar na temperatura do ambiente. As mantas e os tecidos são colocados no molde, um de cada vez, onde são impregnados por resina líquida aplicada com rolos ou com pincéis. A resina permanece líquida durante algum tempo (20 a 30 minutos) após a ativação com o catalizador. Nesse intervalo, conhecido como tempo de gel, o laminador faz a compactação das lâminas e a remoção do ar ocluído. O laminado é construído aplicando várias lâminas, uma de cada vez, todas impregnadas pela resina e devidamente compactadas. Depois de algum tempo a resina cura e a peça pode ser separada do molde.

O desmoldante e o liner são aplicados como dito para a laminação com pistola. A barreira de corrosão é feita com pelo menos duas lâminas de manta M450. O laminado estrutural pode ser feito exclusivamente com mantas M450 ou intercalando lâminas de mantas M450 e de tecidos T600. Os tecidos T800 também são usados.

Na grande maioria das aplicações, a laminação é feita com pares de lâminas TM, onde T representa o tecido e M a manta. Considerando que a espessura padrão da manta M450 é 1,05 mm por lâmina, e a do tecido é 0,85 mm por lâmina, a espessura do par TM é $1,05 + 0,85 = 1,90$ mm. A tabela 1 mostra a construção e a espessura padrão de laminados feitos por laminação manual. Observe que a última lâmina estrutural é feita com manta.

O processo de laminação manual é usado para fazer peças especiais (conexões, flanges), tampas e fundos de tanques. Ele é usado também para fazer revestimentos e estruturas cilíndricas como tanques, dutos e tubos.

<i>Liner</i>	<i>Barreira de corrosão</i>	<i>Laminado estrutural</i>	<i>Topcoat (mm)</i>	<i>Espessura total (mm)</i>
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM</i>	0,3	4,60
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM + TM</i>	0,3	6,50
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM + TM + TM</i>	0,3	8,40
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM + TM + TM + TM</i>	0,3	10,30
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM + TM + TM + TM + TM</i>	0,3	12,20
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>TM + TM + TM + TM + TM + TM</i>	0,3	14,10
---	----	-----	---	----
---	----	-----	---	----
<i>V</i>	<i>M + M</i>	<i>n × TM</i>	0,3	<i>n × 1,90 + 2,7</i>

Tabela 1

Mostra a construção dos laminados feitos por laminação manual. Note que o laminado estrutural é construído com pares de manta *M* e de tecido *T*. A barreira de corrosão é mostrada com 2 mantas *M450*, mas alguns ambientes exigem barreiras de maior espessura.



Figura 4

Laminação manual de flange. A manta é recortada para acomodar no contorno do molde e a resina é aplicada com pincel.



Peças de geometria complexa, como cotovelos e flanges, são feitas por laminação manual.

5 - Enrolamento cruzado (filament winding). No processo conhecido como enrolamento, ou “filament winding”, a laminação é feita enrolando fibras UD em moldes cilíndricos ou cônicos. Ao contrário dos laminados feitos manualmente ou com pistola, que praticamente não têm limitação geométrica, os feitos por enrolamento devem ter geometria adequada para receber as fibras de vidro UD.

A laminação por enrolamento é usada principalmente para construir estruturas cilíndricas, como tubos, dutos ou costados de tanques. As tampas, os fundos e as conexões de tanques são feitas em separado, manualmente ou com pistola, para posterior montagem.

Vejamos os detalhes do processo de enrolamento.

O processo começa com a aplicação de desmoldante no molde (Conhecido como mandril). Nos mandris de pequeno diâmetro (tubos) isso é feito enrolando neles um filme de plástico ou aplicando manualmente várias camadas de cera. Nos moldes de grande diâmetro (tanques) é mais comum o uso de filmes plásticos.

O liner é laminado no mandril após a aplicação do desmoldante, colocando véu de superfície sobre uma demão de resina líquida, que penetra nele de baixo para cima para facilitar a remoção de ar. O véu de superfície pode ser aplicado manualmente ou por enrolamento. O enrolamento do véu é possível nesse caso, por que o molde é cilíndrico.

A barreira de corrosão é feita laminando pelo menos 900 g/m^2 de fibras picadas sobre o liner, para dar a espessura mínima 2,0 mm. As fibras picadas são aplicadas manualmente

com mantas, como normalmente é feito, ou com pistola. A barreira de corrosão deve ser roletada com esmero para remover as bolhas de ar.

A barreira de corrosão e o liner no processo de enrolamento são feitos exatamente como nos processos de laminação manual ou com pistola.

A laminação das fibras UD, que caracteriza o processo de enrolamento, é feita em seguida. As fibras contínuas são alimentadas por um carro com movimento axial paralelo ao molde (o molde nesse caso é mais conhecido como mandril) de onde seguem para uma banheira com resina onde são impregnadas. As fibras impregnadas são enroladas sobre o mandril rotatório, descrevendo nele uma hélice de ângulo controlável. As fibras UD são enroladas assim, até completar a espessura desejada.

O topcoat externo, a desmoldagem, a montagem, etc, são feitos como nos processos manual ou com pistola.

Nota: As estruturas feitas por enrolamento cruzado têm geometria cônica ou cilíndrica, enquanto as feitas por laminação manual ou com pistola não têm limitação geométrica

Os laminados feitos por enrolamento têm menor espessura e usam menos mão-de-obra que os feitos manualmente ou com pistola. Por outro lado, esses laminados têm custos fixos mais altos, devido ao investimento em máquinas e equipamentos.

A figura 5 mostra as fibras UD passando pela banheira onde são impregnadas com resina líquida antes de serem juntadas pelo pente em um feixe paralelo. Esse feixe passa por um anel alisador (não mostrado na figura) que o agrupa em faixa compacta e sem lacunas entre os fios roving. Depois do anel alisador, a faixa é enrolada no mandril giratório. O conjunto formado pela banheira, pente e anel alisador é montado em um carro com movimento vai-vem paralelo ao eixo do mandril. A combinação das velocidades de rotação do mandril com a de translação do carro, faz com que as fibras UD descrevam uma hélice de passo constante no mandril.

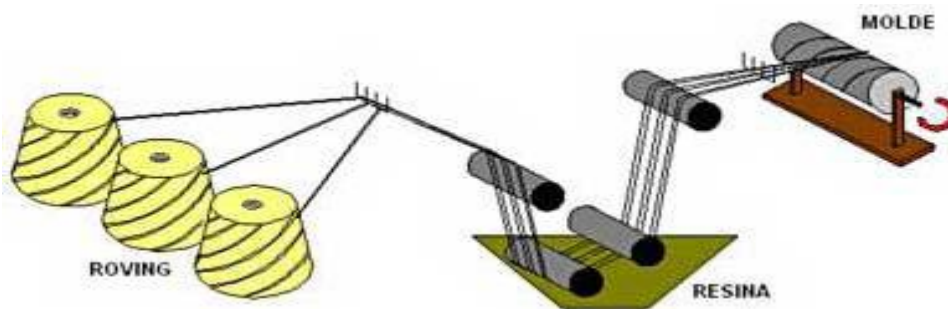
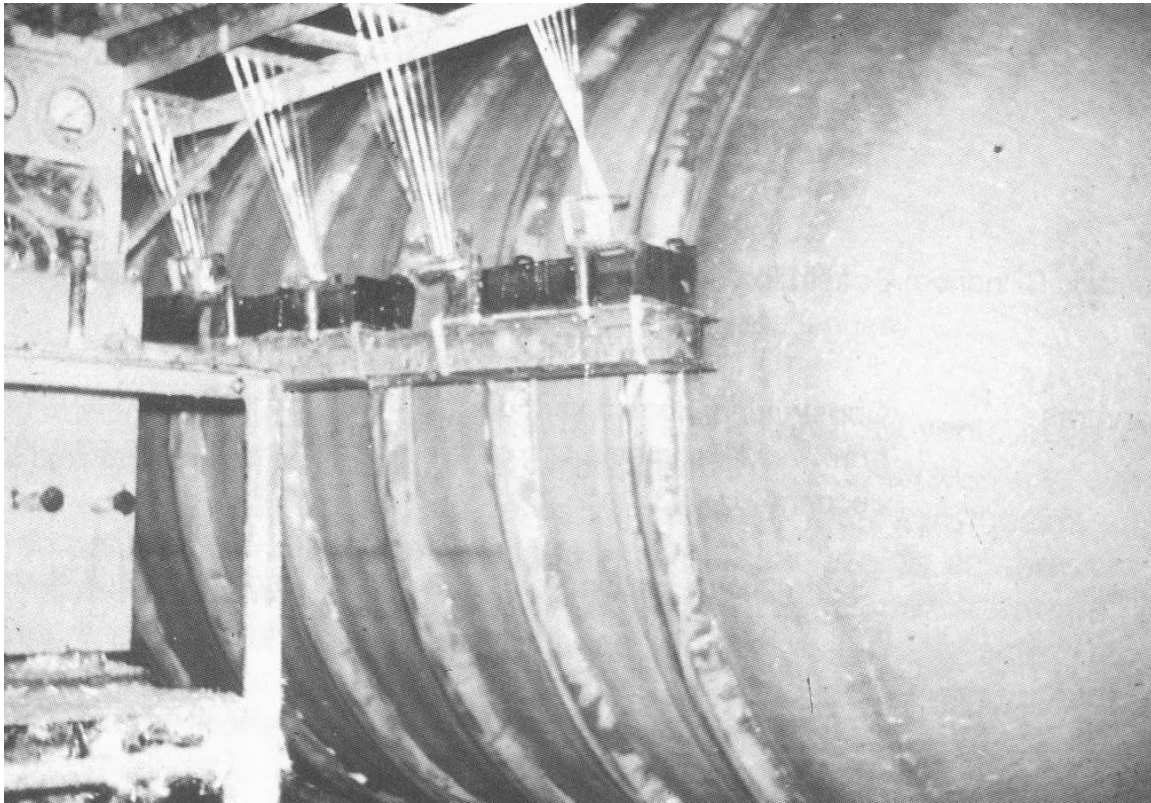


Figura 5
Laminação por enrolamento. As fibras UD são impregnadas com resina antes de ser enroladas formando hélices sobre o mandril. As fibras impregnadas são alisadas imediatamente antes da aplicação no mandril. O anel alisador não é mostrado na figura.

O processo de filament winding é descrito em detalhes no capítulo 7 do livro “Introdução aos Compósitos”.

6 - Nervuração e montagem de tanques. Os tubos e os costados de tanques cilíndricos podem ser feitos por qualquer um dos processos citados antes, usando fibras picadas, tecidas ou contínuas. Porém, as conexões, a tampa e o fundo dos tanques são feitos separadamente, por laminação manual ou com pistola.

A montagem de tampos e fundos no corpo cilíndrico de tanques é feita por laminação manual, usando tiras de manta e de tecido impregnadas com resina. As tiras são laminadas do lado de fora do tanque, acompanhando a linha da emenda. O acabamento interno é feito laminando na linha da emenda a barreira de corrosão e o liner iguais aos especificados para o equipamento. A montagem de bocais é feita da mesma maneira, exceto que as tiras são aplicadas do lado interno e externo do tanque.



Nervuras feitas com fibras UD enroladas sobre formas de papelão ou de espuma plástica. As nervuras geralmente são laminadas manualmente com mantas e tecidos.

Estruturas cônicas ou cilíndricas de grandes diâmetros, operando sob vácuo ou vento, podem necessitar de nervuras circunferenciais. Essas nervuras, são laminadas externamente nos costados sobre formas de espuma de poliuretano ou de polietileno. A geometria das nervuras é determinada para dar as inércias adequadas. Isso é mostrado em detalhes no livro “Cálculo Estrutural de Tanques de Compósitos”.

A boca de visita é fixada no costado por emendas internas e externas feitas por laminação manual. As figuras 8 e 9 mostram duas opções de montagem para bocais e bocas de visita. Os detalhes das espessuras e dimensões dos laminados de reforço e de colagem mostrados nessas figuras estão bem quantificados na norma ASME RTP-1 e no livro “Cálculo Estrutural de Tanques de Compósitos”. Os laminados internos de espessura t_i , mostrados nas figuras 8 e 9, são mais eficientes para fixar a boca de visita que os laminados externos de espessura t_o .

As bocas de visita são os locais mais vulneráveis e sujeitos a falhas em tanques de compósitos. Isso acontece porque elas são montadas perto do fundo dos tanques, onde ficam submetidas a altas pressões. A descolagem das bocas de visita é responsável pela maioria das falhas catastróficas observadas em tanques de compósitos.

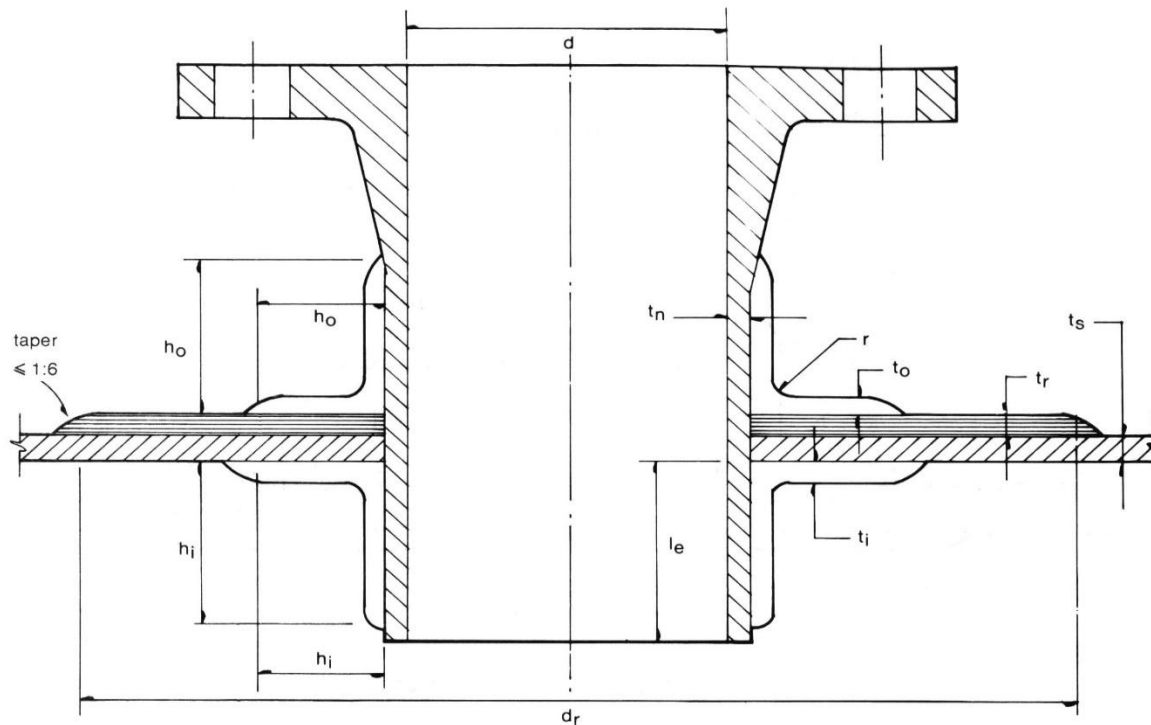


Figura 8

O bocal projeta para dentro do tanque. O laminado interno t_i fica em contato direto com o ambiente agressivo e por isso deve ter maior espessura que o externo t_o .

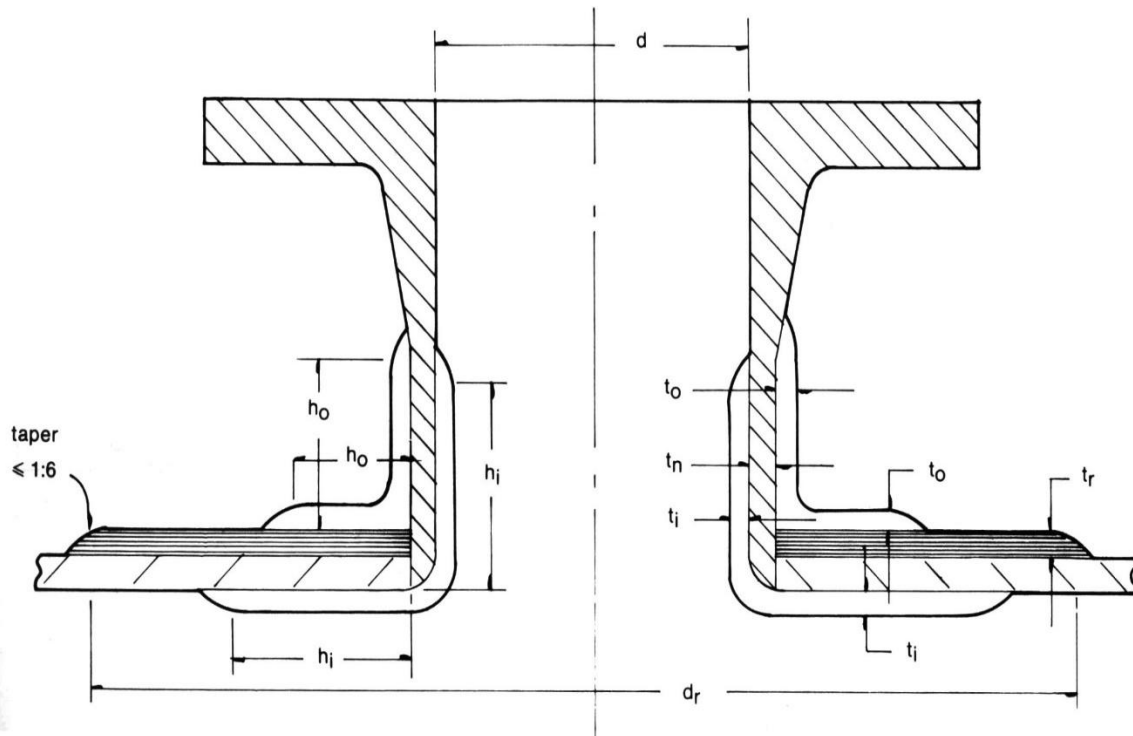


Figura 9

Bocal nivelado, sem projeção para dentro do tanque. O laminado interno t_i deve ter espessura maior que a do laminado externo t_o .



Retoque final na emenda da tampa com o costado.

7 - Recapitulação. Conhecidos os aspectos essenciais dos processos de fabricação, vamos fazer uma ligeira recapitulação da construção dos laminados que compõem a estrutura de equipamentos de compósitos para ambientes agressivos.

O liner deve ser construído com véu de superfície e resina adequada ao ambiente. Quando comparados aos liners de resina pura, os feitos com véu têm espessura mais uniforme e menor tendência à propagação de trincas. Os véus usados comercialmente são feitos com fibras de vidro, de poliéster ou de polipropileno com gramatura entre 35 e 45 g/m². Em ambientes muito agressivos, ou em altas temperaturas, o liner deve ser aplicado com tecnologia split-liner.

A barreira de corrosão deve ter no mínimo 2,0 mm de espessura, construída com fibras de vidro picadas impregnadas com a mesma resina usada no liner. O liner e a barreira de corrosão são algumas vezes substituídos assim que penetrados pelo ambiente agressivo. Nesses casos, o laminado estrutural não afeta a durabilidade química dos equipamentos. Se essa substituição não for possível (caso de tubos) ou não for desejada, a espessura do laminado estrutural define a durabilidade química.

O laminado estrutural pode ter várias construções, dependendo do processo de laminação. O processo manual usa lâminas de fibras tecidas ou picadas. A laminação com pistola usa exclusivamente fibras picadas. O processo de enrolamento usa fibras de vidro UD. O processo hoop-chop combina fibras contínuas com fibras picadas. Em todos os casos, as fibras de vidro são impregnadas com resina.

O topcoat protege os equipamentos externamente contra intempéries, respingos e vapores agressivos. Ele é construído com resina parafinada contendo absorvedor de UV.

Muitas vezes a proteção contra intempéries é obtida pintando o topcoat com tinta especial para uso exterior.

8 – Processos e durabilidade. A vida química dos equipamentos de compósitos depende da espessura da parede e da construção do laminado.

8.1 – Fibras picadas versus fibras UD. Uma pergunta recorrente diz respeito ao efeito da construção do laminado. Será que equipamentos construídos com fibras picadas têm vida química mais longa que os feitos com fibras UD?

Alguns especialistas argumentam (corretamente) que os produtos agressivos penetram com mais rapidez nos laminados de fibras UD que nos de fibras picadas. Ademais, a espessura dos equipamentos de fibras UD é menor que a dos feitos com fibras picadas

Esse poderoso argumento favorece os equipamentos de fibras picadas. Podemos concluir:

Os equipamentos de fibras picadas duram mais que os de fibras UD, porque demoram para ser penetrados e têm maior espessura.

Esse argumento tem exceções.

Como exemplo, citamos os produtos pouco agressivos e de alta solubilidade, que solubilizam a resina sem afetar as fibras. Para esses produtos, é melhor usar laminados com

fibras UD. Este é o caso do tanque discutido no capítulo 3, que após mais de 30 anos operando com solução de formol 50% @ 60C, teve a barreira de corrosão totalmente destruída sem sofrer danos apreciáveis na estrutura de fibras UD. Esse tanque, se feito com fibras picadas, teria vida muito curta.

8.2 – Resina nobre na estrutura ou só na barreira de corrosão. Outra questão recorrente diz respeito à necessidade de usar resinas de alto desempenho na estrutura dos equipamentos.

Alegam alguns que as resinas de alto desempenho devem ser usadas apenas no liner e na barreira de corrosão.

Alegam outros que as resinas de alto desempenho devem ser usadas em todo equipamento, inclusive nas lâminas estruturais.

A vida química dos equipamentos em ambientes agressivos é determinada pelo módulo residual do laminado, que depende fortemente do desempenho da resina. Por isso minha recomendação é:

Usar resina nobre em toda estrutura.

Capítulo 3

Cavalo de Tróia e split-liner

1 – Introdução. Em tempos recentes foi observado que alguns ambientes muito agressivos, principalmente em altas temperaturas, trincam e inutilizam os liners dos equipamentos de compósito. Os equipamentos feitos sem liner têm desempenho químico melhor do que aqueles que trabalham com liners trincados.

Este capítulo mostra como evitar trincas no liner. E explica também o efeito “cavalo de Tróia”.

As moléculas muito reativas são capturadas pela resina e penetram lentamente nos laminados. Isso ajuda a explicar porque os produtos agressivos levam muito tempo para penetrar e deteriorar as paredes dos equipamentos de compósitos.

A lei de Fick explica a penetração de solventes não reativos em laminados, mas não vale para explicar a penetração produtos reativos, que são capturados pela resina.

O liner oferece o primeiro obstáculo à penetração de produtos agressivos. Depois dele vem a barreira de corrosão. Dessa maneira as lâminas estruturais, geralmente feitas com fibras UD, ficam protegidas de contato direto com produtos agressivos. Os liners feitos com véu de superfície têm entre 93% e 96% de resina por volume. As mantas de fibras picadas têm aproximadamente 83% de resina por volume. As fibras UD têm aproximadamente 50% de resina por volume.

Este capítulo propõe as seguintes hipóteses.

- *As partículas sólidas são impenetráveis, vedando a passagem de qualquer tipo de molécula.*
- *Os solventes penetram rapidamente pela massa de resina*
- *Os produtos reativos são capturados e penetram lentamente na massa de resina.*

Essas hipóteses nos levam ao interessante efeito “cavalo de Tróia”, que explica como as partículas sólidas aceleram a penetração de produtos químicos.

2 – O efeito cavalo de Tróia. Nos anos 50, quando foram feitos os primeiros equipamentos de compósitos para ambientes agressivos, ninguém conhecia a importância da barreira de corrosão. Foi notado nessa época que os equipamentos construídos unicamente com fibras UD eram rapidamente penetrados pelo ambiente agressivo e tinham vida curta. Para solucionar esse problema, a SPI (Society

of the Plastics Industry) propôs que os equipamentos industriais fossem construídos com barreira interna de mantas para retardar a penetração do ambiente agressivo. A barreira de corrosão sugerida pela SPI era formada por um liner seguido de duas mantas M450. Essa barreira de corrosão mínima, recomendada pela SPI, foi imediatamente adotada pela norma NBS PS 15 69, permanecendo como padrão até os dias de hoje.

O tempo passou, e a experiência adquirida em inúmeras aplicações mostrou que a resina pura tinha melhor desempenho em ambientes agressivos que a resina contendo partículas sólidas, como pigmentos, agentes tixotrópicos, cargas ou fibras. O apêndice deste capítulo mostra como a presença de partículas sólidas afeta a velocidade de penetração de produtos químicos. A explicação é simples. Os produtos químicos penetram nos compósitos preferencialmente pela interfase da resina com as partículas sólidas. A interfase sólido-resina funciona como o célebre cavalo de Tróia, que facilita a passagem do “inimigo” para o interior do laminado.

Quanto maior o teor de fibras, ou de carga, ou de qualquer partícula sólida na resina, mais acentuada é a penetração do ambiente agressivo. O efeito cavalo de Tróia explica porque os liners feitos com resina pura têm vida mais longa que os feitos com véu. E explica também porque as barreiras de corrosão devem ser feitas com lâminas de fibras picadas, que têm baixos teores de vidro.

O efeito cavalo de Tróia é reconhecido e citado na literatura para lâminas feitas com resina e fibras de vidro. As publicações Americanas e Inglesas se referem a esse efeito usando a palavra “wicking”, que pode ser traduzida como “efeito pávio” e que no Brasil chamamos de “capilaridade”. O “efeito pávio”, ou “capilaridade”, indica que os produtos químicos avançam preferencialmente pela interfase entre as fibras e a resina. Este livro propõe a generalização deste conceito para todas partículas sólidas, não apenas para as fibras de vidro. E propõe também substituir o termo “efeito pávio” por efeito “cavalo de Tróia”.

Exemplo 1. *Calcular as espessuras de liners feitos com véu de vidro e com véu de poliéster.*

São dados

30 g/m²: gramatura do véu de vidro

40 g/m²: gramatura do véu de poliéster

96%: teor volumétrico de resina no liner com véu de vidro

93%: teor volumétrico de resina no liner com véu de poliéster

2,6 g/cm³: densidade das fibras de vidro.

1,2 g/cm³: densidade das fibras de poliéster

1,2 g/cm³: densidade da resina

A espessura do liner é dada pela expressão

$$\text{Espessura} = \left[\frac{\text{peso fibra}}{\text{densidade fibra}} \right] \times \left[\frac{1}{\%vol \text{ fibra}} \right]$$

Para liners feitos com véu de vidro

$$\text{Espessura} = \left[\frac{0,030}{2,6} \right] \times \left[\frac{1}{0,04} \right] = 0,30\text{mm}$$

Para liners feitos com véu de poliéster

$$\text{Espessura} = \left[\frac{0,040}{1,2} \right] \times \left[\frac{1}{0,07} \right] = 0,50\text{mm}$$

Este exemplo mostra que os liners feitos com véu de poliéster têm espessura 65% maior que os feitos com véu de vidro. A espessura do liner é obviamente importante para alongar a vida química. Sendo assim, os equipamentos feitos com véus de poliéster devem durar mais que os feitos com véus de vidro.

3 – A função do liner. A vida química dos equipamentos de compósito poderia ser alongada se as liners fossem feitos exclusivamente com resina, sem fibras ou qualquer outro produto sólido. Na prática, porém, eles são feitos com véus e até mesmo com agentes tixotrópicos. Os véus têm vantagens e desvantagens.

Do lado positivo

- *Eles controlam a espessura do liner*
- *Eles permitem a laminação imediata “úmido-sobre-úmido”, sem esperar pelo tempo de toque.*

Do lado negativo

- *Suas fibras facilitam a penetração do ambiente agressivo pelo efeito cavalo de Tróia.*
- *Os liners trincam com facilidade. Depois de trincados, eles permitem a passagem direta do produto agressivo até a barreira de corrosão.*

Os liners podem trincar em uso. Esse é um ponto fraco de todos liners, inclusive dos feitos com termoplásticos, que depois de trincar perdem a função protetora. Os liners são muito bons para proteger as lâminas de manta em ambientes pouco agressivos. Porém, em ambientes muito agressivos, ou em altas temperaturas, eles podem trincar e deixar as mantas sem proteção.

4 - A tecnologia split liner. Os liners propagam trincas porque não têm fibras picadas. As barreiras de corrosão feitas com fibras picadas não propagam trincas. Vamos repetir isso, para reforçar essa importante informação.

As fibras de vidro picadas impedem o crescimento de trincas em barreiras de corrosão.

Portanto, temos a situação seguinte:

- *Os liners trincam em ambientes muito agressivos, principalmente em altas temperaturas.*
- *O uso de véu duplo é inútil em ambientes que trincam liners.*
- *As barreiras de corrosão, feitas com mantas, não trincam.*
- *Os liners trincados são piores para a vida química que a ausência de liner.*



Os liners podem trincar em contato com ambientes muito agressivos.

Essas quatro informações sugerem a tecnologia split-liner. Essa tecnologia consiste simplesmente em intercalar uma lâmina de tecido ou de manta entre o liner e o produto agressivo. O liner protegido dessa maneira não trinca, mantendo sua função ao longo da vida do equipamento. Como vemos, a tecnologia split-liner combina os pontos fortes do liner e da barreira de corrosão. A figura 1 mostra duas versões do split-liner.

A solução mostrada na esquerda da figura 1 é recomendada para prevenir trincas em ambientes pouco agressivos, como água quente. As resinas de baixa tenacidade, como as clorêndicas e as bisfenólicas, são particularmente suscetíveis a trincas nesse tipo de aplicação. A solução apresentada na direita da figura 1 – dual split-liner – deve ser usada em ambientes muito agressivos, principalmente se o equipamento trabalhar sob flexão e for suscetível a falha por strain-corrosion.

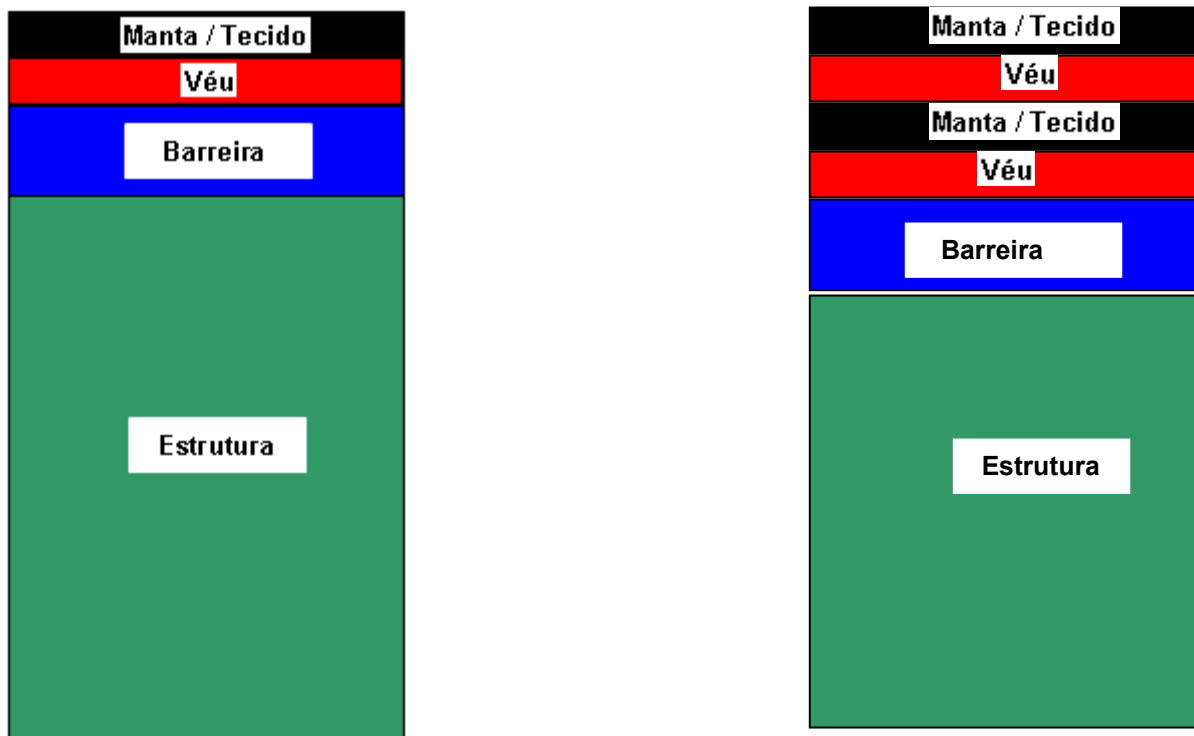


Figura 1

A proteção do liner pode ser feita com mantas de fibras picadas ou com fibras tecidas. O liner da esquerda é impedido de trincar pela lâmina de fibras picadas sobre ele. O dual split-liner mostrado à direita usa dois véus, sendo usado em ambientes muito agressivos. A tecnologia split-liner aumenta significativamente a vida química de equipamentos que trabalham em ambientes muito agressivos ou em altas temperaturas.

5 – Quando usar a tecnologia split-liner. A tecnologia split-liner deve ser usada em temperaturas muito altas, que exigem resinas de alto HDT e baixa tenacidade. As aplicações em baixas temperaturas, que podem usar resinas de baixo HDT e alta tenacidade, geralmente não requerem o uso de split-liners. Porém, existem alguns ambientes extremamente agressivos, que trincam até resinas de alta tenacidade em temperaturas baixas. Nesses casos a tecnologia split-liner deve ser usada.

A tabela 1 mostra quando usar essa tecnologia.

<i>Uso da tecnologia split-liner</i>		
	<i>Baixas temperaturas*</i>	<i>Altas temperaturas (acima de 100 °C)**</i>
<i>Ambientes pouco agressivos</i>	<i>Não precisa usar.</i> <i>Ambientes pouco agressivos em baixas temperaturas não trincam liners</i>	<i>Recomendado usar.</i> <i>Liners feitos com resina de alto HDT (baixa tenacidade) podem trincar em altas temperaturas.</i>
<i>Ambientes muito agressivos</i>	<i>Recomendado usar.</i>	<i>Necessário usar</i> <i>Ambientes muito agressivos, combinados com altas temperaturas, certamente trincam liners.</i>

	Mesmo em baixas temperaturas, alguns ambientes muito agressivos podem trincar liners	
--	--------------------------------------------------------------------------------------	--

* Temperaturas abaixo de 100 °C aceitam resinas de alta tenacidade (baixo HDT)

** Temperaturas acima de 100 °C exigem resinas de baixa tenacidade (alto HDT)

Tabela 1

A tecnologia split-liner deve ser usada em ambientes muito agressivos ou em altas temperaturas

6 – Split-liner e strain-corrosion. Outra aplicação para a tecnologia split-liner é na solução do difícil problema de strain-corrosion. O fenômeno de strain-corrosion causa falha por ruptura de equipamentos imersos em ambientes agressivos e sob flexão. Como exemplo de equipamentos trabalhando nessa situação, citamos as tubulações enterradas, usadas para transportar esgoto urbanos e alguns efluentes industriais. Essas tubulações são ovalizadas pelo peso do solo e trabalham sob flexão enquanto transportam ambientes agressivos.

A tecnologia split-liner pode prevenir falhas por strain-corrosion nesses casos. A única mudança a ser feita consiste em substituir a manta ou o tecido de fibras de vidro, por tecido de fibras de carbono. As fibras de carbono são usadas por terem resistência à corrosão superior às fibras de vidro. A figura 2 mostra como as fibras de carbono retardam a falha por strain-corrosion em tubos enterrados. Esse tema é desenvolvido com detalhes no livro “Durability of Industrial Composites”.

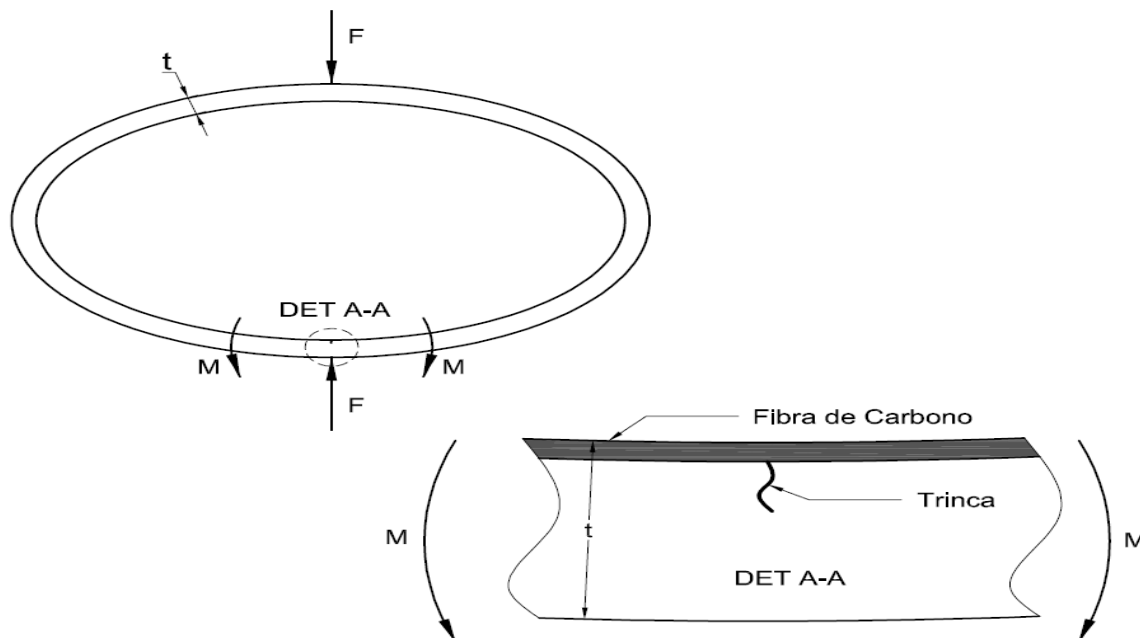


Figura 2

O tecido de fibras de carbono bloqueia o crescimento da trinca e impede a falha por strain-corrosion. A tecnologia split-liner com tecidos de fibras de carbono resolve o problema de strain-corrosion em ambientes que atacam a resina e as fibras de vidro.

Apêndice 1

O efeito cavalo de Tróia

O leitor deve imaginar três caminhos paralelos possíveis para a penetração de solventes ou produtos químicos reativos. O primeiro caminho é através da resina. O segundo passa pelas partículas sólidas e o terceiro passa pela interfase.

Suponha um equipamento em contato com solvente de concentração C . Vamos calcular o fluxo de solventes pela parede do laminado.

São dados:

Δ : Espessura do laminado

C : Concentração do solvente

S_s é a solubilidade do solvente nas partículas sólidas

S_r é a solubilidade do solvente na resina

S_i é a solubilidade do solvente na interfase

D_s : Coeficiente de difusão do solvente nas partículas sólidas

D_r : Coeficiente de difusão do solvente na resina

D_i : Coeficiente de difusão do solvente na interfase

A_s : Seção reta das partículas sólidas

A_r : Seção reta da resina.

A_i : Seção reta da interfase

Por se tratar de solvente, o fluxo é calculado pela lei de Fick.

$$[fluxo] = D_s \times S_s \times A_s \times \frac{C}{\Delta} + D_r \times S_r \times A_r \times \frac{C}{\Delta} + D_i \times S_i \times A_i \times \frac{C}{\Delta}$$

Como as partículas sólidas são impermeáveis, $D_s = 0$

$$[fluxo] = D_r \times S_r \times A_r \times \frac{C}{\Delta} + D_i \times S_i \times A_i \times \frac{C}{\Delta}$$

Levando em conta que $A_r \gg A_i$

$$[fluxo] = D_r \times S_r \times A_r \times \frac{C}{\Delta}$$

Essa equação indica que o fluxo de solventes se dá pela resina, segundo a lei de Fick.

Suponhamos agora a penetração de um produto agressivo. Para produtos agressivos, temos que $D_r \ll D_i$, compensando o fato de $A_r \gg A_i$. Portanto, para produtos agressivos, o fluxo é

$$[fluxo] = D_r \times S_r \times A_r \times \frac{C}{\Delta} + D_i \times S_i \times A_i \times \frac{C}{\Delta}$$

Essa equação indica que a difusão de produtos químicos reativos se dá pela resina e pela interfase. Observamos que a difusão aumenta com a seção da interfase, que cresce com o teor de partículas sólidas. Assim, para reduzir a penetração de produtos químicos, devemos usar compósitos com baixos teores de carga ou de vidro. Como os valores de D_r e A_i são muito pequenos, concluímos que a difusão de produtos agressivos deve ser muito lenta em laminados.

Esse é, em essência, o significado do fenômeno que estamos chamando de cavalo da Tróia. Ele nos diz que os solventes e a água penetram pela resina, enquanto os produtos químicos difundem pela resina e pela interfase da resina com as partículas sólidas.

Exemplo 2. Com base na discussão anterior, que diferença deve haver entre os laminados usados para solventes e os usados para produtos químicos?

A penetração de produtos químicos é reduzida diminuindo o teor de fibras de vidro. Assim, os melhores laminados para contato com produtos químicos são feitos com liner de resina pura e com baixos teores de fibras na barreira de corrosão e no laminado estrutural.

A penetração de solventes é reduzida reduzindo o teor de resina, isto é, aumentando o teor de fibras. Assim, os melhores laminados para solventes são feitos sem liner, sem barreira de corrosão e com altos teores de fibras UD.

Essas conclusões são confirmadas na foto abaixo, tirada de um tanque exposto por mais de 30 anos a uma solução com 50% de formol a 60C. A solução de formol é pouco agressiva aos compósitos, funcionando como solvente.

A foto mostra o laminado estrutural (cor escura) e a barreira de corrosão (cor amarela) após a exposição. A barreira de corrosão e o liner (esquerda, cor amarela) foram saturados e destruídos pelo formol. Observe, porém, que o formol pouco penetrou e não causou danos no laminado estrutural de fibras UD.



Apêndice 2

Testando a tecnologia split-liner.

A tabela 2 deixa claro que as melhores resinas para suportar altas temperaturas são as que têm alongamentos de ruptura baixos. Isso é irônico. As resinas que melhor suportam altas temperaturas são aquelas que trincam por ter baixa tenacidade.

<i>Propriedades da resina</i>	<i>Vinil éster DK 411</i>	<i>Poliéster bisfenólica</i>
<i>Alongamento na ruptura (%)</i>	<i>5,0</i>	<i>2,5</i>
<i>Absorção de água (%)</i>	<i>0,8</i>	<i>0,4</i>
<i>HDT seco (°C)</i>	<i>105</i>	<i>140</i>
<i>HDT saturado* (°C)</i>	<i>95</i>	<i>135</i>
<i>Máxima temperatura de uso em aplicações estruturais (°C)</i>	<i>85</i>	<i>125</i>

* O HDT cai quando a resina plastifica ao absorver água.

Tabela 2

Compara duas resinas usadas em ambientes agressivos. O liner de resina poliéster bisfenólica tem baixa tenacidade e trinca em ambientes aquosos acima de 100°C.

Observando a tabela 2, vemos que a resina poliéster bisfenólica pode trabalhar em aplicações estruturais até 125 °C. Porém, o liner dessa resina tem baixa tenacidade, trincando em ambiente aquoso a 100 °C. Isso implica na inutilização de liners bisfenólicos acima de 100C.

A resina DK 411 tem alta tenacidade e não trinca o liner nessa condição, mas não pode ser usada em temperaturas acima de 85C.

A tecnologia split-liner impede o trincamento do liner e permite o uso pleno da resina bisfenólica em ambientes aquosos e em temperaturas até seu limite estrutural de 125 °C. Para confirmar isso, ensaiamos corpos de prova feitos com as duas resinas citadas na tabela 2, usando a tecnologia split-liner mostrada no desenho da direita na figura 3

Os corpos de prova feitos com e sem a tecnologia split-liner, usando as duas resinas da tabela 2, foram imersos em água a 120 °C durante 30 dias. As fotos que seguem mostram que o liner de resina DK 411 não trinca em ambientes aquosos a 120°C. Porém, apesar de não trincar, essa resina não pode ser usada em aplicações estruturais acima de 85C..

Os corpos de prova feitos com resina poliéster bisfenólica trincam imediatamente após imersão em água a 120 °C. Porém, quando feitos usando a tecnologia split-liner, eles não exibem qualquer sinal de trincas após 30 dias de imersão.

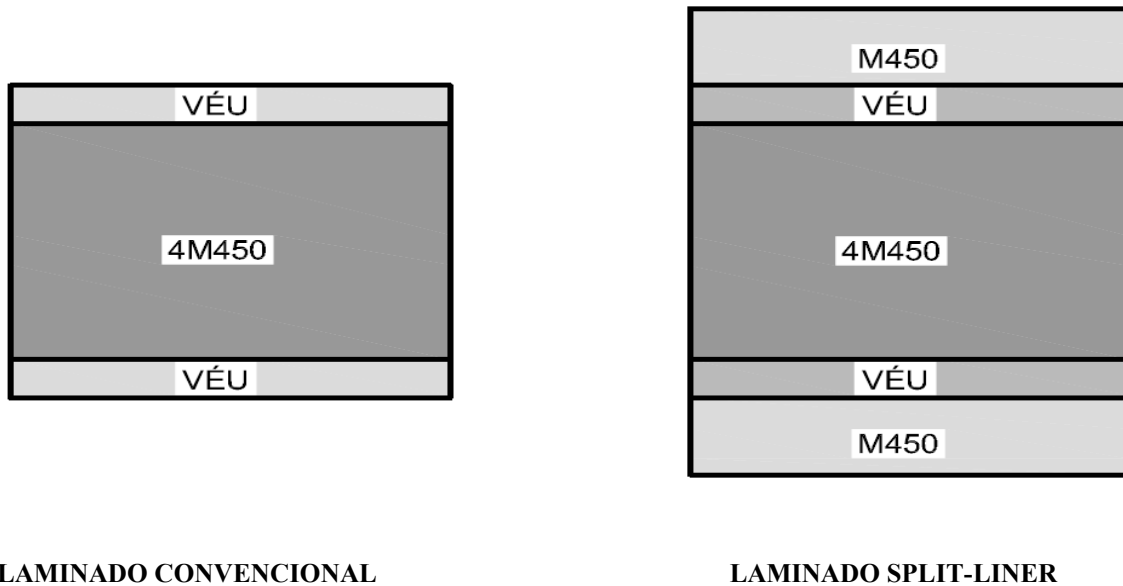


Figura 3

Nos corpos de prova convencionais, o liner fica diretamente exposto ao ambiente. Nos corpos de prova feitos com a tecnologia split-liner, o liner é protegido com uma lâmina de fibras picadas. A lâmina protetora impede as trincas no liner.

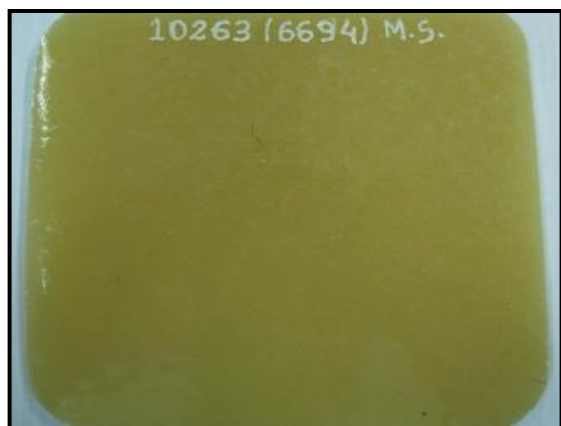


Início



30 dias de imersão

Liner convencional feito com resina poliéster bisfenólica. A foto da direita mostra o liner trincado após 30 dias em água a 120 °C.

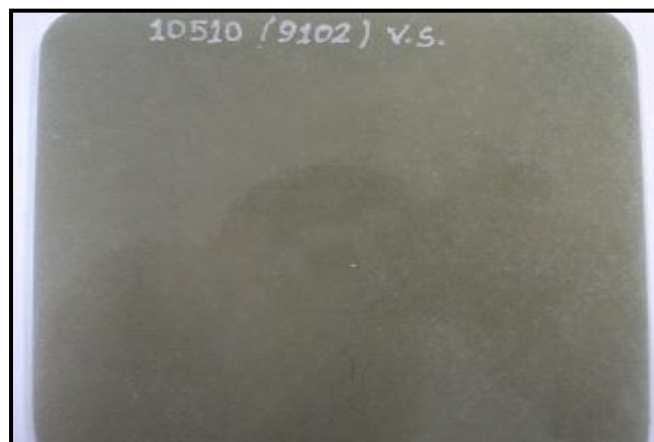


Início



30 dias de imersão

Resina poliéster bisfenólica com tecnologia split-liner. A foto da direita mostra ausência de trincas após 30 dias em água a 120 °C.



Início

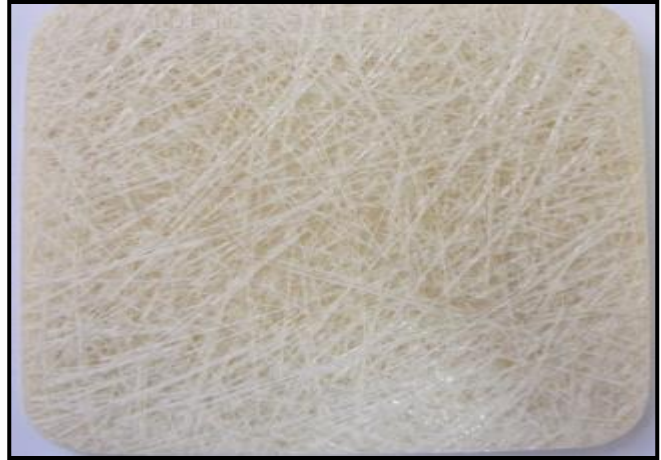


30 dias de imersão

Resina vinil éster com tecnologia convencional. Essa resina tem alta tenacidade e não trinca o liner após 30 dias em água a 120 °C.



Início



30 dias de imersão

Resina vinil éster com tecnologia split-liner. A foto da direita mostra ausência de trincas após 30 dias em água a 120 °C.

Capítulo 4

Influência da temperatura

1 – Introdução. Os equipamentos de compósitos são usados para armazenar, transportar ou processar soluções aquosas em altas temperaturas. Os projetistas e os usuários têm interesse em conhecer o efeito da água e da temperatura nas propriedades dos laminados.

As fibras não são afetadas pela temperatura de operação dos compósitos. O problema é a resina, que sofre queda brusca no módulo de elasticidade ao atingir a temperatura crítica conhecida como HDT (Heat Distortion Temperature). Essa redução brusca no módulo determina a máxima temperatura de uso dos compósitos em aplicações estruturais secas, isto é, na ausência de água. O HDT é uma propriedade das resinas. Ele é determinado medindo a deflexão de uma barra de resina pura, sem fibras, simplesmente apoiada nas extremidades e carregada no centro com força transversal constante. A barra é ensaiada imersa em óleo sob temperatura crescente. A imersão em óleo aquece a resina sem absorver água. A deflexão aumenta lentamente com a temperatura do óleo, até atingir o HDT, que define a máxima temperatura de uso estrutural dos laminados feitos com ela.

O HDT, portanto, é uma propriedade de resinas, não de laminados. Ele marca um ponto de transição muito importante para as resinas. Por exemplo, em temperaturas acima do HDT

- *O módulo da resina cai bruscamente.*
- *Os coeficientes de dilatação térmica e hídrica da resina crescem abruptamente*
- *A absorção de água da resina também cresce abruptamente.*

O HDT seco medido na resina imersa em óleo tem pouca utilidade prática, porque os equipamentos industriais trabalham imersos em ambientes aquosos. Portanto, o HDT das resinas deve ser avaliado em banho de água, não em óleo. Veremos mais adiante como fazer a correção dos valores secos para os valores saturados com água.

Os coeficientes de dilatação térmica e de dilatação hídrica dos laminados não são discutidos neste capítulo. O leitor interessado deve procurar o livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos”.

2 - HDT e máxima temperatura de uso. A temperatura de trabalho tem efeito marcante na vida química dos compósitos. Esse tópico é analisado com detalhes no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites” e não será tratado aqui. Neste capítulo vamos determinar a máxima temperatura de uso dos compósitos sem levar em conta a vida química.

A máxima temperatura de uso dos compósitos – ignorando a vida química – é determinada pela resina e depende de a aplicação ser ou não estrutural. A tabela 1 mostra isso.

	<i>Aplicação estrutural</i>	<i>Aplicação não-estrutural</i>
<i>Ambiente aquoso</i>	$T_{\max} = HDT_{\text{sat}} - 10^{\circ}C$ <i>As melhores resinas são as que absorvem pouca água e têm alto HDT seco.</i>	$T_{\max} = HDT_{\text{sat}}$ <i>As melhores resinas são as que absorvem pouca água e têm alto HDT seco.</i>
<i>Ambiente seco</i>	$T_{\max} = HDT_{\text{seco}} - 10^{\circ}C$ <i>As melhores resinas são as que têm alto HDT seco.</i>	<i>A máxima temperatura de trabalho é determinada pela decomposição térmica da resina, variando entre 150°C e 200°C.</i>

Tabela 1

A máxima temperatura de trabalho é determinada pelo HDT seco da resina. Ela depende de o ambiente ser seco ou aquoso e da aplicação ser ou não estrutural.

A figura 1 mostra o efeito da temperatura no módulo de elasticidade de resinas poliéster e vinil éster. Abaixo do HDT, a redução do módulo é quase imperceptível. Podemos supor módulo constante abaixo do HDT. Acima do HDT, a rápida queda do módulo impede o uso dos compósitos em aplicações estruturais. Portanto, o HDT da resina limita a máxima temperatura de uso dos compósitos em aplicações estruturais.

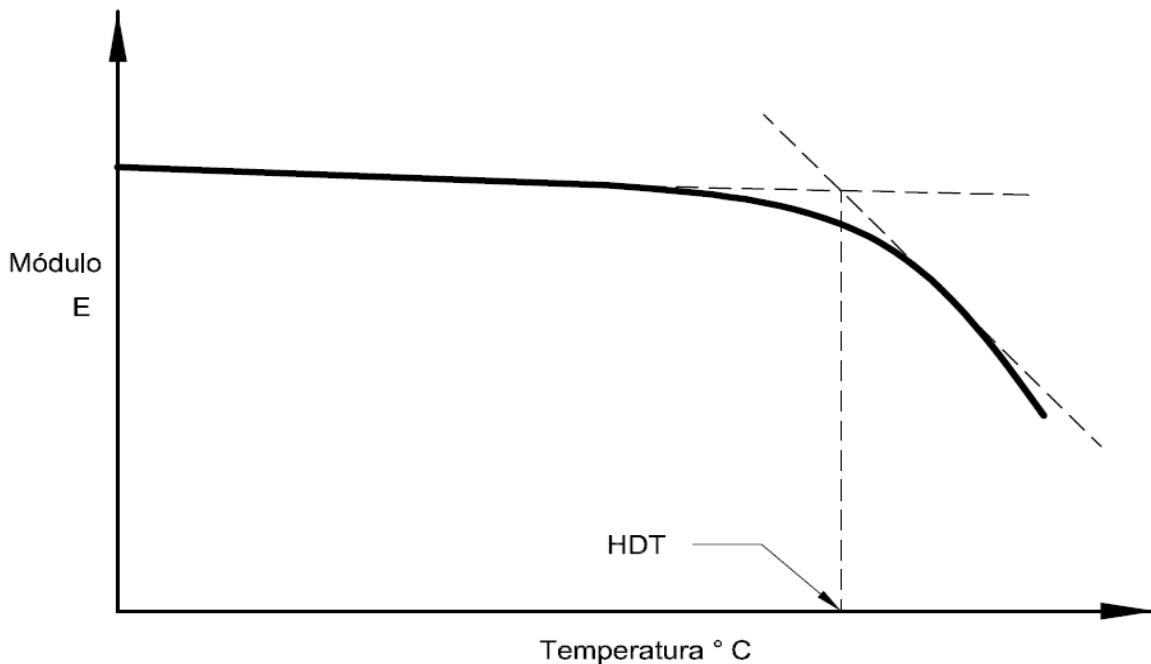


Figura 1

Efeito da temperatura no módulo de elasticidade de resinas e de laminados. Abaixo do HDT, a queda é pequena, podendo ser ignorada. Acima do HDT a queda é acentuada. Essa é a razão para não usar compósitos acima do HDT em aplicações estruturais. O HDT da resina determina a máxima temperatura de uso dos equipamentos de compósito em aplicações estruturais.

Nenhum equipamento de compósito deve trabalhar em aplicações estruturais acima do HDT da resina. O conhecimento do HDT, e da maneira como ele varia em função da quantidade de água ou de solventes absorvida pela resina, nos informa com segurança se o equipamento pode ou não ser usado nessa ou naquela temperatura.

3 – Efeito dos solventes no HDT. Vamos agora explicar porque o módulo da resina cai quando ela absorve água ou solventes. São duas as causas para isso. A primeira é o aumento da distância entre as moléculas, causado pelo inchaço da resina. A segunda é a redução da constante dielétrica causada pela intromissão da água ou dos solventes nos espaços intermoleculares. Esses dois fatores reduzem a força de atração eletrostática entre as moléculas da resina e explicam a queda do módulo. Além de reduzir o módulo, a diminuição da força de atração entre as moléculas também reduz o HDT e plastifica a resina.

Fica assim explicado porque a absorção de água ou de solventes plastifica resinas, causando queda no módulo e no HDT. A equação abaixo mostra a variação do HDT em função da quantidade de água ou de solvente que é absorvida.

$$HDT_{sat} = HDT_{seco} - \lambda \times \Delta m$$

Onde

HDT_{sat} é o HDT da resina saturada pela água ou pelo solvente

HDT_{seco} é o HDT da resina sem absorver água ou solvente.

λ é um coeficiente empírico

Δm é a quantidade de água ou de solvente que é absorvida pela resina.

Segundo Chamis, para água, λ = 10 se Δm for expresso em %. Para os demais solventes, os valores de λ ainda não foram medidos. Neste livro vamos supor que os solventes polares, como metanol e etanol, tenham o mesmo valor de λ que a água, isto é, λ = 10 se Δm for expresso em %. Esta é apenas uma suposição, que é feita com finalidade didática, para ilustrar o efeito dos solventes na máxima temperatura de uso dos compósitos. Repetimos que os valores de “λ” não foram ainda medidos para solventes. Atualmente conhecemos apenas o valor λ = 10 que é válido para água.

Exemplo 1. *Calcular o HDT da resina DK 411 saturada com água ou com etanol.*

São dados:

HDT_{seco} = HDT = 105°C (este valor é informado pelo fabricante da resina)

λ = 10 (suposto igual para água e para etanol)

Δm = 14% (etanol)

Δm = 1% (água)

Os HDTs saturados são calculados pela equação

$$HDT_{sat} = HDT_{seco} - \lambda \times \Delta m$$

Para etanol

$$HDT_{sat} = 105 - 10 \times 14 = -35C$$

Para água

$$HDT_{sat} = 105 - 10 \times 0,8 = 97C$$

Este exemplo mostra o enorme efeito dos solventes na máxima temperatura de uso dos compósitos. A queda do HDT da DK 411 saturada com etanol é tão grande que impede seu uso em aplicações estruturais acima de $-35C$. Isso, claro, supondo $\lambda = 10$ para etanol. A queda do HDT da DK 411 em presença de água é pequena ($8C$) e pouco afeta sua máxima temperatura de uso em aplicações estruturais.

Como as aplicações industriais geralmente envolvem ambientes aquosos, a temperatura máxima de uso dos equipamentos de compósitos é determinada pelo HDT da resina saturada com água. A tabela 2 mostra a solubilidade da água em algumas resinas e os respectivos HDTs secos e saturados.

Resina	Absorção de água	HDT seco	HDT saturado*	Máx. temperatura de uso
DK 470	1,20%	145 °C	125 °C	115C
DK 411	0,80%	105 °C	97 °C	87C
DK 441	0,80%	115 °C	107 °C	97C
BISFENÓLICA	0,40%	140 °C	135 °C	125C

* calculado supondo $\lambda = 10$.

Tabela 2

Mostra as máximas temperaturas de uso estrutural para algumas resinas comerciais em ambientes aquosos. A máxima temperatura de operação deve ser $10^{\circ}C$ menor que o HDT da resina saturada.

A figura 1 mostra que, abaixo do HDT, o efeito da temperatura na rigidez dos laminados pode ser ignorado. As normas geralmente recomendam que a máxima temperatura de operação dos equipamentos de compósitos seja $20^{\circ}C$ menor que o HDT seco. Eu acho mais seguro recomendar temperatura máxima de uso $10^{\circ}C$ menor que o HDT saturado. Essa recomendação está bem clara na tabela 2.

Segundo a tabela 2, a máxima temperatura de uso dos compósitos em aplicações estruturais e ambientes aquosos é

$$T_{max} = HDT_{sat} - 10^{\circ}C$$

Ainda segundo a tabela 2, para aplicações não estruturais em ambiente aquoso, a temperatura máxima de trabalho é

$$T_{\max} = HDT_{\text{sat}}$$

Nenhuma resina deve ser usada em ambientes aquosos acima de seu HDT saturado. Essa recomendação é importante, porque acima do HDT saturado a enorme absorção de água pode trincar o laminado quando ele esfriar.

Exemplo 2. Determinar a máxima temperatura de uso da resina DK 411 em contato com etanol (a) em aplicações estruturais e (b) em aplicações não estruturais.

A máxima temperatura de uso da resina DK 411 em aplicações estruturais com etanol é

$$T_{\max} = HDT_{\text{sat}} - 10$$

$$T_{\max} = -35 - 10 = -45C$$

Para aplicações não estruturais, a máxima temperatura de uso em etanol é

$$T_{\max} = HDT_{\text{sat}} = -35C$$

Este exemplo ilustra o uso da resina DK 411 em contato com etanol. Ele mostra que não é possível usar a DK 411 na temperatura ambiente. Isso, é claro, supondo $\lambda = 10$ para etanol.

Exemplo 3. Determinar a absorção máxima aceitável de solventes para as resinas citadas na tabela 2. Resolver o problema para uma temperatura de trabalho OT qualquer. Analisar os casos de (a) aplicações estruturais e (b) de aplicações não estruturais.

Para resolver esse problema é necessário conhecer o parâmetro λ para cada solvente. O valor $\lambda = 10$ é conhecido apenas para água. Vamos supor que $\lambda = 10$ seja válido para todos solventes. Essa suposição, naturalmente, é incorreta.

São dados:

HDT_{seco} = listados na tabela 2

$\lambda = 10$ (válido para água, mas adotado para outros solventes)

Temperatura de trabalho = OT

Para aplicações estruturais, temos

$$HDT_{\text{seco}} - \lambda \times \Delta m - 10 = OT$$

$$\Delta m = \frac{HDT_{\text{seco}} - (OT + 10)}{\lambda}$$

A equação acima resolve o problema para as aplicações estruturais.

Para aplicações não-estruturais, temos

$$HDT_{\text{seco}} - \lambda \times \Delta m = OT$$

$$\Delta m = \frac{HDT_{\text{seco}} - OT}{\lambda}$$

As equações acima determinam as quantidades máximas de solventes que podem ser absorvidas pela resina respectivamente para aplicações estruturais e não estruturais na temperatura de trabalho OT . Note que essas quantidades dependem do HDT seco da resina e do parâmetro λ .

Se o compósito trabalhar na temperatura ambiente, a absorção máxima Δm é obtida entrando $OT = 20^{\circ}C$ nessas equações. A tabela 3 mostra as quantidades máximas de solventes que podem ser absorvidas para aplicações na temperatura ambiente.

Resina	HDT seco	Δm para aplicações estruturais*	Δm para aplicações não estruturais**
DK 470	145 $^{\circ}C$	11,5%	12,5%
DK 411	105 $^{\circ}C$	7,5%	8,5%
DK 441	115 $^{\circ}C$	8,5%	9,5%
BISFENÓLICA	140 $^{\circ}C$	11,0%	12,0%

* calculado com $OT = 20^{\circ}C$ e $\lambda = 10$.

** calculado com $OT = 20^{\circ}C$ e $\lambda = 10$

Tabela 3

Mostra as quantidades máximas de solventes que podem ser absorvidas pelas resinas para uso na temperatura ambiente.

Exemplo 4. Determinar a máxima temperatura de uso da resina DK 470 em contato com tolueno. A solubilidade do tolueno na DK 470 é $S = \Delta m = 10,0\%$.

Para aplicações estruturais

$$\Delta m = \frac{HDT_{\text{seco}} - (OT + 10)}{\lambda}$$

$$10,0 = \frac{145 - (OT + 10)}{10}$$

De onde obtemos $OT = 35^{\circ}C$

Para aplicações não estruturais

$$\Delta m = \frac{HDT_{\text{seco}} - OT}{\lambda}$$

$$10,0 = \frac{145 - OT}{10}$$

De onde obtemos $OT = 45^{\circ}C$

Exemplo 5. Descrever o processo de escolha da resina para uso no transporte de vinhaça.

O quadro abaixo mostra a composição típica da vinhaça. O ácido acético, os cloretos e o pH ácido (próximo a 3) tornam a vinhaça muito agressiva ao aço. Para os compósitos, porém, essa composição não é agressiva e a escolha da resina pode ser feita considerando a vinhaça como água quente.

Composição típica de vinhaça	
Água	< 90,00%
Ácido acético	0,30% a 0,50%
Cloretos	> 0,30%
pH	> 3,0

São dois os critérios para escolher resina para uso em vinhaça.

- **Umbra de exudação.** A vinhaça transportada em tubos enterrados, ou em caminhões tanques, exige o uso de laminados feitos com resina de alta tenacidade. Sugerimos que a resina tenha umbra de exudação $T_w > 0,8\%$.
- **HDT.** O HDT da resina saturada com água deve ser $10^{\circ}C$ maior que a temperatura de trabalho. Por exemplo, se a temperatura da vinhaça for $100^{\circ}C$, o HDT da resina saturada com água deve ser maior que $110^{\circ}C$.

O quadro abaixo lista algumas resinas com seus respectivos HDT's e máximas temperaturas de trabalho.

Resinas para vinhaça				
Resina	Tipo	HDT seco	HDT saturado	Temperatura máxima de trabalho
DK 411	Vinil éster	$105^{\circ}C$	$97^{\circ}C$	$87^{\circ}C$
DK 441	Vinil éster	$115^{\circ}C$	$107^{\circ}C$	$97^{\circ}C$

Exemplo 6. Suponha que as resinas do quadro acima, para vinhaça, sejam usadas para fazer pás eólicas. Quais seriam as máximas temperaturas de trabalho?

A aplicação é estrutural e o ambiente é seco. A máxima temperatura de trabalho deve ser $10^{\circ}C$ menor que o HDT seco. O quadro abaixo mostra isso.

Resinas para pás eólicas

<i>Resina</i>	<i>Tipo</i>	<i>HDT seco</i>	<i>HDT saturado</i>	<i>Temperatura máxima de trabalho</i>
<i>DK 411</i>	<i>Vinil éster</i>	<i>105⁰ C</i>	<i>N.A</i>	<i>95⁰ C</i>
<i>DK 441</i>	<i>Vinil éster</i>	<i>115⁰ C</i>	<i>N.A</i>	<i>105⁰ C</i>

CAPÍTULO 5

Propriedades especiais dos compósitos

1 – Introdução. Muitas vezes os equipamentos de compósitos são usados em ambientes que suscitam dúvidas nos usuários. As mais frequentes são relacionadas a altas temperaturas, risco de incêndio e exposição às intempéries. A deterioração por contato com produtos químicos agressivos e a fadiga por cargas cíclicas também são muito questionadas.

Vamos, então, discutir o comportamento dos compósitos na presença desses agentes agressivos.

2 - Intemperismo. Os principais agentes de intemperismo são:

- *Chuva*
- *Vento*
- *Oscilações térmicas*
- *Radiação ultravioleta*

A chuva não causa danos nos compósitos. O vento também não. As oscilações térmicas relacionadas ao intemperismo também não preocupam. A deterioração pelas intempéries é causada principalmente pelos raios solares ultravioleta de alta energia. Os raios UV têm energia suficiente para romper ligações moleculares e fragilizar resinas.

Os laminados expostos diretamente aos raios solares mudam de cor, perdem o brilho e desenvolvem trincas superficiais que captam e acumulam partículas carregadas pelo vento. Como os raios UV têm pequeno poder de penetração nos laminados, esses problemas são restritos à superfície do laminado. Os danos causados pela radiação UV são, portanto, superficiais e cosméticos. Eles podem ser retardados de várias maneiras. As principais maneiras de retardar os danos causados pelos raios UV são:

- *Adição de absorvedores na resina da lâmina superficial. Esses absorvedores captam a energia UV e a dissipam de forma inócua. Infelizmente eles se decompõem com o tempo e perdem a função protetora após 2 a 3 anos de uso.*
- *Proteção da superfície exposta com pintura periódica. As tintas usadas para isso devem ser certificadas pelos fabricantes para uso externo. As tintas com base de poliuretano alifático dão excelentes resultados.*
- *Adição de pigmentos de alta solidez na resina da superfície*

Os raios UV destroem com rapidez a resina de topcoats feitos sem parafina, deixando expostas as fibras de vidro. As fibras expostas dão ao equipamento uma aparência desagradável, mas não afeta seu desempenho. A radiação UV afeta apenas a superfície externa do equipamento, de modo que as fibras expostas são superficiais e não afetam as propriedades originais.



A radiação UV pode destruir a resina da superfície externa e expor as fibras. A destruição da resina externa afeta apenas a aparência da lâmina superficial, sem prejudicar a capacidade estrutural do laminado.

As oscilações térmicas e os raios UV atuam de modo interativo. O aquecimento do laminado expande as microfissuras superficiais causadas pelos raios UV. O vento deposita pó e fuligem nessas fissuras, reduzindo o brilho e a translucidez originais.

Acreditamos ser este o momento apropriado para mencionar a resistência dos laminados às intempéries. As moléculas com anel benzênico, como o estireno, são particularmente sensíveis ao ataque da radiação UV. É por isso que os laminados com altos teores de estireno amarelam intensamente quando expostos ao sol. Quanto maior o teor de estireno na resina, mais acentuada é essa descoloração. Esse inconveniente pode ser reduzido substituindo parte do estireno por metacrilato de metila, que não tem anel benzênico. Além disso, o metacrilato de metila modifica o índice de refração da interfase vidro-resina, aproximando-o ao das fibras de vidro. Isso permite a construção de laminados de alta translucidez, nos quais as fibras são praticamente invisíveis.

As resinas esterificadas com glicóis contendo ligações éter têm menor resistência aos raios solares que as sintetizadas com propileno glicol, etileno glicol ou neopentil glicol. Isso contribui para explicar a grande tendência das resinas bisfenólicas e viniléster a amarelar quando expostas ao sol. Os poliésteres formulados com NPG (neopentil glicol) têm boa retenção de brilho, sendo usados para fazer gelcoats de alto valor cosmético para serviço externo, exposto às intempéries. Os gelcoats de piscinas e de barcos caem nessa categoria e por isso são feitos com resinas poliéster contendo NPG.

O sistema de cura também influi na retenção de cor dos laminados. Por exemplo, o sistema de cura BPO-DMA produz laminados de cor amarela. A tonalidade amarela resulta do DMA e fica mais acentuada quando o laminado é exposto ao sol.

3 - Altas temperaturas. O espaçamento intermolecular das resinas aumenta acentuadamente acima do HDT, provocando queda acentuada no módulo de elasticidade, aumento significativo na absorção de água e o início do fenômeno conhecido como “creep” ou fluência viscosa. O HDT indica uma transição importante na estrutura molecular das resinas. Nenhum laminado deve trabalhar em aplicação estrutural ou em ambiente aquoso acima do HDT da resina. Porém, em temperaturas abaixo do HDT, os compósitos não sofrem “creep”, não absorvem excesso de água nem perdem módulo de elasticidade.

As altas temperaturas têm dois efeitos nos compósitos industriais, um deles negativo e outro positivo. O negativo é o incremento na taxa de deterioração causada pelo ataque de produtos químicos. Os fabricantes de resina fazem ensaios exaustivos para avaliar esse efeito e publicam tabelas, ou guias, de resistência química onde isso é claramente demonstrado. O efeito positivo é o aumento nos umbrais de infiltração e de exudação.

Concluindo, podemos afirmar que temperaturas abaixo do HDT não afetam o desempenho estrutural do laminado. Aliás, as resistências dos laminados à infiltração e à exudação melhoram em altas temperaturas. Essa afirmação tem enorme impacto econômico nas tubulações de compósitos usadas em altas temperaturas. Esses detalhes podem ser encontrados no livro “Durability of Industrial Composites”.

4 - Fogo. O comportamento dos compósitos em presença de fogo é analisado sob os pontos de vista de auto-extinção ou de espalhamento de chamas. Essas análises são referidas na literatura como resistência a fogo. O espalhamento é medido pela velocidade de propagação das chamas em presença da fonte de calor. A auto-extinção é medida pelo tempo de eliminação da chama após remoção da fonte. Outra consideração importante é a liberação de fumaça e de gases tóxicos no processo de queima. Essas considerações servem para caracterizar e comparar diferentes compósitos. Elas servem também de base para o engenheiro que deseja prever o comportamento de estruturas em situações reais de fogo.

Para conhecer o desempenho das estruturas em situações reais de fogo, o engenheiro faz ensaios específicos que tentam simular as condições de uso. Existem vários ensaios para isso, dependendo da aplicação pretendida. A indústria de petróleo, por exemplo, adota um ensaio conhecido como “fire endurance” que estabelece o tempo mínimo que as tubulações devem manter suas funções quando submetidas a situações de fogo. A indústria de construção civil prefere o ensaio de túnel ASTM E - 84 a ser descrito mais adiante.

Os poliésteres, como a maioria dos polímeros orgânicos contendo carbono e hidrogênio, queimam com facilidade, liberando grande quantidade de fumaça. Como a composição atômica dos poliésteres é similar à da madeira, os produtos de combustão são também similares. Deve ser observado que esses produtos dependem não somente da composição do material combustível, mas também das condições de queima. Havendo grande disponibilidade de oxigênio, os principais produtos da combustão dos plásticos e da madeira são gás carbônico e água. Se a atmosfera for pobre em oxigênio, pode ocorrer grande evolução de fumaça e de monóxido de carbono. Se nitrogênio, cloro e flúor estiverem presentes na resina, eles estarão também presentes nos gases liberados.

A inclusão de cargas minerais nos laminados tem grande efeito na resistência ao fogo. Essa influência pode ser positiva ou negativa. Por exemplo, um laminado contendo 30% de fibras de vidro queima mais rapidamente que uma placa de resina pura, ao passo que a adição de trióxido de antimônio e de alumina hidratada reduzem consideravelmente a velocidade de propagação de chamas, podendo até tornar os laminados auto extingüíveis.

4.1 – Proteção contra o espalhamento de chamas. Os fabricantes usam vários artifícios para proteger equipamentos de compósitos contra a iniciação e a propagação de chamas. Os mais usuais são a pintura com tintas intumescentes e a introdução na resina de compostos halogenados combinados com óxidos de antimônio. Alumina trihidratada e compostos de fósforo também são usados. Vamos descrever o mecanismo de combustão de laminados e seus principais sistemas proteção contra o espalhamento de chamas.

O processo de combustão exige o cumprimento de três condições.

- *Presença de combustível, em nosso caso as resinas poliéster ou vinil éster*
- *Presença de oxigênio.*
- *Suprimento ininterrupto de radicais livres, gerados pela decomposição da resina em altas temperaturas.*

A combustão é alimentada e sustentada pelo oxigênio atmosférico em presença dos radicais livres liberados na decomposição térmica das resinas. A velocidade de queima é reduzida sempre que o oxigênio ou os radicais livres forem impedidos de interagir. Os sistemas empregados para reduzir o espalhamento de chamas ou conferir auto extinção aos compósitos atacam esses problemas de maneira coerente com essa ideia.

Por exemplo, a liberação de halogênio em altas temperaturas neutraliza os radicais livres formados na queima. Essa neutralização reduz a quantidade de radicais livres disponíveis para a combustão. Ademais, alguns autores afirmam que o antimônio forma uma camada gasosa de haleto de antimônio, que isola o combustível (poliéster) do oxigênio. Isso dificulta ainda mais o espalhamento das chamas. As tintas intumescentes funcionam essencialmente da mesma maneira, inchando e formando um colchão gasoso isolante. Esses dois sistemas dificultam o acesso de oxigênio aos radicais livres, produzindo combustão incompleta e gerando grande quantidade de fumaça.

A alumina hidratada atua de outra maneira, abatendo a temperatura e reduzindo a geração de radicais livres. Por não afetar o processo de combustão, esse aditivo queima os laminados gerando pouca fumaça. O mecanismo de funcionamento da alumina hidratada será discutido mais adiante.

Vamos falar primeiro sobre os compostos halogenados e o efeito do pentóxido e do trióxido de antimônio. A halogenação das resinas poliéster ou vinil éster pode ser feita de duas maneiras.

- *Halogenação interna, que usa ácidos halogenados no processo de esterificação. Esses ácidos não são aditivos. Elas fazem parte das moléculas do polímero.*

- *Halogenação externa, que usa aditivos halogenados soltos e que não reagem com as moléculas.*

A parafina clorada e o decabromo difenil éter são exemplos de aditivos externos, que não fazem parte das moléculas das resinas. Esses aditivos externos atuam como plastificantes, podendo ter efeitos negativos em algumas propriedades dos laminados, especialmente na temperatura de termo distorção (HDT) e na resistência a solventes. Além disso, eles podem exudar com o tempo, fazendo com que o laminado perca suas propriedades de resistência a fogo. A halogenação externa, feita com aditivos, não é muito usada. A preferência dos usuários é pela halogenação interna, onde as resinas são sintetizadas com ácidos halogenados e não perdem propriedades. Os laminados resistentes a fogo geralmente são feitos preferencialmente com resinas halogenadas internamente com anidrido tetracloroftálico ou tetrabromoftálico ou ainda com ácido clorêndico (HET).

A figura 1 mostra as fórmulas estruturais do ácido clorêndico (HET) e do anidrido tetracloroftálico.

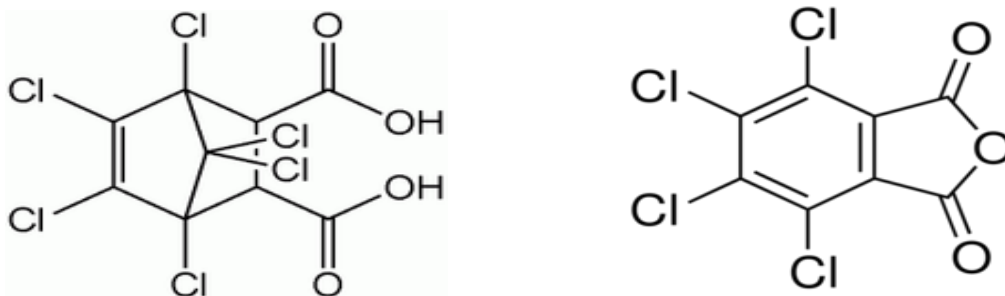


Figura 1

Ácido HET é mostrado na figura à esquerda. Ele tem 6 átomos de cloro por molécula, contra 4 do anidrido tetracloroftálico mostrado à direita.

O bromo é mais eficiente que o cloro para retardar chamas. O anidrido tetrabromoftálico, para um mesmo nível de retardamento de chamas, pode ser usado em menor quantidade que o tetracloroftálico. Isso dá ao fabricante mais flexibilidade para incorporar outras propriedades à resina. Porém, os poliésteres feitos com anidrido tetrabromoftálico têm cura imprevisível, sendo por isso pouco usados. O ácido HET tem seis átomos de cloro por molécula, contra quatro do anidrido tetracloroftálico. Por isso ele tem maior poder como retardante de chamas. Aliás, o efeito retardante do anidrido tetracloroftálico não é de entusiasmar muito, requerendo complementação com parafinas cloradas, o que não é muito bom.

O bom desempenho das resinas feitas com ácido HET pode ser melhorado com a adição de pentóxido ou de trióxido de antimônio. O uso de óxidos de antimônio em combinação com resinas halogenadas forma na queima a já mencionada camada de haleto de antimônio

que dificulta o acesso do oxigênio ao material combustível. Os óxidos de antimônio usados isoladamente em resinas não halogenadas têm apreciável efeito retardante de chamas. Porém, eles têm eficiência muito maior quando combinados com compostos halogenados. Temos aqui um típico exemplo de sinergismo, em que o efeito dos dois retardantes (halogênio + antimônio) atuando juntos é maior que a soma dos respectivos efeitos se cada um atuasse isoladamente.

A tabela 1 mostra o efeito sinérgico do trióxido de antimônio atuando com parafina clorada. Os tempos de extinção são contados imediatamente após a remoção da fonte de calor.

O trióxido e o pentóxido de antimônio são sólidos. Eles são adicionados moídos, como partículas de pigmentos, que espalham a luz e tornam os laminados opacos. Para remediar isso, os laminadores preferem usar o pentóxido de antimônio, que tem partículas muito pequenas e espalham menos a luz.

<i>Material</i>	<i>Tempo de extinção (segundos)</i>
<i>Poliéster não halogenado (sem aditivos)</i>	<i>Não extingue</i>
<i>Poliéster não halogenado + 20% de parafina clorada</i>	35
<i>Poliéster não halogenado + 20% de Sb_2O_3</i>	20
<i>Poliéster não halogenado + 20% de Sb_2O_3 + 20% de parafina clorada</i>	0

Tabela 1

Tempo de extinção das chamas após remoção da fonte de calor. A adição de trióxido de antimônio torna os laminados opacos, dificultando a inspeção visual.

As partículas do pentóxido de antimônio são menores que as do trióxido, o que lhes confere duas vantagens. Primeiro, elas deixam os laminados translúcidos e inspecionáveis visualmente. E segundo, elas permanecem em suspensão na resina sem sedimentar durante o processo de laminação. Existe hoje uma nítida preferência para o uso de pentóxido em lugar de trióxido de antimônio. V. tabela 2

<i>Propriedades</i>	<i>Trióxido de antimônio</i>	<i>Pentóxido de antimônio</i>
<i>Tamanho das partículas</i>	<i>2 microns</i>	<i>0,03 microns</i>
<i>Forma</i>	<i>Pó</i>	<i>Líquido*</i>
<i>Teor para obter classe A (E - 84)</i>	<i>5%</i>	<i>7,5%</i>
<i>Passagem de luz</i>	<i>Opaco</i>	<i>Translúcido</i>
<i>Sedimenta</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>

--	--	--

* Dispersão 40% em poliéster isoftálico não reativo (sem estireno).

Tabela 2

Compara o pentóxido de antimônio com o trióxido de antimônio

Vamos completar essa discussão falando sobre a halogenação externa, que usa como principal aditivo o decabromo difenil éter, com fórmula estrutural e fotos mostradas na figura 2.

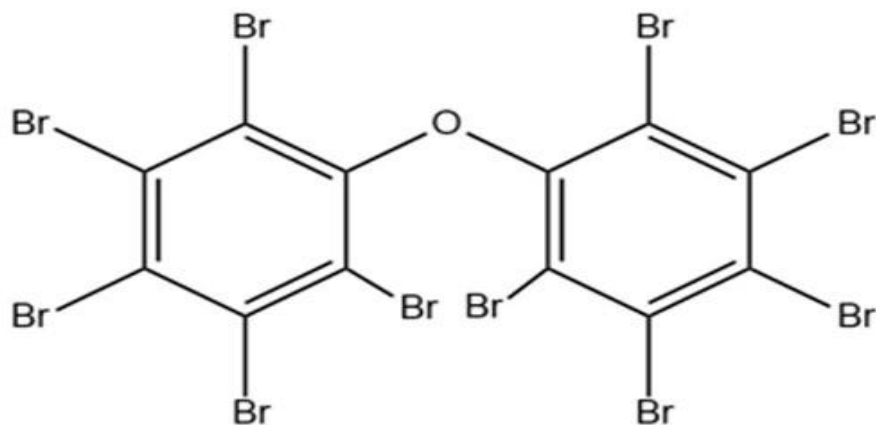


Figura 2

O decabromo difenil éter contém 10 átomos de bromo por molécula, sendo muito eficiente para retardar chamas. Como os óxidos de antimônio, ele também é sólido, sendo difícil de dispersar nas resinas.

Por ser sólido, o decabromo não apenas torna os laminados opacos, como também afeta o desempenho dos equipamentos em ambientes agressivos. Ademais, considerações ambientais e toxicológicas vêm forçando sua substituição pelo equivalente decabromo difenil etano.

Vamos finalizar nossa discussão falando sobre a alumina hidratada. A alumina hidratada é um aditivo sólido (como as cargas) composto por uma molécula de óxido de alumínio e três moléculas de água, apresentando a fórmula molecular $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$. O leitor deve distinguir entre a água de hidratação, fortemente ligada às moléculas do trióxido de alumínio, e a água fracamente ligada por adsorção na superfície das partículas. A água adsorvida na superfície das partículas, conhecida como umidade, pode ser facilmente eliminada por aquecimento. A água de hidratação não pode ser eliminada por simples aquecimento, exigindo altas temperaturas para ser removida. A água de hidratação não deve ser confundida com umidade.

O mecanismo de atuação da alumina hidratada é fácil de entender. As três moléculas da água de hidratação são liberadas entre $200^{\circ}C$ e $250^{\circ}C$. Essa liberação esfria a resina, reduzindo a velocidade da queima. Simples assim. A alumina hidratada não limita o acesso do oxigênio e permite combustão completa, desenvolvendo assim pouca fumaça. Além disso, podemos perceber que a massa de poliéster contendo alumina hidratada é auto extingüível, porque a combustão cessa quando a fonte de calor é removida.

Ao contrário dos óxidos de antimônio, a alumina hidratada não apresenta sinergismo quando usada em combinação com poliésteres halogenados. São necessários 40% de alumina para equivaler aos 5% de trióxido de antimônio normalmente usados. Os laminados carregados com alumina hidratada liberam menos fumaça na queima que os carregados com óxidos de antimônio.

4.2 - Medindo a resistência a fogo. Existem vários procedimentos para avaliar o desenvolvimento de fumaça e a queima de laminados. Esses ensaios são usados para comparar formulações, não tendo forte correlação com o desempenho em condições reais de incêndios. Vamos fazer uma rápida exposição dos ensaios mais conhecidos.

O ensaio ASTM E-84 é realizado em placa de compósitos. A placa (corpo de prova) é fixada no teto de um túnel de seção retangular onde é feita a queima. O túnel de queima tem 25 pés de comprimento, 18 polegadas de largura e 12 polegadas de altura. O corpo de prova é fixado pelas bordas no teto desse túnel, ao longo de todo seu comprimento. A queima é iniciada por queimadores colocados em uma das extremidades do túnel. O espalhamento das chamas é observado através de janelas de vidro, posicionadas ao longo do túnel. A fumaça é medida por fotocélulas colocadas na extremidade do túnel oposta aos queimadores.

A calibração do equipamento é feita atribuindo o valor zero para o resultado obtido com a queima de placas de cimento e o valor 100 para o obtido com a queima de placas de madeira “red oak”. Se após 10 minutos de ensaio o corpo de prova queimar apenas 25% da distância que o “red oak” queima, ele é classificado com espalhamento de chamas igual a 25. Se queimar todo o comprimento na metade do tempo de queima da placa de “red oak”, ele é classificado com o número 200. A fumaça é medida integrando a curva de leitura da fotocélula em relação ao padrão “red oak”. Por exemplo, se a área da curva gerada na queima do corpo de prova for três vezes maior que a da gerada pelo “red oak”, o material é classificado como tendo desenvolvimento de fumaça igual a 300.

Com base nesse ensaio, os materiais podem ser classificados em várias categorias, conforme sua taxa de propagação da chama. A tabela 3 mostra essa classificação.

<i>Classificação</i>	<i>Espalhamento de chama</i>
<i>Classe A</i>	<i>0 a 25</i>
<i>Classe B</i>	<i>25 a 75</i>
<i>Classe C</i>	<i>75 a 200</i>
<i>Classe D</i>	<i>200 a 500</i>
<i>Classe E</i>	<i>Acima de 500</i>

Tabela 3
Classificação de materiais pelo ensaio ASTM E- 84



Foto do túnel onde é feito o ensaio ASTM E 84. O corpo de prova é montado no teto do túnel e a propagação das chamas é observada pelas janelas laterais durante 10 minutos. O espalhamento de chama é medido pelo avanço dela em 10 minutos. Se o corpo de prova queimar 25% da distância queimada pelo padrão, seu espalhamento de chamas é 25.

Outra maneira de avaliar o potencial de queima de laminados é pelo índice de oxigênio, definido como o teor mínimo de oxigênio necessário para manter a combustão. Assim, quanto maior o índice de oxigênio, menor é a combustibilidade do material. Lembrando que o ar contém aproximadamente 21% de oxigênio, podemos concluir que os laminados com índice de oxigênio superior a, digamos 30%, têm baixo espalhamento de chamas.

A tabela 4 compara alguns sistemas usados para combater a combustão de laminados. Os valores dessa tabela foram obtidos ensaiando corpos de prova construídos com poliéster, 20% de fibras de vidro e vários teores de carga, como indicado. Observando a tabela, podemos concluir que, desconsiderando inconvenientes como fumaça, má resistência às intempéries e opacidade, o melhor sistema para retardar chamas é obtido com poliéster halogenado (ácido HET) e trióxido de antimônio. O poliéster não halogenado, contendo 45% de alumina hidratada, pode ser considerado equivalente ao halogenado (ácido HET) sem trióxido de antimônio.

<i>Material</i>	<i>ASTM E – 84</i>	<i>Índice de oxigênio</i>	<i>Comentários</i>
<i>Poliéster não halogenado</i>	<i>400</i>	<i>18</i>	<i>Queima liberando grande quantidade de fumaça</i>
<i>Poliéster não halogenado + 45% de alumina hidratada</i>	<i>80 a 100</i>	<i>27</i>	<i>Alta viscosidade, opacidade, pouca fumaça</i>
<i>Poliéster halogenado (HET)</i>	<i>50</i>	<i>28</i>	<i>Muita fumaça</i>
<i>Poliéster halogenado + 5% de trióxido de antimônio</i>	<i>20</i>	<i>38</i>	<i>Muita fumaça</i>
<i>Amianto</i>	<i>0</i>	<i>----</i>	<i>Não queima</i>
<i>Pinho</i>	<i>130</i>	<i>N.D.</i>	<i>Queima mais rapidamente que compósitos retardantes de chama</i>
<i>Madeira compensada</i>	<i>100 a 180</i>	<i>N.D.</i>	<i>Queima mais rapidamente que compósitos retardantes de chama</i>

Tabela 4

Mostra a resistência a fogo de vários materiais. O leitor deve lembrar que o ar contém 21% de oxigênio.

5 - Produtos químicos. Os produtos químicos em contato com equipamentos de compósitos podem ser classificados em três categorias.

- *Os de alta reatividade, que têm grande interação com as resinas e pequeno poder de penetração nos laminados. Esses produtos exibem frentes de penetração planas e bem definidas. Geralmente eles não saturam toda espessura do laminado*
- *Os de baixa reatividade, que têm pouca interação com as resinas e grande poder de penetração nos laminados. Esses produtos exibem frentes de penetração difusas, podendo saturar todo o laminado*

- *Os solventes, que não interagem com as resinas, penetrando e saturando rapidamente os laminados.*

A maioria dos produtos químicos usados industrialmente cai na categoria de baixa reatividade. Esses produtos penetram fundo nos laminados, podendo saturá-los completamente. Mas, como são pouco reativos, causam pouco dano e dão vida química extremamente longa. Os produtos de alta reatividade causam grande destruição, mas penetram pouco nos laminados. Os solventes não causam danos químicos às resinas.

5.1 – O efeito escudo. Os produtos químicos penetram nos laminados, atacando a resina e as fibras. Os principais sintomas da degradação química são:

- *Alteração de cor*
- *Perda de brilho*
- *Perda de translucidez*
- *Surgimento de trincas superficiais*
- *Afloramento de fibras*
- *Perda de propriedades mecânicas*

Os produtos de alta reatividade afetam as propriedades mecânicas apenas nos equipamentos em que a barreira de corrosão não é trocada, como é o caso de tubos de pequeno diâmetro. Se a barreira de corrosão for trocada com regularidade, nos intervalos corretos, esses produtos não afetam as propriedades mecânicas dos laminados. A substituição da barreira de corrosão é muito difícil e incerta. Nossa recomendação é que ela não seja feita.

Os produtos químicos penetram nos compósitos por difusão no espaço intermolecular das resinas ou na interfase entre a resina e os sólidos embutidos nela. Eles podem penetrar também por infiltração através de micro trincas presentes na resina. Vamos comentar esses dois processos:

- *A difusão é um processo de penetração muito lento, principalmente no caso de produtos químicos reativos. As moléculas reativas – ao contrário das de solventes – interagem com a resina, sendo impedidas de prosseguir na penetração. Como resultado, a difusão de produtos altamente reativos exhibe frentes de penetração planas e bem definidas, que avançam muito lentamente nos compósitos.*
- *A infiltração é um processo mais rápido que a difusão, porque nela os produtos químicos avançam livremente nos espaços vazios formados por micro trincas presentes na resina. A infiltração pode ser evitada mantendo o equipamento abaixo do umbral de infiltração, como normalmente acontece.*

Portanto, difusão é o único processo de penetração de produtos químicos em laminados. A penetração por difusão é muito lenta. Os produtos de alta reatividade são facilmente capturados pela resina, penetrando nelas muito lentamente. Os produtos de baixa reatividade, ao contrário, são mais difíceis de capturar e por isso avançam com mais rapidez.

A difusão depende também do grau de interligação da resina. Quanto maior o grau de interligação, menor será a taxa de difusão e mais longa a vida química do equipamento.

Os produtos químicos podem eventualmente difundir por todo o laminado. Os de alta reatividade demoram para fazer isso. Os de baixa reatividade e rápida penetração fazem isso em tempos mais curtos. Os solventes saturam rapidamente todo o laminado.

A discussão anterior indica que os produtos químicos sempre penetram e saturam os laminados. Uns penetram mais, outros menos, mas todos penetram. Isso parece ser um problema, porque o material penetrado pode sofrer danos imediatos. Isso de fato não acontece por causa do “efeito escudo” resultante da baixa solubilidade dos produtos agressivos na resina. Vamos explicar o efeito escudo. A concentração de produtos químicos em laminados é determinada pela expressão

$$c = S \times C_0 \times R$$

Onde

c é a concentração do produto no laminado

S é a solubilidade do produto na resina

C₀ é a concentração da solução em contato com o equipamento

R é a fração volumétrica de resina

Exemplo 1. *Calcular a concentração de um determinado produto na barreira de corrosão de laminados.*

São dados

C₀ = 25% é a concentração do produto na solução contida no equipamento

S = 2,0% é a solubilidade do produto na resina

R = 0,84 é fração volumétrica da resina na barreira de corrosão

A concentração é

$$c = S \times C_0 \times R$$

$$c = 0,02 \times 25 \times 0,84 = 0,42\%$$

Portanto, o efeito escudo reduz a concentração do produto de 25% na solução externa para apenas 0,42% no laminado. Essa baixa concentração explica a longa vida química dos equipamentos. O efeito escudo é fundamental para explicar a durabilidade dos equipamentos industriais de compósitos.

5.2 – Efeito da resina. A composição molecular da resina tem efeito importante na durabilidade química do equipamento. Essa composição é fácil de alterar, permitindo a oferta de vários tipos de resinas. O mesmo não ocorre com as fibras de vidro, cuja composição fixa é a mesma em todas as aplicações. Se o mesmo tipo de vidro é usado sempre, a vida química dos compósitos é diferenciada unicamente pela resina.

Vamos ver como as resinas são atacadas por produtos agressivos. Os pontos mais vulneráveis e suscetíveis são as insaturações não polimerizadas (C=C) e os grupos éster. As insaturações oxidam, enquanto os grupos éster podem saponificar em ambientes alcalinos ou hidrolisar em ambientes ácidos. A água é neutra e não hidrolisa resinas, mas os ácidos sim. Outros pontos suscetíveis de ataque são os grupos terminais hidroxila e carboxila. Esses pontos vulneráveis precisam ser alcançados pelos produtos químicos para ser atacados. É por isso que o grau de interligação e o impedimento espacial dos grupos éster têm grande importância nas resinas usadas em ambientes agressivos. As resinas bem interligadas retardam a penetração dos produtos agressivos. E o impedimento espacial protege os grupos vulneráveis.

O aumento do grau de interligação e do adensamento molecular reduz a velocidade de difusão e dificulta a penetração de moléculas agressivas. Isso explica a excepcional resistência química das resinas vinil éster novolac.

Os grupos éster podem ser protegidos por grupos metila adjacentes a eles. Isso explica o melhor desempenho das resinas vinil éster feitas com ácido metacrílico quando comparadas às feitas com ácido acrílico. Atualmente todas as resinas vinil éster são feitas com ácido metacrílico.

Do exposto podemos tirar quatro conclusões quanto ao comportamento das resinas em ambientes reativos.

- *Baixas densidades de grupos éster melhoram a resistência à hidrólise e à saponificação. A densidade de grupos éster deve, é claro, ser expressa por unidade de volume e não por molécula. Isso é dito, porque é comum encontrar na literatura a afirmação que as resinas vinil éster são superiores aos poliésteres por terem apenas dois grupos éster nas extremidades da molécula, ao passo que os poliésteres, ao contrário, têm vários grupos éster distribuídos ao longo da molécula. Essa afirmação é falaciosa, porque de fato o que importa é o número de grupos éster por volume e não por molécula.*
- *Para o mesmo tipo de resina, aquela que tiver menor número de insaturações livres, não polimerizadas, terá maior resistência ao ataque químico. Assim, quanto maior o grau de cura, menor será o ataque. O leitor sabe que as resinas plenamente curadas não têm insaturações livres. Porém, a cura plena nunca ocorre na prática e sempre sobram algumas insaturações livres e suscetíveis de oxidação.*
- *Quanto maior o peso molecular da resina, menor é a densidade de grupos terminais hidroxila e carboxila e melhor é o desempenho da resina.*
- *A quarta conclusão pode surpreender. Sabemos que os pontos mais suscetíveis ao ataque químico são as insaturações e os grupos éster, e que esses pontos são comuns a todas as resinas, sejam elas poliéster ou vinil éster. Sendo assim, todas as resinas são atacadas pelo mesmo mecanismo e essencialmente da mesma maneira. O que as distingue são*
 - *A densidade dos pontos vulneráveis.*
 - *A proteção espacial dos pontos vulneráveis*
 - *A velocidade de difusão dos produtos reativos*

A intensidade do ataque é medida pela solubilidade do produto agressivo (efeito estufa) e pela profundidade penetrada. Essa profundidade depende da velocidade de difusão, que varia com o

grau de interligação e com o empacotamento molecular da resina. As resinas bem interligadas e bem empacotadas dificultam a velocidade de difusão, alongando a vida química dos equipamentos.

O umbral de infiltração é controlado principalmente pela tenacidade da resina e pela aderência dela às fibras. Quanto maiores essas propriedades, maior é o umbral de infiltração e menor é a incidência de micro trincas que facilitam a infiltração de produtos químicos. Por exemplo, as resinas poliéster bisfenólicas têm baixa tenacidade e menor aderência às fibras que a vinil éster DK 411. Isso explica o alto valor do umbral de infiltração, $T_i = 0,50\%$, para as barreiras de corrosão feitas com DK 411, contra $T_i = 0,20\%$ para as barreiras feitas com resinas bisfenólicas.

5.3 – Durabilidade química. A durabilidade de equipamentos em ambientes agressivos é computada pela equação abaixo, importada do livro “Durability of Industrial Composites”.

$$\log(E - E_{cri}) = K + C \times \log(\text{Durabilidade})$$

Onde

E é o módulo de tração inicial

E_{cri} é o módulo de tração crítico, correspondente ao umbral de infiltração

K e C são parâmetros experimentais

A durabilidade química de equipamentos é determinada pela temperatura, concentração da solução agressiva, reatividade e solubilidade do produto agressivo na resina. Os parâmetros K e C da equação acima levam em conta isso. Por exemplo:

- *O parâmetro K leva em conta a temperatura, a composição da resina e sua interação com o produto agressivo.*
- *O parâmetro C leva em conta o anteriormente citado efeito escudo*

Concluindo, podemos dizer que a deterioração dos equipamentos de compósitos em contato com produtos químicos reativos implica em lenta perda de módulo. Ao perder módulo, o alongamento na parede do equipamento aumenta. O equipamento pode ser mantido em serviço enquanto o alongamento permanecer abaixo do umbral de infiltração. No momento que o alongamento atinge o umbral de infiltração, o equipamento deve ser retirado de serviço. É assim que definimos a durabilidade e a vida química de equipamentos. A discussão completa e detalhada da vida química de laminados é tratada no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites”.

6 – Solventes. Os produtos não reativos, como água e solventes, penetram rapidamente em laminados, causando danos relacionados com o inchaço da resina. Os solventes incham a resina, reduzindo a capacidade estrutural dos laminados. Quando a absorção não é excessiva, essa deterioração é reversível e o laminado retoma suas propriedades originais quando o solvente é expelido.

A absorção de solventes pode ser estimada considerando o grau de compatibilidade ou similaridade entre eles e a resina. Essa compatibilidade pode ser estimada comparando os

parâmetros de solubilidade do polímero e do solvente. Quanto menor a diferença entre esses parâmetros, maior é a compatibilidade e maior é a absorção. O solvente absorvido atua também como plastificante, reduzindo a temperatura de distorção térmica (HDT) da resina e as propriedades mecânicas do laminado.

Depois de curadas, as resinas se tornam insolúveis e os solventes apenas penetram e incham os laminados, sem solubilizá-los. A redução do HDT limita a máxima temperatura de uso do compósito. E a redução das propriedades mecânicas limita seu uso em aplicações estruturais. O parâmetro que decide o efeito do solvente é sua solubilidade máxima na resina, ou como também se diz, a absorção máxima dele pela resina. A solubilidade ou absorção máxima definem o ponto de saturação a partir do qual a resina não aceita mais solvente. O ponto de saturação é determinado imergindo no solvente corpos de prova de resina pura (resin castings) na temperatura ambiente. Os corpos de prova devem ter pequena espessura para reduzir o tempo de ensaio. Esses ensaios determinam a absorção máxima e quantificam o efeito dos solventes nas propriedades dos laminados. Queremos deixar claro que o ensaio para medir a absorção de solvente deve ser feito em corpos de prova de resina pura (sem fibras) e na temperatura ambiente.

A tabela 5 mostra a absorção máxima de alguns solventes para resinas usadas em ambientes agressivos. Deve ser notada a pequena absorção de água (cerca de 1,0%) em relação à absorção de outros solventes. A pequena absorção de água permite o uso estrutural dos compósitos em ambientes aquosos e sob altas temperaturas

<i>Produto químico</i>	<i>Poliéster bisfenólico</i>	<i>Derakane 411</i>	<i>Derakane 470</i>
<i>Água</i>	<i>0,4%</i>	<i>0,8%</i>	<i>1,2%</i>
<i>Tolueno</i>	<i>Destrói</i>	<i>Destrói</i>	<i>10,0%</i>
<i>Vinil Tolueno</i>	<i>8,0%</i>	<i>2,0%</i>	<i>0,8%</i>
<i>Benzeno</i>	<i>Destrói</i>	<i>20,0%</i>	<i>10,0%</i>
<i>Estireno</i>	<i>21,0%</i>	<i>19,0%</i>	<i>2,0%</i>
<i>Tetracloro metano</i>	<i>11,0%</i>	<i>0,5%</i>	<i>0,0%</i>

Tabela 5

Mostra a solubilidade de alguns solventes em algumas resinas comerciais. A resina vinil éster novolac Derakane 470 é a melhor para uso em solventes.

A absorção de solventes limita o uso dos compósitos em altas temperaturas e em aplicações estruturais. O engenheiro deve decidir qual é a absorção máxima de solvente aceitável em cada caso. Não existe norma ou consenso sobre isso. Aliás, a quantificação do efeito da absorção de solventes nem é mencionada na literatura sobre compósitos. Minha sugestão é mostrada na tabela 6.

<i>Resina</i>	<i>HDT seco</i>	<i>Δm para aplicações estruturais</i>	<i>Δm para aplicações não estruturais</i>
<i>Derakane 470</i>	<i>145 °C</i>	<i>10,5%</i>	<i>11,5%</i>
<i>Derakane 411</i>	<i>105 °C</i>	<i>6,5%</i>	<i>7,5%</i>
<i>Derakane 441</i>	<i>115 °C</i>	<i>7,5%</i>	<i>8,5%</i>

<i>Poliéster modificado</i>	<i>115 °C</i>	<i>7,5%</i>	<i>8,5%</i>
<i>Poliéster bisfenólico</i>	<i>140 °C</i>	<i>10,0%</i>	<i>11,0%</i>
<i>Poliéster tereftálico</i>	<i>140 °C</i>	<i>10,0%</i>	<i>11,0%</i>

Tabela 6

Mostra as quantidades máximas de solventes que podem ser absorvidas pelas resinas para uso na temperatura ambiente.

7 – Cargas mecânicas e crescimento de trincas. Quando submetidos a esforços de tração, os laminados desenvolvem micro trincas nas fibras, na resina e na interfase fibra-resina. Essas pequenas trincas têm as mesmas dimensões e o dano causado por elas é medido por sua densidade. A densidade de micro trincas está intimamente associada aos alongamentos e define os umbrais de falha dos compósitos. Por exemplo:

- *O umbral de infiltração é o alongamento que forma densidade de trincas suficiente para permitir a rápida infiltração de ions e moléculas na parede do equipamento.*
- *O umbral de exudação é o alongamento que forma densidade de trincas suficiente para permitir a passagem de moléculas pela parede do equipamento.*

A durabilidade dos compósitos está intimamente ligada ao crescimento da densidade de trincas. Por exemplo:

- *O aumento da densidade de trincas nas fibras causa falha por ruptura.*
- *O aumento da densidade de trincas na interfase e na resina causa falha por infiltração.*
- *O aumento da densidade de trincas na resina causa falha por exudação*

Vamos analisar o crescimento dessas densidades de trincas.

As cargas cíclicas são os principais agentes desse crescimento. Os materiais homogêneos, como os metais e os plásticos, crescem uma única trinca que eventualmente os leva à ruptura por fadiga. Mas, ao contrário dos materiais homogêneos, os compósitos desenvolvem bilhões de micro trincas. A energia fornecida pelas cargas cíclicas é dissipada para crescer essa multidão de micro trincas, explicando a excepcional resistência à fadiga dos compósitos.

Portanto, nos compósitos, as cargas cíclicas crescem uma enormidade de micro trincas nas fibras e na interfase fibra-resina. O crescimento da densidade de micro trincas nas fibras causa falha por ruptura. O crescimento na resina causa falhas por infiltração e por exudação.

As cargas mecânicas afetam a durabilidade dos compósitos apenas quando crescem a densidade de trincas. Isso acontece nas situações seguintes:

- *As cargas cíclicas sempre crescem a densidade de trincas e eventualmente falham os compósitos por fadiga. A fadiga das fibras causa falha por ruptura. A fadiga da resina causa falhas por infiltração ou exudação.*
- *As cargas estáticas não crescem trincas. Se elas forem inferiores aos umbrais de falha, elas NUNCA causam infiltração ou exudação.*

A durabilidade dos equipamentos de compósitos submetidos simultaneamente a cargas estáticas e cíclicas está bem explicada no livro “Durability of Industrial Composites”.

Capítulo 6A

Umbrais de falha

1 – Introdução. Antes de iniciar o estudo dos umbrais de falha, vamos esclarecer os conceitos de interface e de interfase.

- **Interface** é a superfície de contato entre sólidos (cargas ou fibras) e a resina de laminação. Sendo uma superfície, a interface não tem espessura.
- **Interfase** é a camada de pequena espessura entre sólidos (cargas ou fibras) e a resina. A interfase é formada pela blenda da resina de laminação com o tratamento superficial das fibras ou cargas. A interfase envolve as fibras ou as cargas, formando uma capa de transição entre elas e a resina.

A interfase tem espessura e volume. A interface é uma superfície sem espessura e sem volume. Ambas têm papéis fundamentais nos umbrais de infiltração e de exudação.

Dito isso, passemos à discussão dos umbrais de falha. As lâminas que formam os compósitos desenvolvem três tipos de trincas.

- *Trincas de interface, causadas pelo descolamento entre as fibras e resina. Essas trincas são inevitáveis e estão sempre presentes.*
- *Trincas na resina. Essas trincas têm origem na interfase, mas propagam na resina.*
- *Trincas nas fibras de vidro, causadas por strain-corrosion.*

As trincas que crescem entre lâminas, conhecidas como delaminações, pertencem a laminados e por isso não foram incluídas na lista acima, que considera unicamente as trincas nas lâminas.

As trincas nas lâminas ocorrem sequencialmente, primeiro na interface, em seguida na interfase e na resina. As trincas nas fibras não têm relação com as anteriores.

As trincas de interface, isto é, os descolamentos vidro-resina acontecem sempre, tendo como causa principal as variações térmicas que acontecem no processo de cura. Podemos dizer que todos laminados trabalham com as fibras parcialmente descoladas, mesmo na ausência de cargas mecânicas. Todos laminados têm muitas trincas de interface.

As perguntas que precisamos responder são:

Que efeito as trincas de interface têm nas lâminas?

A resposta é nenhum efeito. As trincas de interface acompanham a superfície das fibras sem interligar com outras, presentes em fibras adjacentes. Elas não interligam e por isso não têm efeito nos compósitos.

Que efeito as trincas na resina têm nas lâminas?

Antes de responder essa pergunta, vamos lembrar que as trincas presentes na resina não atravessam fibras. A alta tenacidade das fibras impede o crescimento das trincas na resina. Como consequência, as lâminas submetidas a cargas mecânicas desenvolvem uma enorme quantidade de micro trincas que crescem na resina até ser paradas pelas fibras. Ao contrário dos materiais homogêneos, como os metais e os plásticos, as lâminas de compósitos não desenvolvem trincas de grande magnitude. Portanto, o parâmetro importante no estudo do desempenho de compósitos submetidos a cargas mecânicas é a densidade – e não o tamanho – de micro trincas presentes nas lâminas. As únicas trincas grandes presentes em laminados são aquelas que crescem na resina sem encontrar fibras, como as encontradas ao longo das fibras em lâminas UD, ou na fina camada de resina entre lâminas. Nesses dois casos as trincas crescem na resina, sem encontrar fibras em seu caminho.

Existe uma correspondência direta entre as densidades de trincas e os alongamentos totais (mecânicos + residuais) nas lâminas. Essa correspondência de fundamental importância permite que as densidades de trincas, impossíveis de medir, sejam representadas pelo alongamento total equivalente. Os comentários que seguem descrevem a sequência de eventos observados em lâminas quando os alongamentos totais aumentam em resposta a cargas externas. Para melhor entender essa descrição, o leitor deve dar uma rápida olhada na figura 1, importada do capítulo 6A.

- *A densidade de trincas correspondente ao descolamento entre as fibras e a resina (região 1) aumenta com a intensidade da carga. Essas trincas, presentes na interface vidro-resina, aumentam em número com incrementos na carga mecânica. Isso aumenta o coeficiente de difusão de moléculas agressivas na lâmina. Porém, as trincas de interface permanecem confinadas à superfície de suas fibras sem interagir com outras em fibras adjacentes. Ademais, o volume aberto na interface descolada é muito pequeno e pouco afeta a penetração de fluidos. O descolamento das fibras é controlado pela aderência delas à resina.*
- *Em seguida ao descolamento na região 1, a interfase e a resina matriz na região 2 desenvolvem suas próprias trincas, cujas densidades e aberturas também crescem com incrementos na carga. Esse evento libera sinais acústicos de energia correspondente ao crescimento de trincas em resinas. O alongamento total correspondente ao início dessas emissões acústicas define o umbral de infiltração da lâmina, T_i . O umbral de infiltração é controlado pela aderência vidro-resina e pelas tenacidades da interfase e da resina.*
- *Aumentando ainda mais a carga, observamos que a densidade de trincas continua a crescer na resina, eventualmente interligando para formar caminhos que permitem a passagem de fluidos. Nesse momento a lâmina inicia o processo de vazamento e o alongamento total correspondente define o umbral de exudação, T_w . O umbral de exudação é controlado pela tenacidade da resina.*
- *Aumentando ainda mais os esforços externos, as fibras começam a romper nos pontos fracos, a densidade de trincas na resina aumenta e a lâmina perde rigidez. O alongamento total correspondente a essa densidade de trincas define o umbral de rigidez, T_s .*
- *Finalmente a lâmina rompe ao atingir o umbral de ruptura, T_r .*

Este capítulo explica os conceitos dos umbrais de infiltração e de exudação observados em lâminas UD e de fibras picadas.

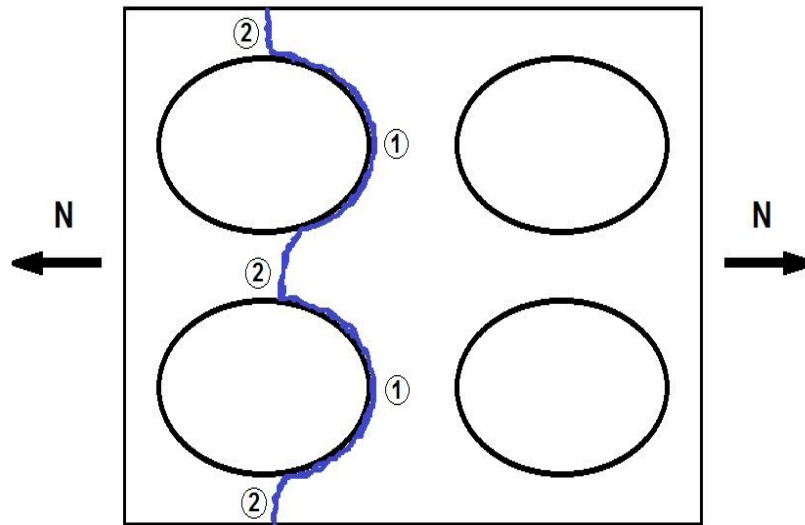


Figura 1

Mostra o arranjo quadrangular de fibras em lâminas UD e em mechas de fibras picadas. A força externa N coloca as regiões 1 e 2 sob tração. As primeiras falhas resultam de descolamento das fibras na região 1. Aumentando N , a resina rompe na região 2. As trincas crescem na direção das fibras, perpendiculares ao plano da página, e ao longo da linha 1 – 2.

2 – Descolamento vidro-resina. O descolamento entre as fibras e a resina é um evento corriqueiro, resultante de tensões geradas no processo de cura das lâminas. As trincas resultantes desse descolamento não se comunicam, ficando confinadas às superfícies das suas fibras.

As trincas de descolamento vidro-resina têm origem no encolhimento da resina no processo de cura e no esfriamento da lâmina ao passar da temperatura de pico PT até a temperatura ambiente RT . As tensões causadoras dos descolamentos dependem dos coeficientes de dilatação térmica do vidro e da resina, e da temperatura de pico na cura, PT . Considerando que esses parâmetros pouco variam de lâmina para lâmina, podemos dizer que as tensões residuais de interface, geradas pela cura e pelo esfriamento, tenham valores aproximadamente iguais para todas as resinas e todas as lâminas. Os valores exatos dessas tensões de interface não precisam ser conhecidos. Eles são embutidos no processo de caracterização e funcionam como pontos de referência, a partir dos quais todas as propriedades das lâminas são determinadas. Quando medimos as resistências ou os alongamentos de falha das lâminas, os valores obtidos incluem as tensões residuais desenvolvidas no encolhimento da resina. Isso simplifica muito a análise dos compósitos.

As resinas poliéster têm pouca aderência às fibras e apresentam descolamentos substanciais no processo de fabricação. Essa constatação pode deixar o leitor perplexo e preocupado, como eu fiquei ao tomar conhecimento dela. Se as fibras descolam da resina no processo de cura, o que podemos esperar do desempenho dos laminados? Felizmente, essa preocupação pode ser descartada, porque os descolamentos vidro-resina têm efeito desprezível no desempenho das lâminas. Para finalizar, vale dizer que esse descolamento precoce vidro-resina é insignificante nas lâminas feitas com resinas de boa aderência às fibras, como as vinil-éster.

Vamos agora discutir o efeito das tensões residuais causadas pelo esfriamento de laminados no processo de cura. As tensões mecânicas provenientes desse esfriamento são calculadas como explicado no livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos”. As tensões mecânicas totais resultam da soma das tensões mecânicas com essas tensões residuais.

À medida que os esforços totais aumentam, aumentam também a densidade e a abertura das trincas de interface, de descolamento. Eventualmente essas trincas aglutinam, deixando grandes extensões de fibras sem contato com resina. Quando isso acontece, as tensões mecânicas totais são resistidas apenas pela resina na região 2 entre as fibras. Essa pequena fração de resina não resiste grandes esforços e eventualmente rompe. Esse rompimento produz trincas na resina.

Nota: A tensão residual é causada pelo encolhimento das lâminas ao esfriar da temperatura de pico PT à temperatura ambiente RT. O leitor deve notar que anteriormente falamos no encolhimento da resina no processo de cura, ao passo que agora falamos em encolhimento térmico das lâminas. O encolhimento das lâminas pode produzir tensões residuais importantes.

3 – Trincas na resina. O alongamento total que inicia o processo de ruptura da resina na região 2 é muito importante no estudo da durabilidade química de equipamentos. As trincas na resina matriz, ao contrário das descolagens vidro-resina, podem formar grandes volumes vazios que permitem a rápida infiltração de moléculas no laminado. Ademais, essas trincas podem interligar, facilitando ainda mais essa penetração. O alongamento total que inicia a formação de trincas na resina é conhecido como umbral de infiltração. A penetração acelerada de moléculas agressivas, que acontece acima desse umbral, reduz substancialmente a durabilidade de laminados. Para detalhes, veja o livro “Durability of Industrial Composites”.

O conhecimento do umbral de infiltração é fundamental para dimensionar laminados e prever a durabilidade química de equipamentos. Abaixo desse umbral, a penetração de espécies agressivas ocorre pelo lento processo de difusão e o equipamento tem vida longa. Acima dele a vida é curta, porque a penetração ocorre com rapidez pelas trincas formadas na resina. Para ter boa durabilidade em contato com produtos químicos, os laminados devem trabalhar sempre abaixo do umbral de infiltração.

As trincas da resina na região 2 provavelmente têm início na interfase. Se for assim, a aderência e o tratamento superficial das fibras afetam não apenas o descolamento fibra-resina, discutido antes, mas também o umbral de infiltração. Ensaios realizados por

pesquisadores suecos parecem indicar um efeito apreciável da aderência e da tenacidade da interfase vidro-resina no umbral de infiltração.

Podemos dizer que o umbral de infiltração é controlado essencialmente pela tenacidade da resina e pela aderência dela às fibras. Temos uma conclusão importante:

A resina controla o umbral de infiltração através de sua tenacidade e da sua aderência às fibras.

As resinas vinil éster, que têm boa aderência às fibras, exibem umbrais de infiltração superiores aos de resinas poliéster de igual tenacidade. V. tabela 4.

Vamos seguir nossa discussão, aumentando a força externa para produzir alongamentos além do umbral de infiltração. Incrementos no alongamento aumentam a abertura e a densidade de trincas na região 2 da resina. Eventualmente a densidade de trincas cresce a ponto de interligar e formar caminhos que permitem a passagem de fluidos através da lâmina. Nesse ponto a lâmina vaza, e o alongamento que inicia o vazamento é conhecido como umbral de exudação. Esse nome se deve à formação de pequenas gotas de fluido (geralmente água) na parede externa da lâmina, como se ela estivesse suando. Em Inglês o suor observado no início do vazamento é interpretado como lágrimas, e a exudação é conhecida como “weeping”.

O tempo entre o início da aglutinação das trincas na região 2 e a observação das primeiras lágrimas depende da espessura da lâmina. Quanto maior a espessura, maior é o trajeto percorrido pelo fluido e mais longo é o tempo para o início do vazamento. O tempo de exudação é, de fato, o “tempo de viagem” para o fluido percorrer a espessura da lâmina. O tempo de exudação nada informa sobre as propriedades fundamentais dos compósitos. O parâmetro importante nesse caso é o umbral, e não o tempo de exudação. Apesar dessa constatação óbvia, a norma ASTM D 2992B define o HDB – parâmetro que mede a resistência de tubos a vazamento – tomando como base os tempos de exudação. A discussão que acabamos de apresentar deixa claro que o conceito de HDB deve ser descartado e substituído pelo umbral de exudação.

Da mesma maneira que o umbral de infiltração define o alongamento que inicia a penetração acelerada de moléculas agressivas, o umbral de exudação define o alongamento que inicia o vazamento. Sob cargas estáticas, as densidades de trincas correspondentes a alongamentos totais menores que o umbral de exudação não interligam e nunca vazam.

Os conceitos discutidos até aqui são aplicáveis a lâminas. A seção que segue discute conceitos mais apropriados a laminados.

4 – O efeito compósito. Da mesma maneira que o descolamento vidro-resina não afeta o desempenho das lâminas, a ruptura precoce de fibras também não afeta o desempenho dos laminados. Isso pode ser entendido considerando que as tensões que deixam de ser transmitidas nos pontos de ruptura são absorvidas por fibras adjacentes. Essa transferência de tensões das fibras rompidas para as adjacentes, aliada ao fato já mencionado que as fibras impedem o crescimento de trincas, é conhecida como “efeito compósito”. O efeito

compósito afirma que as rupturas nas fibras não afetam seu desempenho. Sem esse efeito, os compósitos não teriam utilidade em engenharia.

O efeito compósito explica dois fenômenos de extrema importância para laminados. São eles:

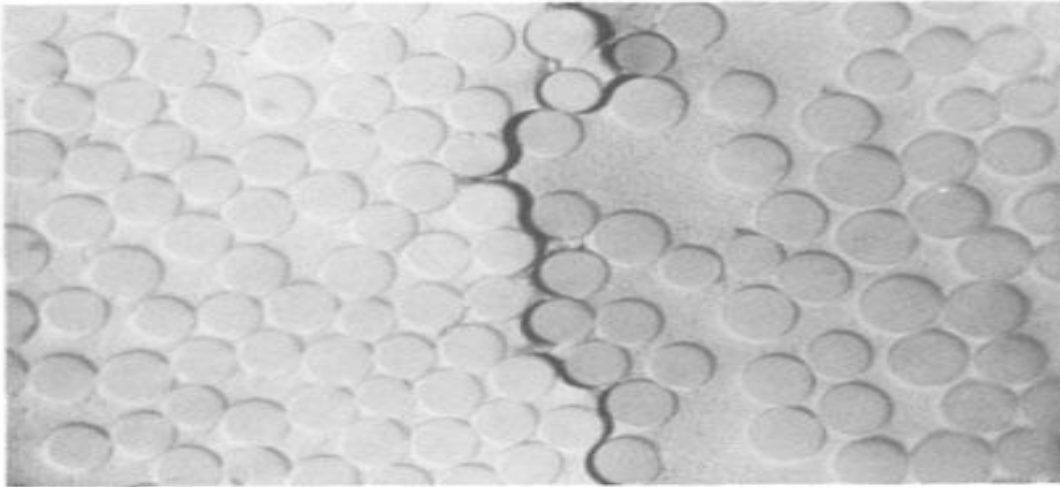
- *Na ausência de ambientes agressivos, os compósitos mantem suas resistências iniciais até a ruptura final, apesar dos inúmeros pontos de quebra nas fibras. Esse fato interessante é conhecido como “morte súbita”, indicando que os laminados “morrem” sem perder sua resistência original. As fibras rompidas causam perda de rigidez, mas não afetam a resistência dos laminados. Essa conclusão vale apenas na ausência de produtos agressivos.*
- *O “efeito compósito” explica também a excepcional resistência ao impacto e à fadiga exibida por laminados feitos combinando dois materiais de baixa tenacidade, como resinas e fibras. Isso acontece porque as trincas que crescem na resina são paradas pelas fibras, e também porque as fibras rompidas transferem cargas para as adjacentes. Como resultado disso, os compósitos espalham a energia de falha em uma enorme quantidade de micro trincas espalhadas em grandes áreas.*

Essa é a essência do efeito compósito. Como vemos, ela explica a retenção da capacidade estrutural dos equipamentos na presença de múltiplas rupturas de fibras. As múltiplas rupturas de fibras causam preocupação apenas quando suas densidades são muito altas, suficientes para afetar a rigidez dos laminados. O umbral de rigidez não tem interesse para os usuários de equipamentos em ambientes agressivos. Ele tem importância para laminados que trabalham em ambientes secos e submetidos a cargas cíclicas. Um exemplo disso são as pás eólicas.

5 – Os quatro umbrais de falha. Os umbrais de falha são alongamentos que iniciam a formação de densidades críticas de trincas em lâminas. Por essa definição, os umbrais de falha são propriedades de lâminas, não de laminados. Existem quatro densidades críticas de trincas que precisam ser levadas em conta pelos projetistas de compósitos. Essas quatro densidades críticas são medidas e expressas em termos de quatro alongamentos. São eles.

- *O **umbral de infiltração** é o alongamento que inicia o processo de trincas na região 2, permitindo rápida penetração de produtos químicos na lâmina. O umbral de infiltração é usado para dimensionar equipamentos que trabalham em ambientes agressivos.*
- *O **umbral de exudação** é o alongamento que inicia a interligação de trincas na região 2, formando caminhos para passagem de fluidos. Esse umbral é usado para projetar tubulações ou tanques que trabalhem com líquidos não agressivos, como água, salmoura, petróleo, vinhaça, esgoto urbano e outros. Os líquidos não agressivos podem infiltrar nos laminados, mas não podem vazar.*
- *O **umbral de rigidez** é o alongamento que inicia a perda apreciável do módulo de elasticidade da lâmina. O umbral de rigidez é medido para lâminas UD que perdem rigidez quando sofrem trincas matriciais paralelas às fibras, ou rupturas de fibras. Ele é usado para dimensionar estruturas de compósito que trabalham em ambientes secos, como postes, pás eólicas, peças aeronáuticas, peças automotivas e outras.*

- *O **umbral de ruptura** é o alongamento que inicia a aglutinação dos pontos de quebra nas fibras e causa a ruptura da lâmina. O umbral de ruptura, também conhecido como alongamento de ruptura, é usado por engenheiros antigos, ainda não acostumados com os novos conceitos e tecnologias dos compósitos. O umbral de ruptura não tem uso prático justificável.*



*Figura 1
Trinca transversal que marca o umbral de infiltração em lâminas UD. Aumentado a solicitação, a densidade dessas trincas aumenta, formando caminhos para a passagem de fluidos.*

A tabela 1 resume os quatro umbrais de falha.

<i>Umbral de falha</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Controladores</i>
<i>Infiltração</i>	<i>T_i</i>	<i>Início de perda de translucidez</i> <i>Início de emissões acústicas.</i> <i>Nas lâminas UD os eventos acima coincidem com o surgimento das primeiras trincas visíveis a olho nu.</i>	<i>Interface. Adesão resina-fibras.</i> <i>Interfase. Tenacidade e rigidez da resina de interfase</i> <i>Tenacidade da resina matriz</i>
<i>Exudação</i>	<i>T_w</i>	<i>Observação visual</i> <i>O umbral de exudação não é detectado por emissões acústicas ou por perda de translucidez.</i>	<i>Tenacidade da resina matriz</i>

Rigidez	T_s	<p>A detecção é feita observando a perda de proporcionalidade entre as tensões e as deformações.</p> <p>O umbral de rigidez das lâminas UD coincide com o trincamento transversal pleno da lâmina. Nessa condição, o módulo transversal, E_2, é suposto igual a zero.</p> <p>O umbral de rigidez não é medido para lâminas de fibras picadas</p>	Tratamento das fibras e tenacidade da matriz
Ruptura	Tr	<p>A detecção é feita rompendo a lâmina.</p> <p>Para lâminas UD, a ruptura é observada na direção 1 das fibras.</p> <p>O umbral de ruptura das lâminas de fibras picadas é isotrópico</p>	Controlado pelas fibras, com pequena influência do tratamento superficial e da tenacidade da matriz.

Tabela 1

Os quatro umbrais de falha. Observe que não existe umbral para o descolamento vidro-resina.

A ruptura das fibras e o crescimento da densidade de trincas na resina liberam ondas de energia elástica que podem ser captadas e analisadas como emissões acústicas. A energia captada permite inferir a natureza e a extensão da densidade das trincas. Essa é a base dos ensaios de emissão acústica, muito úteis para medir os umbrais de infiltração.

A teoria da mecânica de fraturas ensina que se a força externa for mantida constante, a densidade de trincas não varia e as emissões acústicas não acontecem. Em outras palavras, se os esforços externos – a carga mecânica – permanecer constante, a densidade e a abertura das trincas não variam. Cargas mecânicas estacionárias, estáticas, não crescem trincas nem rompem fibras. Porém, aumentando a carga externa, as trincas na resina e nas fibras retomam seus crescimentos. Esses eventos liberam a energia elástica que é captada nos ensaios de emissão acústica.

As emissões de baixa energia, oriundas dos descolamentos vidro-resina, são ignoradas. O início das emissões de média energia, proveniente de rupturas na resina, indica o umbral de infiltração. As emissões de alta energia indicam ruptura de fibras. Essas rupturas generalizadas ocorrem a todo momento, indicando falha nos pontos fracos. Isso é corriqueiro e nada tem de importante. Mas, a emissão de altas contagens localizadas pode indicar sobrecarga no laminado. O local de origem dessas emissões anômalas deve ser examinado com cuidado para assegurar a segurança estrutural do equipamento.

6 – Valores dos umbrais. A resina tem influência decisiva nos umbrais de infiltração e de exudação. O tratamento superficial das fibras também é importante, mas será ignorado em

nossos comentários por estar fora do controle dos projetistas. No que diz respeito aos projetistas, o tratamento aplicado às fibras pode ser considerado constante. Para efeitos práticos, podemos considerar a resina como o único controlador dos umbrais de infiltração e de exudação.

As lâminas perdem translucidez e emitem ondas acústicas que sinalizam o início da formação de trincas. A perda de translucidez e o início das emissões acústicas são, portanto, métodos adequados para medir o umbral de infiltração. Um método sugerido para medir o umbral de infiltração é discutido no apêndice deste capítulo.

6.1 – Umbrais de infiltração. Os umbrais de infiltração para lâminas de fibras picadas foram medidos por Bourban, Cantwell, Kaush e Youd, na Ecole Polytechnique de Lausanne. Os ensaios foram executados em corpos de prova com 30% de fibras picadas e resinas vinil éster de alongamentos 3,0 %, 5,0% e 10,0%. Os resultados são mostrados na tabela 2.

<i>Resina</i>	<i>Alongamento de ruptura da resina (%)</i>	<i>Teor de fibras picadas (%)</i>	<i>Umbral de infiltração para lâminas de fibras picadas (%)</i>
<i>DK 470</i>	<i>3,0</i>	<i>30</i>	<i>0,32</i>
<i>DK 411</i>	<i>5,0</i>	<i>30</i>	<i>0,50</i>
<i>DK 8084</i>	<i>10,0</i>	<i>30</i>	<i>0,75</i>

Tabela 2

Umbrais de infiltração para lâminas de resinas vinil éster com 30% de fibras picadas.

Os umbrais de infiltração para lâminas UD foram medidos por L. A. Berglund e B. A. Sjogren, da Lulea University of Technology, Suécia. Os ensaios foram feitos, como deve ser, em lâminas UD tracionadas na direção transversal às fibras (direção 2). Os resultados estão na tabela 3.

<i>Resina</i>	<i>Tenacidade da resina G_{IC} (J/m²)</i>	<i>Teor de fibras UD (%)</i>	<i>Umbral de infiltração para lâminas UD (%)</i>
<i>Poliéster A</i>	<i>94</i>	<i>70</i>	<i>0,37</i>
<i>Poliéster B</i>	<i>98</i>	<i>70</i>	<i>0,41</i>
<i>Poliéster C</i>	<i>397</i>	<i>70</i>	<i>0,56</i>
<i>Poliéster D</i>	<i>130</i>	<i>70</i>	<i>0,50</i>
<i>DK 411</i>	<i>93</i>	<i>70</i>	<i>0,50</i>
<i>DK 8084</i>	<i>272</i>	<i>70</i>	<i>0,75</i>

Poliéster C flexibilizado com 15% de borracha

Tabela 3

Umbrais de infiltração para lâminas UD solicitadas na direção transversal às fibras. Os umbrais de infiltração para lâminas UD são idênticos aos medidos para lâminas de fibras picadas.

A observação atenta das tabelas 2 e 3 revela dois fatos interessantes.

- *O primeiro é que os umbrais de infiltração para as resinas DK 411 e DK 8084 têm os mesmos valores para lâminas de fibras picadas e lâminas UD. Esse fato surpreendente vale para todas resinas e todas lâminas, como explicado no apêndice deste capítulo.*
- *A tabela 3 indica que as resinas vinil éster têm umbrais de infiltração superiores aos das resinas poliéster de igual tenacidade. Compare o $Ti = 0,50\%$ da Derakane DK 411 com o $Ti = 0,40\%$ de resina poliéster de igual tenacidade. Compare também o $Ti = 0,75\%$ da DK 8084 com o $Ti = 0,56\%$ da resina poliéster C. Esse fato pode ser explicado pela melhor aderência das resinas vinil éster às fibras de vidro.*

Exemplo 1 – *Se os umbrais de infiltração têm os mesmos valores para lâminas UD e para lâminas de fibras picadas, qual é a vantagem da barreira de corrosão? Por que não dispensar a barreira de corrosão e fazer equipamentos para ambientes agressivos unicamente com lâminas UD?*

De fato, o umbral de infiltração das lâminas de fibras picadas é idêntico ao das lâminas UD. Porém, as lâminas de fibras picadas têm coeficientes de difusão para produtos agressivos muito inferiores aos das lâminas UD. Isso foi explicado quando tratamos de efeito “Cavalo de Tróia”. Foi dito que os produtos agressivos difundem com lentidão nas barreiras de corrosão feitas com altos teores de resina, assegurando maior proteção e durabilidade ao equipamento. Isso explica a razão para usar barreiras de corrosão com fibras picadas. Elas são melhores que as de fibras UD nas condições de trabalho do equipamento, abaixo do umbral de infiltração.

Nota: A igualdade dos umbrais de infiltração vale apenas para lâminas UD com fibras bem achatadas e sem lacunas, como as feitas com tiaras ou aros de compactação. As fibras UD arredondadas e com lacunas visíveis têm baixo umbral de infiltração, menor que o medido para fibras picadas

6.2 – Umbrais de exudação. O umbral de exudação não pode ser medido por emissões acústicas ou por perda de translucidez. Sua detecção é feita visualmente, como explicado no apêndice deste capítulo. Este umbral ocorre em resposta a grandes alongamentos, correspondentes a grandes densidades de trincas. Nessas condições, podemos afirmar com confiança que o umbral de exudação é controlado pela tenacidade da resina.

Ao contrário dos umbrais de infiltração, os de exudação nunca foram formalmente medidos. A única medição que temos para eles foi feita indiretamente e sem intenção pela Flowtite, em ensaio usado para determinar a reta de regressão de tubos defletidos em contato com solução 1N de H_2SO_4 . Como esse ensaio ocupa pouco espaço, a Flowtite deixou em teste os corpos de prova que não falharam, esperando que eles falhassem um dia. Acontece que esses corpos de prova foram ensaiados abaixo do umbral de exudação, e por isso não falharam após 30 anos em contato com a solução ácida. Aliás, abaixo do umbral de exudação eles nunca falham.

A figura 2 mostra a curva de regressão publicada pela Flowtite, onde observamos que os corpos de prova submetidos a alongamentos inferiores a 1,03% não falharam após 30 anos em contato direto com ácido sulfúrico. Portanto, podemos admitir que o umbral de exudação seja 1,03% para a lâmina de fibras picadas feitas com a resina poliéster usada pela Flowtite. Este valor importante, obtido por acidente e sem intenção, é o único que temos para o umbral de exudação. Em nossos cálculos temos usado o valor $T_w = 0,80\%$.

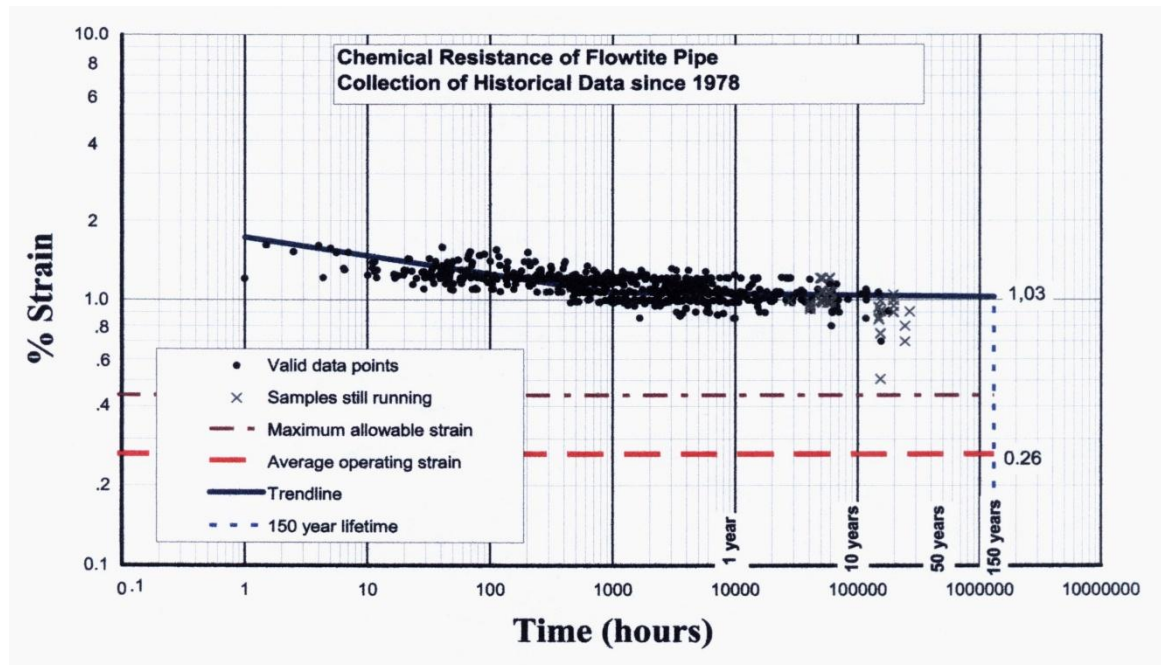


Figura 2

Quando o alongamento nos corpos de prova é inferior ao umbral de exudação, 0,80%, a resina não trinca e o ácido chega às fibras por difusão. O efeito escudo torna a concentração de ácido no laminado muito pequena, causando pouco dano. Isso explica a reta de regressão horizontal para alongamentos abaixo de 0,80%. Por outro lado, se os alongamentos forem maiores que o umbral de exudação, as trincas acontecem, o ácido penetra e a falha ocorre em curto prazo. Figura retirada de relatório publicado pela Flowtite.

A resina poliéster usada pela Flowtite na barreira de corrosão tem alongamento de ruptura 3,5%. Supondo que o umbral de exudação seja proporcional à tenacidade da resina, seu valor para lâminas de fibras picadas feitas com resina Derakane DK 411, que tem alongamento de ruptura 5,0%, deve ser

$$T_w = 0,80 \times \frac{5,0}{3,5} \cong 1,1\%$$

A tabela 4 mostra os umbrais de exudação para lâminas de fibras picadas feitas com resinas poliéster e com resina Derakane DK 411. Os umbrais de exudação das lâminas UD nunca foram medidos, mas devem ser pouco maiores que os de infiltração.

Resina	Alongamento na ruptura (%)	Umbrai de exudação para lâmina de fibras picadas (%)	Umbrai de exudação para lâminas UD (%)
DK 411	5,0	1,1	NA
Poliéster	3,5	0,8	NA

Tabela 4

Umbrais de exudação para fibras picadas com resinas poliéster e Derakane DK 411. O valor citado para lâmina de fibras picadas feitas com poliéster (0,80%) é suportado por dados da Flowtite. O valor citado para DK 411 foi estimado considerando proporcionalidade com os alongamentos de ruptura. Os umbrais de exudação para lâminas UD nunca foram medidos, mas devem ser pouco superiores aos de infiltração.

6.3 – Umbrais de rigidez. O umbral de rigidez é uma propriedade relacionada mais a laminados que a lâminas. Porém, no caso de lâminas, ele é medido como normalmente se faz, pela perda de proporcionalidade entre a tensão e a deformação. A figura 3 mostra os umbrais de rigidez para lâminas de fibras picadas feitas com resinas de tenacidades diferentes. Observe que, para pequenas deformações, as tensões são proporcionais aos alongamentos. Isso acontece porque os descolamentos vidro-resina e a pequena densidade de trincas são insuficientes para afetar a rigidez da lâmina. As coisas seguem assim até o umbral de rigidez, quando a grande densidade de trincas causa perda de proporcionalidade. Nesse ponto as deformações aumentam mais rapidamente que as tensões e a curva tensão x deformação começa a achatarse. O achatamento prossegue, cada vez mais intenso, até a ruptura. O alongamento correspondente à perda de proporcionalidade entre as tensões e as deformações indica o umbral de rigidez.

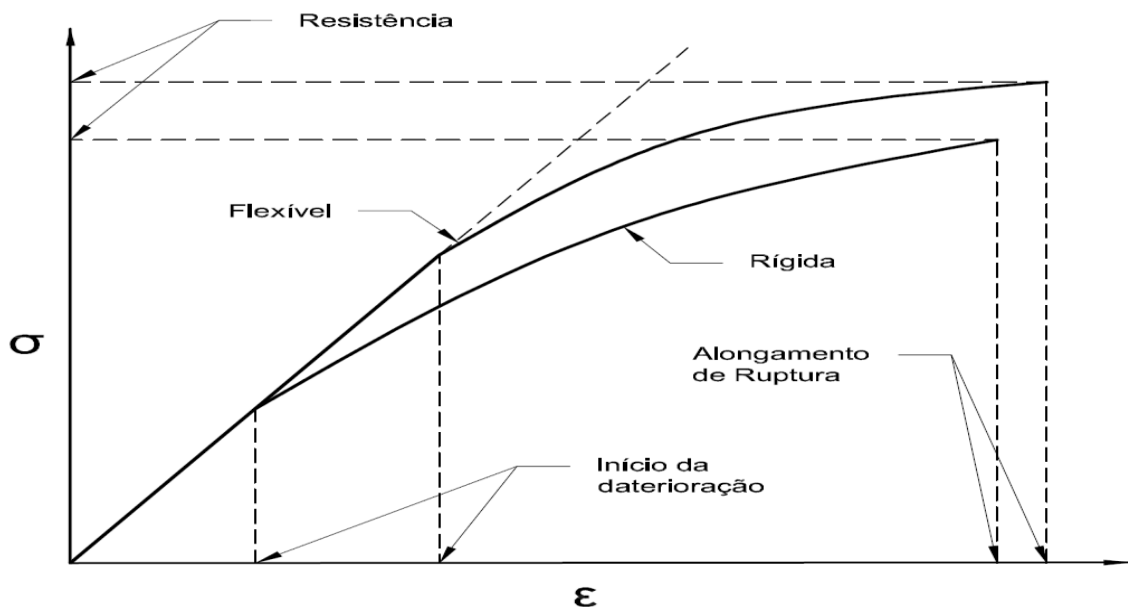


Figura 3

Mostra o efeito da tenacidade da resina no umbral de rigidez e na resistência de lâminas de fibras picadas. A tenacidade da resina tem grande efeito no umbral de rigidez. A resistência das lâminas é pouco afetada pela tenacidade da resina.

Vamos finalizar essa seção dizendo que todos umbrais de falha, exceto o de ruptura, aumentam com a tenacidade da resina. O umbral de infiltração aumenta também com a qualidade da aderência da resina às fibras, mas isso foge do controle dos projetistas e dos fabricantes. As resinas vinil éster têm altos umbrais de infiltração porque, além de terem alta tenacidade, elas aderem bem nas fibras.

7 – Usando os umbrais de falha. Como vimos, os umbrais de falha são definidos como alongamentos correspondentes a densidades críticas de trincas.

O umbral de infiltração protege os laminados contra a penetração de produtos químicos reativos. Ele é usado para calcular a espessura e a durabilidade de equipamentos em contato com produtos agressivos. O alongamento admissível proposto na norma ASME RTP1 deriva diretamente do umbral de infiltração.

$$\text{Alongamento admissível} = \frac{\text{Umbra de infiltração}}{\text{Coeficiente de segurança}}$$

O umbral de exudação protege os equipamentos contra vazamentos. Ele é usado para calcular a espessura e a durabilidade de tubos que transportam água, esgoto urbano, vinhaça e outros produtos que não atacam a resina. O umbral de exudação substitui o HDB clássico, medido pelo protocolo ASTM D2992 B e exigido pelas normas AWWA C950, API 15HR e ISO 14692. O HDB medido pela ASTM D2992 B não tem sustentação lógica, devendo ser substituído pelo umbral de exudação.

O umbral de rigidez é usado para dimensionar laminados que trabalham em ambientes secos e não agressivos, como postes, pás eólicas e peças aeronáuticas ou automotivas.

O umbral de ruptura não tem aplicação prática.

Na prática, os umbrais de falha são usados como descrito abaixo.

- *Os laminados que trabalham em ambientes agressivos são dimensionados usando o umbral de infiltração da lâmina crítica, geralmente a barreira de corrosão de fibras picadas.*
- *Os laminados que trabalham em ambientes não-agressivos são dimensionados usando o umbral de exudação da lâmina crítica, que pode ser de fibras picadas ou de fibras UD.*
- *Os laminados que trabalham em ambientes secos são dimensionados para ter alongamentos abaixo do umbral de rigidez da lâmina crítica, geralmente a de fibras UD.*
- *Os umbrais de ruptura não devem ser usados para dimensionar laminados de compósitos.*

Na tabela 4 vemos valores dos umbrais de falha para lâminas de fibras picadas feitas com diversas resinas.

<i>Umbrais de falha para lâminas de fibras picadas</i>					
<i>Modo de falha</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Resina bisfenólica</i>	<i>Resina poliéster</i>	<i>Derakane 411</i>	<i>Derakane 470</i>
<i>Infiltração</i>	<i>Ti</i>	0,20 %	0,40 %	0,50 %	0,35 %
<i>Exudação</i>	<i>Tw</i>	----	0,80 %	1,10 %	0,80 %
<i>Rigidez</i>	<i>Ts</i>	----	----	----	----
<i>Ruptura</i>	<i>Tr</i>	1,50 %	2,00 %	2,50 %	2,00 %

Tabela 4.

Os umbrais de rigidez não se aplicam às lâminas de fibras picadas. Os umbrais das lâminas UD não foram incluídos na tabela.

Apêndice 1

Medindo os umbrais de falha

Introdução. Vamos iniciar a discussão fazendo uma afirmação óbvia para a maioria dos leitores. A afirmação é:

Todas lâminas de compósitos são formadas por grupos de fibras alinhadas e paralelas entre si.

Vamos explicar isso.

- *Nas lâminas UD, essa afirmação é aceita sem discussão. Todas fibras UD são alinhadas e paralelas umas às outras.*
- *Nas lâminas tecidas, as fibras são alinhadas e paralelas umas às outras nas direções da trama e do urdume.*
- *Nas lâminas de fibras picadas, as fibras são agrupadas paralelas umas às outras, formando mechas com arranjo idêntico ao das lâminas UD e das lâminas tecidas.*

O arranjo fundamental das fibras em qualquer lâmina – fibras picadas, tecidas ou UD – é mostrado a figura 4.

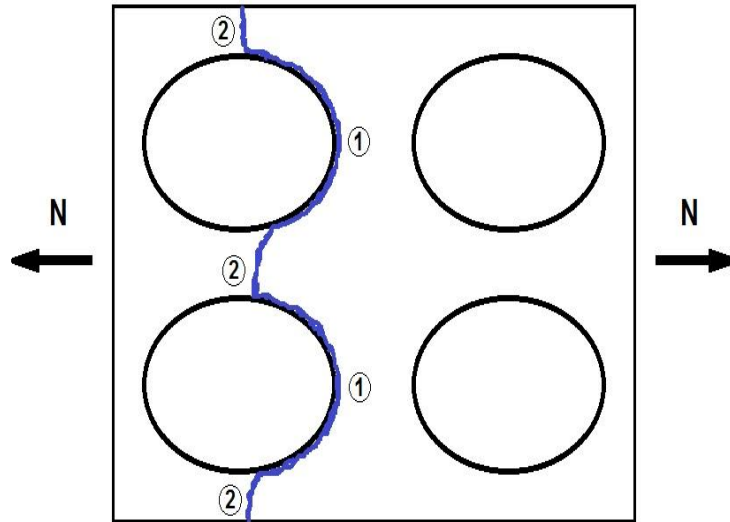


Figura 4

Mostra o arranjo quadrangular de fibras em lâminas UD e em mechas de fibras picadas. A força externa N coloca as regiões 1 e 2 sob tração. As primeiras falhas resultam de descolamento das fibras na região 1. Essas falhas aumentam a tensão na resina presente na região 2. Aumentando N , a resina rompe na região 2. As trincas na resina crescem na direção das fibras, paralelas a elas, e ao longo da linha 1 – 2 mostrada na figura.

Os ensaios para medir os umbrais são feitos tracionando lâminas e anotando os alongamentos correspondentes a eventos críticos. Por exemplo, para o umbral de infiltração, o evento crítico é o início de trincas de resina na região 2. Para o umbral de exudação, o evento crítico é a passagem de água pelas trincas de resina ao longo das linhas 1 – 2.

Do exposto podemos concluir que, para a mesma resina, o umbral de infiltração medido em lâminas UD é idêntico ao medido em lâminas de fibras picadas. Isso acontece porque os alongamentos que dão início às rupturas da matriz na região 2 são idênticos nesses dois casos. Porém, os umbrais de exudação dessas lâminas devem ser muito diferentes, porque as fibras picadas exigem maiores densidades de trincas para interligar e formar os caminhos para passagem de água. Na execução dos ensaios para medir os umbrais de infiltração e de exudação, as lâminas UD são tracionadas na direção perpendicular às fibras. As lâminas isotrópicas de fibras picadas não têm direção preferencial.

Eu suspeito que a diferença entre os umbrais de infiltração e de exudação deva ser muito pequena para lâminas UD. Porém, para lâminas de fibras picadas, essa diferença deve ser grande. De fato, observando a tabela 4 notamos que, para lâminas de fibras picadas, os umbrais de exudação são aproximadamente o dobro dos de infiltração.

Exemplo 2 *Explique porque os umbrais de exudação das lâminas de fibras picadas devem ser muito maiores que os de infiltração.*

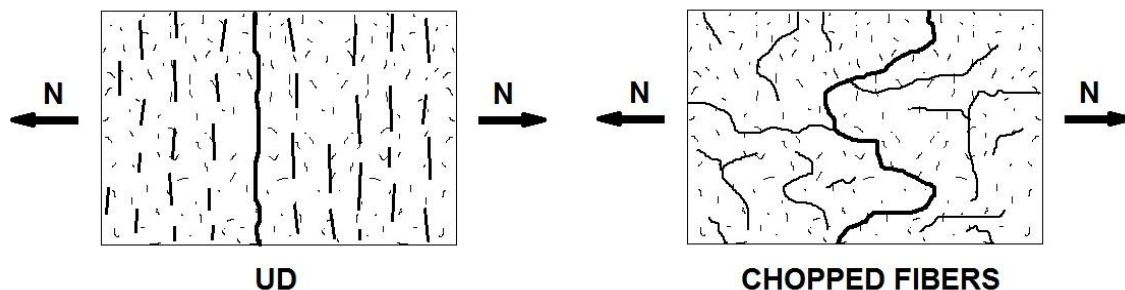


Figura 5

A figura mostra cortes transversais em lâminas UD (esquerda) e de fibras picadas (direita). As fibras UD são perpendiculares ao plano do papel. As fibras picadas tem distribuição aleatória. Devido à diferença nos teores de vidro e no arranjo das mechas, para igual alongamento, a densidade de trincas na lâmina UD é muito maior que na lâmina de fibras picadas. Para interligar essas trincas e iniciar o processo de exudação, o alongamento da lâmina UD deve ser muito inferior que o da lâmina de fibras picadas. A figura na esquerda mostra várias trincas incipientes e uma trinca completa, atravessando a espessura da lâmina UD. A figura na direita mostra inúmeras trincas nas mechas de fibras picadas e o crescimento delas na resina. Note que na lâmina de fibras picadas, as trincas interligam formando caminhos tortuosos na matriz. Isso se deve ao arranjo aleatório das mechas.

A explicação para isso pode ser facilmente entendida observando o progresso das trincas mostrado na figura 5. Para iguais alongamentos, a densidade de trincas na lâmina UD é maior que na lâmina de fibras picadas. Isso tem duas explicações.

- O teor volumétrico de fibras picadas é muito inferior ao de fibras UD
- As mechas de fibras picadas são orientadas aleatoriamente na lâmina.

As trincas nas duas lâminas interligam para formar os respectivos umbrais de exudação. O alongamento para interligar as trincas na lâmina UD é muito menor que o requerido para interligar as trincas na lâmina de fibras picadas. Isso acontece pelas duas razões explicadas antes, isto é, pela diferença entre os teores e pela orientação das fibras.

Essa é a explicação para o umbral de exudação de lâminas UD ser inferior ao de lâminas de fibras picadas.

Exemplo 3 Explique porque os umbrais de exudação de lâminas UD devem ser pouco maiores que os de infiltração.

Observando a figura 5 percebemos que a diferença entre o alongamento que inicia e o que interliga trincas em lâminas UD deve ser pequena. O mesmo não acontece em lâminas de fibras picadas.

Medindo os umbrais. Os ensaios para medir os umbrais são feitos em tubos de diâmetro $D = 100$ mm, comprimento 1000 mm e espessura 0,25 mm. Os cilindros são ensaiados cheios de água com as extremidades fechadas por calotas esféricas. A espessura pequena (0,25 mm) é necessária para reduzir o tempo que a água leva para vaziar.

Os cilindros para ensaiar lâminas UD são construídos como segue.

- *Lâmina interna UD0, com rovings 2200 paralelos ao eixo do cilindro e afastados 30 mm uns dos outros. Essas lâminas impedem a ruptura do corpo de prova na direção axial.*
- *Lâmina intermediária UD90, compacta e com 0,25 mm de espessura*
- *Lâmina externa igual à interna.*
- *As duas extremidades do cilindro são fechadas com calotas esféricas de fibras picadas*
- *As extremidades são reforçadas para forçar as falhas no centro do tubo.*

Os segmentos cilíndricos para ensaiar lâminas de fibras picadas são construídos como segue.

- *Uma manta M225 para dar 0,25 mm de espessura*
- *As duas extremidades são fechadas com calotas esféricas*
- *As extremidades dos cilindros são reforçadas para forçar a ocorrência de falhas no centro do tubo.*

Para medir o umbral de infiltração, os corpos de prova são pressurizados cheios de água e monitorados com equipamentos para captar sinais acústicos. O ensaio é feito aumentando gradualmente, em estágios, a pressão nos tubos.

Para medir o umbral de exudação, a pressão de cada estágio deve ser mantida constante durante 24 horas para dar tempo ao vazamento da água. O início dos vazamentos é detectado visualmente.

As seguintes anotações são feitas:

- *Pressão P_i que inicia as emissões acústicas*
- *Pressão P_w que inicia os vazamentos. Os vazamentos são observados visualmente*

Os umbrais de falha são determinados em função das pressões P_i e P_w .

Para a lâmina UD

$$T_i = \frac{P_i D}{4E_x t} - \nu_{yx} \frac{P_i D}{2E_y t}$$

$$T_w = \frac{P_w D}{4E_x t} - \nu_{yx} \frac{P_w D}{2E_y t}$$

Para a lâmina de fibras picadas

$$T_i = \frac{P_i D}{2E_y t} - \nu_{xy} \frac{P_i D}{4E_x t}$$

$$T_w = \frac{P_w D}{2E_y t} - \nu_{xy} \frac{P_w D}{4E_x t}$$

Os módulos, as espessuras e as relações de Poisson dos tubos ensaiados devem ser determinados queimando corpos de prova extraídos deles e medindo suas composições. As

propriedades são determinadas usando as composições medidas e a lei das misturas bidimensional.

A figura 6 mostra a sequência de eventos em função da contagem acústica.

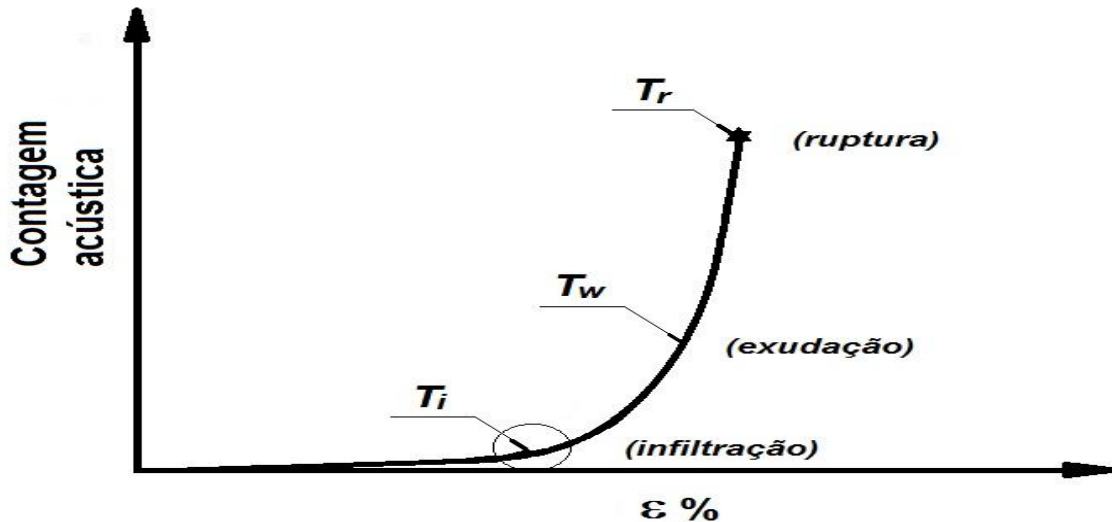


Figura 6
Mostra os eventos característicos anotados em função da contagem acústica.

As baixas pressões no início do ensaio não geram eventos mensuráveis por emissões acústicas. Nesse estágio ocorre o descolamento das fibras, que emite sinais fracos e sem interesse. A pequena contagem acústica observada antes do umbral de infiltração deve ser ignorada. Ela se deve às poucas rupturas na resina em pontos defeituosos da lâmina. O umbral de infiltração é anotado no início da grande transição na estrutura da lâmina, correspondente ao aumento súbito e sustentado das emissões acústicas. Esse evento marca o umbral de infiltração, que deve ser o mesmo para lâminas UD e para lâminas de fibras picadas. A pressão P_i é anotada neste ponto.

Após medir o umbral de infiltração, o ensaio segue com aumento na pressão e na densidade de trincas e nas contagens acústicas, mas sem transição perceptível no comportamento da lâmina. O vazamento acontece sem anúncio e deve ser observado visualmente. O umbral de exudação não pode ser medido por contagens acústicas. A pressão de exudação P_w deve ser anotada observado visualmente o surgimento das primeiras gotas de água na superfície externa dos corpos de prova.

Os alongamentos de cisalhamento e de compressão não abrem trincas e por isso não causam vazamentos. Não existe “umbral de exudação para cisalhamento” nem “umbral de exudação para compressão”. Os umbrais de infiltração para cisalhamento e para compressão também não têm interesse prático e não são discutidos neste livro.

O leitor deve ter sempre em mente que os umbrais de falha são propriedades de lâminas, e não de laminados.

Vamos encerrar este capítulo mostrando o resultado da pesquisa realizada na Ecole Polytechnique Federale de Lausanne em lâmina de fibras picadas feita com resina vinil éster DK 411. O resultado é mostrado na figura 7 para medições feitas por perda de translucidez e por emissões acústicas. Podemos observar as emissões acústicas iniciando no umbral de infiltração, com alongamento 0,50%.

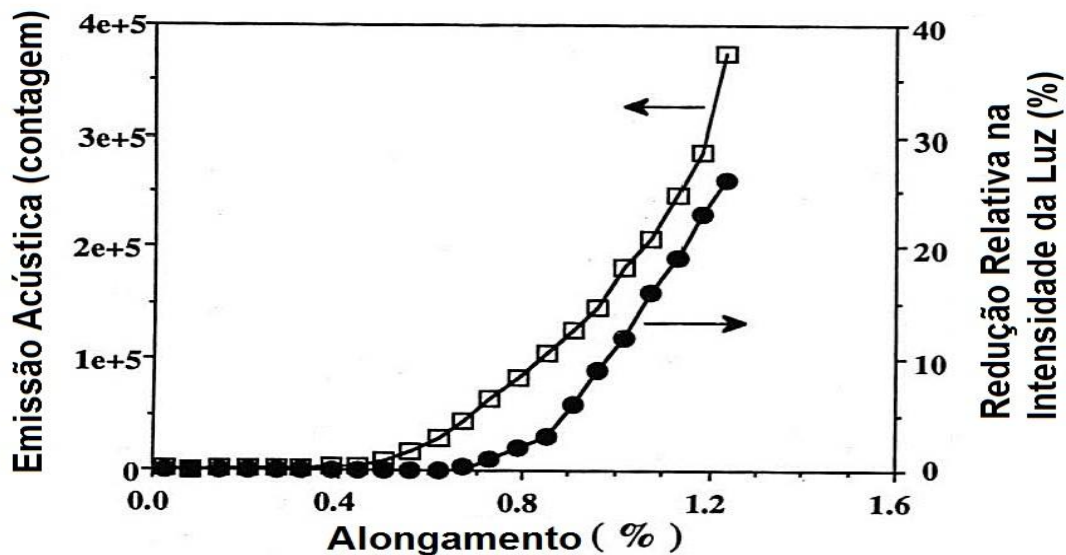


Figura 7

As lâminas feitas com resina DK 411 (alongamento de ruptura 5,0%) e 30% de fibras picadas têm umbral de infiltração igual a 0,50%. Esse valor é igual ao medido para essa resina em lâminas UD.

Apêndice 2

HDB e Umbral de Exudação.

Existem atualmente dois parâmetros para dimensionar tubulações de compósito contra falha por vazamento.

- O HDB – proposto pela ISO 14692 – supõe que a densidade de trincas, e também as trincas, **cresçam** sob cargas estáticas.
- O Umbral de Exudação – que eu proponho – afirma que as trincas mantem suas dimensões e que a densidade delas **não cresce** sob cargas estáticas.

A comissão técnica da ISO 14692 admite que as pressões constantes usadas no ensaio ASTM D2992 B não devem crescer trincas em resinas. O crescimento dessas trincas, alega essa comissão, é causado pela ação simultânea da tensão constante e da hidrólise resultante da presença de água. Esse argumento está baseado em duas premissas falsas. A primeira é

que a água ataca resinas. A segunda premissa falsa é que as trincas no ensaio são submetidas a “tensões constantes”. De fato, as trincas são submetidas a “deformações constantes”

Vamos explicar isso.

Nos tubos operando sob pressão constante, as fibras trabalham sob tensões também constantes (load control). Porém, as trincas que surgem na resina trabalham com deslocamento constante (displacement control). Isso acontece, porque a carga relaxada pela ruptura da resina é totalmente absorvida pelas fibras. Como a rigidez dessas fibras é muito superior à da resina rompida, o alongamento global não muda e a trinca fica submetida a deslocamento constante. Nessa condição não existe strain-corrosion e as trincas não crescem, mesmo supondo o fictício e inexistente ataque da água.

Nossa proposta é que a densidade de trincas na resina de tubos cresce apenas se a pressão for aumentada. Ou se os tubos forem submetidos a cargas cíclicas. Esse argumento me parece simples e fácil de entender. Ele explica porque o conceito de HDB está equivocado e deve ser substituído pelo correto, o umbral de exudação.

Capítulo 6B

Medindo os umbrais de falha

Introdução. Vamos iniciar a discussão fazendo uma afirmação óbvia, que resulta diretamente do processo de fabricação das fibras de vidro.

Todas lâminas de compósitos são formadas por grupos de fibras alinhadas e paralelas entre si.

Vamos explicar isso.

- *Nas lâminas UD as fibras são alinhadas paralelas umas às outras.*
- *Nas lâminas tecidas, as fibras são alinhadas e paralelas umas às outras.*
- *Nas lâminas de fibras picadas, as fibras são agrupadas paralelas umas às outras, formando mechas idênticas às das lâminas UD e das lâminas tecidas.*

O arranjo fundamental das fibras em qualquer lâmina – fibras picadas, tecidas ou UD – é mostrado a figura 1.

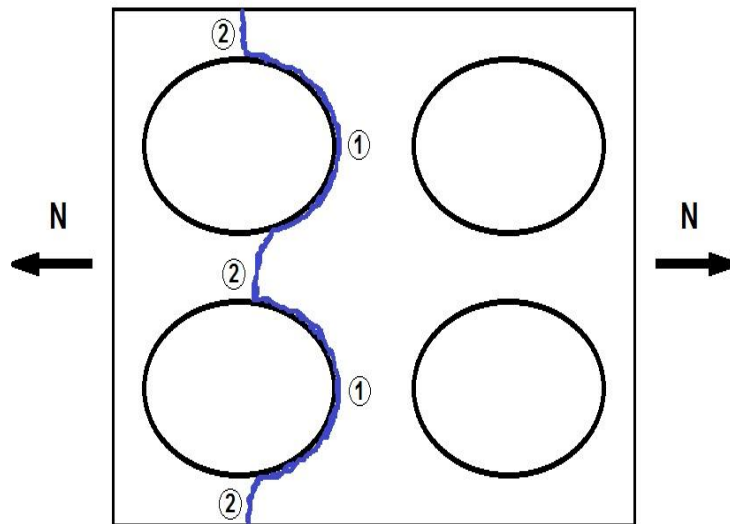


Figura 1

Mostra o arranjo quadrangular das fibras nas lâminas. A força externa N coloca as regiões 1 e 2 sob tração. As primeiras falhas resultam de descolamento das fibras na região 1. Essas falhas aumentam a tensão na resina presente na região 2. Aumentando N, a resina rompe na região 2. As trincas na resina crescem na direção das fibras, perpendiculares ao plano da figura, e ao longo da linha 1 – 2.

Os ensaios para medir os umbrais são feitos tracionando as lâminas e anotando os alongamentos correspondentes aos eventos críticos. Por exemplo, para o umbral de infiltração, o evento crítico é o início de trincas de resina na região 2. Para o umbral de exudação, o evento crítico é a passagem de água pelas trincas de resina ao longo das linhas 1 – 2.

Do exposto podemos concluir que, para a mesma resina, o umbral de infiltração medido em lâminas UD é idêntico ao medido em lâminas de fibras picadas. Isso acontece porque os alongamentos que dão início às rupturas da matriz na região 2 são idênticos nesses dois casos. Porém, os umbrais de exudação dessas lâminas devem ser muito diferentes, porque as fibras picadas exigem maiores densidades de trincas para interligar e formar caminhos para passagem de água. Na execução dos ensaios para medir os umbrais de infiltração e de exudação, as lâminas UD são tracionadas na direção perpendicular às fibras. As lâminas isotrópicas de fibras picadas não têm direção preferencial.

Eu suspeito que a diferença entre os umbrais de infiltração e de exudação deva ser muito pequena para lâminas UD. Porém, para lâminas de fibras picadas, essa diferença deve ser grande. De fato, observando a tabela 4 no capítulo anterior, notamos que as lâminas de fibras picadas têm umbrais de exudação aproximadamente duas vezes maiores que os de infiltração.

Exemplo 1 Explique porque os umbrais de exudação das lâminas de fibras picadas devem ser muito maiores que os de infiltração.

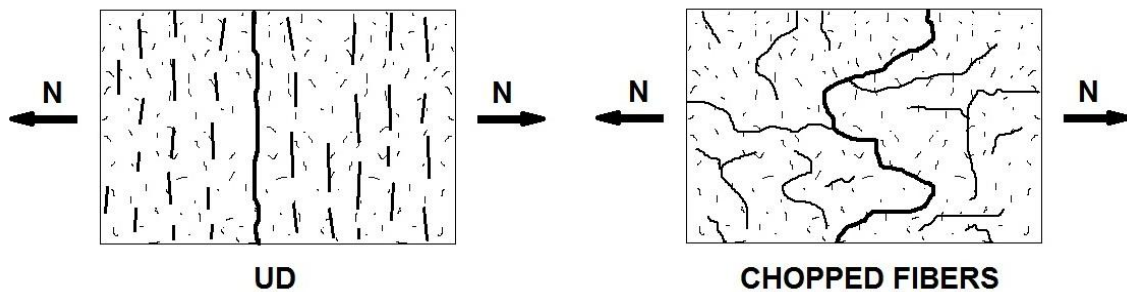


Figura 2

A figura mostra cortes transversais em lâminas UD (esquerda) e de fibras picadas (direita). As fibras UD são perpendiculares ao plano do papel. As fibras picadas tem distribuição aleatória. Devido à diferença nos teores de vidro e no arranjo das mechas, para igual alongamento, a densidade de trincas na lâmina UD é muito maior que na lâmina de fibras picadas. Para interligar essas trincas e iniciar o processo de exudação, o alongamento da lâmina UD deve ser muito inferior que o da lâmina de fibras picadas. A figura na esquerda mostra várias trincas incipientes e uma trinca completa, atravessando a espessura da lâmina UD. A figura na direita mostra inúmeras trincas nas mechas de fibras picadas e o crescimento delas na resina. Note que na lâmina de fibras picadas, as trincas interligam formando caminhos tortuosos na matriz. Isso se deve ao arranjo aleatório das mechas.

A explicação para isso pode ser facilmente entendida observando o progresso das trincas mostrado na figura 2. Para iguais alongamentos, a densidade de trincas na lâmina UD é maior que na lâmina de fibras picadas. Isso tem duas explicações.

- *O teor volumétrico de fibras picadas é muito inferior ao de fibras UD*
- *As mechas de fibras picadas são orientadas aleatoriamente na lâmina.*

As trincas nas duas lâminas interligam para formar os respectivos umbrais de exudação. O alongamento para interligar as trincas na lâmina UD é muito menor que o requerido para interligar as trincas na lâmina de fibras picadas. Isso acontece pelas duas razões explicadas antes, isto é, pela diferença entre os teores e pela orientação das fibras.

Essa é a explicação para o umbral de exudação de lâminas UD ser inferior ao de lâminas de fibras picadas.

Exemplo 2. *Explique porque o umbral de exudação de lâminas UD deve ser pouco maior que o de infiltração.*

Observando a figura 2 percebemos que a diferença entre o alongamento que inicia e o que interliga trincas em lâminas UD deve ser pequena. O mesmo não acontece nas lâminas de fibras picadas.

Medindo os umbrais. Os ensaios para medir os umbrais são feitos em tubos de diâmetro pequeno, $D = 100$ mm, comprimento 1000 mm e espessura 0,25 mm. Os cilindros são ensaiados cheios de água com as extremidades fechadas por calotas esféricas de fibras picadas. A espessura pequena (0,25 mm) é necessária para reduzir o tempo que a água leva para vaziar.

Os cilindros para ensaiar lâminas UD são construídos como segue.

- *Lâmina interna UD0, com rovings 2200 paralelos ao eixo do cilindro e afastados 30 mm uns dos outros. Essas lâminas impedem a ruptura do corpo de prova na direção axial.*
- *Lâmina intermediária UD90, compacta e com 0,25 mm de espessura*
- *Lâmina externa igual à interna.*
- *As duas extremidades do cilindro são fechadas com calotas esféricas de fibras picadas*
- *As extremidades são reforçadas para forçar as falhas no centro do tubo.*

Os cilindros para ensaiar lâminas de fibras picadas são construídos como segue.

- *Uma manta M225 para dar 0,25 mm de espessura*
- *As duas extremidades são fechadas com calotas esféricas de fibras picadas*
- *As extremidades dos cilindros são reforçadas para forçar as falhas no centro do tubo.*

Para medir o umbral de infiltração, os corpos de prova são pressurizados cheios de água e monitorados com equipamentos para captar sinais acústicos. O ensaio é feito aumentando gradualmente, em estágios, a pressão nos tubos.

Para medir o umbral de exudação, a pressão de cada estágio deve ser mantida constante durante 24 horas para dar tempo ao vazamento da água. O início dos vazamentos é detectado visualmente.

As seguintes anotações são feitas:

- Pressão P_i que inicia as emissões acústicas
- Pressão P_w que inicia os vazamentos. Os vazamentos são observados visualmente

Os umbrais de falha são determinados em função das pressões P_i e P_w .

Para a lâmina UD

$$T_i = \frac{P_i D}{4E_x t} - \nu_{yx} \frac{P_i D}{2E_y t}$$

$$T_w = \frac{P_w D}{4E_x t} - \nu_{yx} \frac{P_w D}{2E_y t}$$

Para a lâmina de fibras picadas

$$T_i = \frac{P_i D}{2E_y t} - \nu_{xy} \frac{P_i D}{4E_x t}$$

$$T_w = \frac{P_w D}{2E_y t} - \nu_{xy} \frac{P_w D}{4E_x t}$$

Os módulos, as espessuras e as relações de Poisson dos tubos ensaiados devem ser determinados queimando corpos de prova extraídos deles e medindo suas composições. As propriedades são determinadas usando as composições medidas e a lei das misturas bidimensional.

A figura 3 mostra a sequência de eventos em função da contagem acústica.

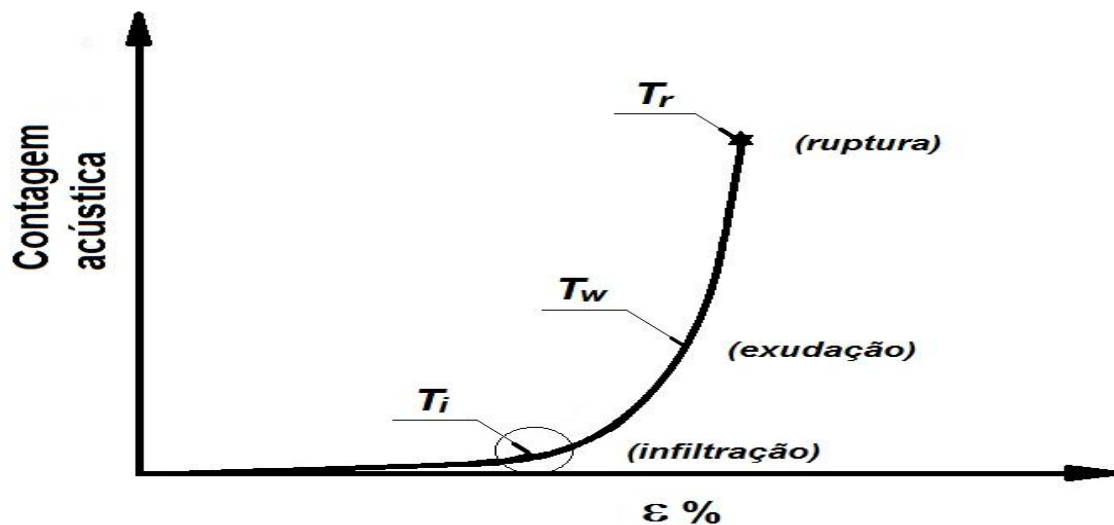


Figura 3
Mostra os eventos característicos anotados em função da contagem acústica.

As baixas pressões no início do ensaio não geram eventos mensuráveis por emissões acústicas. Nesse estágio ocorre o descolamento das fibras, que emite sinais fracos e sem interesse. A pequena contagem acústica observada antes do umbral de infiltração deve ser ignorada. Ela se deve às poucas rupturas na resina em pontos defeituosos da lâmina. O umbral de infiltração é o alongamento no início do aumento súbito e sustentado das emissões acústicas. Esse evento marca o umbral de infiltração, que deve ser o mesmo para lâminas UD e para lâminas de fibras picadas. A pressão P_i é anotada neste ponto.

Após medir o umbral de infiltração, o ensaio segue com aumento na pressão e na densidade de trincas e nas contagens acústicas, mas sem transição perceptível no comportamento da lâmina. O vazamento acontece sem anúncio, sendo detectado visualmente. O umbral de exudação não pode ser medido por contagens acústicas. A pressão de exudação P_w deve ser anotada observado visualmente o surgimento das primeiras gotas de água na superfície externa dos corpos de prova.

Os alongamentos de cisalhamento e de compressão não abrem trincas e por isso não causam vazamentos. Não existe “umbral de exudação para cisalhamento” nem “umbral de exudação para compressão”. Os umbrais de infiltração para cisalhamento e para compressão não têm interesse prático e não são discutidos neste livro.

O leitor deve ter sempre em mente que os umbrais de falha são propriedades de lâminas, e não de laminados.

Vamos encerrar este capítulo mostrando o resultado da pesquisa realizada na Ecole Polytechnique Federale de Lausanne em lâmina de fibras picadas feita com resina vinil éster DK 411. O resultado é mostrado na figura 4 para medições feitas por perda de translucidez e por emissões acústicas. Podemos observar as emissões acústicas iniciando no umbral de infiltração, com alongamento 0,50%.

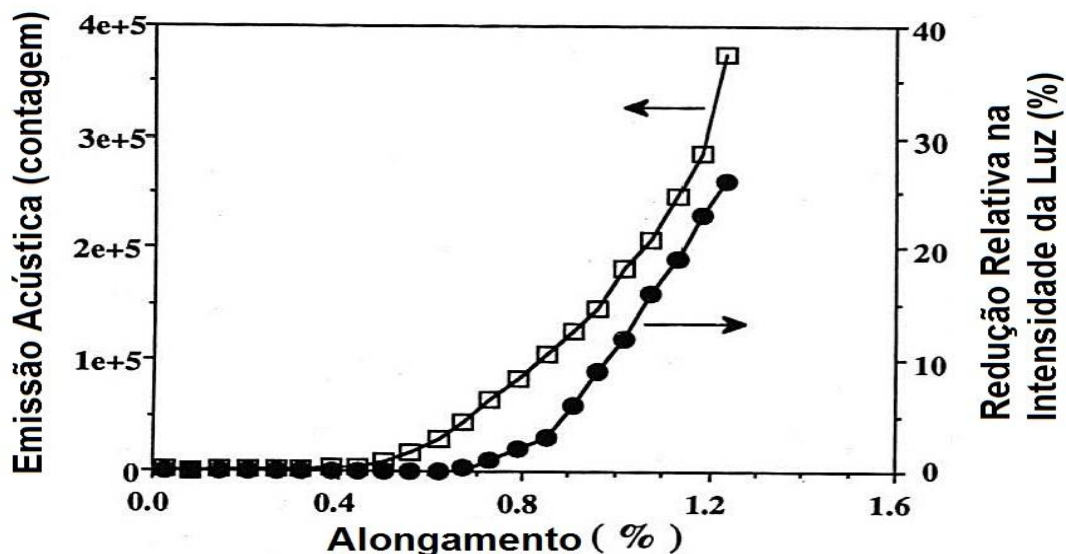


Figura 4

As lâminas feitas com resina DK 411 (alongamento de ruptura 5,0%) e 30% de fibras picadas têm umbral de infiltração igual a 0,50%. Esse valor é igual ao medido para essa resina em lâminas UD.

Apêndice 1

HDB e Umbral de Exudação.

Existem atualmente dois parâmetros para dimensionar tubulações de compósito contra falha por vazamento.

- *O HDB – proposto pela ISO 14692 – supõe que o tamanho e a densidade de trincas cresçam sob cargas estáticas.*
- *O umbral de exudação – proposto no livro “Durability of Industrial Laminates” – afirma que o tamanho e a densidade de trincas **não cresçam** sob cargas estáticas.*

A comissão técnica da ISO 14692 admite que as pressões constantes usadas no ensaio ASTM D2992 B não devem crescer trincas em resinas. O crescimento dessas trincas, alega essa comissão, é causado pela ação simultânea da tensão constante e da hidrólise resultante da presença de água. Esse argumento está baseado em duas premissas falsas. A primeira é que a água ataca resinas. A segunda é que as trincas no ensaio são submetidas a “tensões constantes”. De fato, as trincas são submetidas a “deformações constantes”

Vamos explicar isso.

Nos tubos operando sob pressão constante, as fibras trabalham sob tensões também constantes (load control). Porém, as trincas que surgem na resina trabalham com deslocamento constante (displacement control). Isso acontece, porque a carga relaxada pela ruptura da resina é totalmente absorvida pelas fibras. Como a rigidez dessas fibras é muito superior à da resina rompida, o alongamento global não muda e a trinca fica submetida a deslocamento constante. Nessa condição não existe strain-corrosion e as trincas não crescem, mesmo supondo o fictício e inexistente ataque da água.

A densidade de trincas na resina de tubos pressurizados cresce apenas se a pressão for aumentada. Ou se os tubos forem submetidos a cargas cíclicas. Esse argumento me parece simples e fácil de entender. Ele explica porque o conceito de HDB está equivocado e deve ser substituído pelo correto, o umbral de exudação.

Capítulo 7

Inspeção de equipamentos novos

1 - Introdução. Os equipamentos de compósitos são inspecionados para avaliar suas capacidades estrutural e química. Essas inspeções usam métodos e critérios específicos, conforme os equipamentos sejam novos ou envelhecidos em uso. A inspeção de equipamentos novos é focada na identificação e avaliação de defeitos de fabricação e não-conformidades com as exigências de normas ou de especificações. A inspeção de equipamentos envelhecidos identifica danos incorridos em uso e avalia seus impactos na vida residual. Nos dois casos, a avaliação é feita observando a adequação estrutural e química do equipamento.

Para melhor interpretar e avaliar a importância dos danos incorridos em uso e dos defeitos de fabricação, os inspetores precisam conhecer os mecanismos de deterioração e os modos de falha dos compósitos. Este capítulo e o seguinte foram escritos levando em conta esses conhecimentos.

O livro “Durability of Industrial Composites” interpreta de maneira inovadora os tradicionais processos de deterioração dos compósitos, sugerindo novos modelos para prever a durabilidade e a segurança de equipamentos industriais. Essas inovações embasam novos métodos de inspeção e estabelecem novos critérios de rejeição que esclarecem o significado e a importância dos danos e dos defeitos observados. Por exemplo:

Esses novos conhecimentos tornam críticos e muito importantes alguns danos e defeitos antes considerados irrelevantes. E outros danos e defeitos, antes considerados críticos, passam a ser irrelevantes.

Este capítulo e o seguinte descrevem os métodos para fazer a inspeção de equipamentos de compósitos, tendo como pano de fundo esses novos conceitos. A discussão será feita nos níveis estrutural e químico, para equipamentos novos ou envelhecidos em uso.

2 - Os novos conceitos. A literatura sobre durabilidade de equipamentos de compósitos é confusa e incompleta, repleta de informações irrelevantes e muitas vezes contraditórias. Esta seção faz uma introdução superficial dos aspectos relevantes a esse tema, como detalhados no livro “Durability of Industrial Composites”. Esperamos que essa apresentação resumida sirva para posicionar corretamente o leitor e facilitar seu entendimento dos métodos de inspeção e critérios de rejeição.

A principal novidade resultante desses novos conhecimentos é a distinção, clara e inequívoca, entre vida estrutural e vida química

A vida estrutural é controlada por cargas mecânicas. Ela é definida como o tempo de uso contínuo sob carga até a incapacitação estrutural do equipamento. A incapacitação estrutural pode ser definida de quatro maneiras

- *Falha por infiltração*
- *Falha por exudação*
- *Falha por perda de rigidez*
- *Ruptura*

Na maioria das vezes a vida estrutural é entendida como ruptura e mais raramente como perda de rigidez. Porém, em aplicações industriais, as vidas de infiltração e de exudação são as que realmente importam.

A vida química é controlada pelo ataque de produtos agressivos armazenados, transportados ou processados no equipamento. Ela é definida como o tempo de uso contínuo até a deterioração química reduzir sua rigidez original a ponto de igualar seu alongamento ao umbral de infiltração.

A substituição periódica da barreira de corrosão assegura que os produtos químicos jamais penetrem e deteriorem o laminado estrutural, evitando a deterioração estrutural e fazendo com que o umbral de infiltração nunca seja atingido. Nesses casos, a vida química do equipamento pode ser estendida indefinidamente. Porém, se a barreira de corrosão não for trocada, a deterioração química enfraquece o laminado, aumentando o alongamento inicial até o umbral de infiltração. A vida química de qualquer equipamento é determinada medindo seu módulo de tração residual após longo tempo em serviço contínuo.

Nota: Em alguns casos a vida química pode ser estimada também pela profundidade penetrada pelo produto químico. Esses casos são raros e pouco relevantes.

Com base nesses novos conceitos, temos que:

- *A vida estrutural dos equipamentos de compósitos é definida pelas cargas mecânicas, ignorando a presença de produtos químicos.*
- *A vida química é definida pelos produtos químicos, ignorando as cargas mecânicas.*

A vida química é determinada medindo o módulo residual de tração do equipamento em uso contínuo. Essa determinação é feita ignorando a presença de cargas mecânicas.

A vida estrutural é determinada pelos alongamentos totais da lâmina crítica, ignorando a presença de produtos químicos. A vida estrutural é computada pela equação unificada descrita no livro “Durability of Industrial Composites”.

Os produtos químicos determinam a vida química sem afetar a vida estrutural. As cargas mecânicas determinam a vida estrutural sem afetar a vida química.

Essas conclusões facilitam o trabalho do inspetor. Elas eliminam muitas medições irrelevantes e ensaios inválidos, enfatizando unicamente os pontos de real importância.

O módulo de tração residual é a única grandeza requerida para inspecionar equipamentos envelhecidos em uso. Nenhuma medição adicional é necessária. A literatura sobre inspeção de equipamentos de compósitos envelhecidos em uso propõe a execução de muitos ensaios caros, difíceis de fazer e irrelevantes. E ignora o que realmente é importante.

Após essa introdução, podemos iniciar a discussão dos processos de inspeção. Essa discussão será dividida em dois capítulos. O presente capítulo trata da inspeção de equipamentos novos e sem uso. O seguinte trata da inspeção de equipamentos envelhecidos em uso

3 - Inspeção de equipamentos novos. Os equipamentos novos devem ser inspecionados e ensaiados para verificar se foram construídos sem defeitos e de acordo com as especificações. O ensaio de queima, para verificar o atendimento de especificações, será discutido mais adiante, em capítulo específico. Este capítulo trata exclusivamente da inspeção visual e dos ensaios não destrutivos usados para detectar defeitos de fabricação.

Os equipamentos novos devem ser inspecionados na fábrica, antes do envio ao local de instalação. Os principais itens examinados nas superfícies interna e externa do equipamento são listados e discutidos na tabela 1.

<i>Item examinado</i>	<i>Liner e barreira de corrosão</i>	<i>Topcoat</i>
<i>Dureza Barcol</i>	<i>A dureza do liner deve ser maior que 90% do valor correspondente à cura máxima da resina.</i>	<i>Não é crítica na superfície externa</i>
<i>Sensibilidade a acetona</i>	<i>Feita apenas nas superfícies que curam expostas ao ar. A resina da superfície não deve ficar pegajosa ao ser esfregada com acetona.</i>	<i>O topcoat cura exposto ao ar. Não deve ser sensível à acetona</i>
<i>Trincas no liner</i>	<i>As trincas no liner não penetram na barreira de corrosão, mas podem servir de foco para futuras falhas por strain-corrosion. As trincas no liner devem ser reparadas.</i>	<i>Trincas na superfície externa não comprometem o equipamento.</i>
<i>Delaminações na barreira de corrosão</i>	<i>Essas delaminações formam núcleos para células osmóticas e células com alta concentração de produtos agressivos. As delaminações na barreira de corrosão devem ser reparadas.</i>	<i>Não ocorrem no topcoat.</i>
<i>Porosidade, pinholes, riscos superficiais</i>	<i>Esses defeitos reduzem a eficácia do liner e reduzem a vida química do equipamento. Mas, essa redução irrelevante não incapacita o equipamento. Se desejado, esses defeitos podem ser eliminados por lixamento seguido de aplicação de véu de superfície com resina parafinada.</i>	<i>Não comprometem o equipamento. Podem ser eliminados com lixamento seguido de resina parafinada.</i>
<i>Bolhas de ar</i>	<i>As bolhas de ar na barreira de corrosão não afetam a vida química do equipamento. Elas causam grande impacto visual, podendo eventualmente evoluir para bolhas osmóticas, mas não precisam ser reparadas.</i>	<i>Topcoats não formam bolhas de ar</i>
<i>Fibras expostas no liner</i>	<i>Essas fibras formam um caminho direto através do liner, que leva os produtos agressivos até a barreira de corrosão. Elas são localizadas e não incapacitam o equipamento. Não precisam ser eliminadas</i>	<i>Fibras expostas no topcoat não afetam o desempenho do equipamento.</i>
<i>Fibras não impregnadas na</i>	<i>Ao contrário das bolhas de ar, as fibras não impregnadas podem ter grandes espessuras e afetar a</i>	<i>Não afetam o desempenho do</i>

<i>barreira de corrosão</i>	<i>vida química. Além disso, elas podem formar bolhas osmóticas. As fibras secas na barreira de corrosão devem ser reparadas.</i>	<i>equipamento</i>
<i>Manchas secas na barreira de corrosão,</i>	<i>Igual acima. Essas manchas indicam má impregnação das fibras e devem ser reparadas</i>	<i>Na superfície externa, não afetam o desempenho do equipamento.</i>
<i>Insetos, cerdas de pincéis e outras inclusões</i>	<i>Essas inclusões permitem a passagem direta de produtos agressivos. Quando presentes apenas no liner, elas não incapacitam o equipamento e não precisam ser reparadas. Porém, quando presentes na barreira de corrosão elas podem afetar a durabilidade do equipamento.</i>	<i>Na superfície externa, não afetam o desempenho do equipamento.</i>
<i>Liner enrugado, como casca de laranja.</i>	<i>Não afeta a vida química e não requer reparo.</i>	<i>Não ocorre na superfície externa</i>
<i>Protuberâncias e depressões no liner</i>	<i>Não afetam o desempenho do equipamento</i>	<i>Não afetam o desempenho</i>
<i>Escorrimento de resina</i>	<i>Não afeta o desempenho. A remoção é opcional.</i>	<i>Não afeta o equipamento</i>
<i>Aresta exposta na parede do laminado</i>	<i>Devem ser cobertas com barreira de corrosão.</i>	<i>Não afetam o desempenho</i>

Tabela 1

Itens de inspeção e critérios de aceitação para defeitos e danos superficiais de equipamentos novos

Para examinar os itens citados na tabela 1, o inspetor precisa entrar no equipamento. As escadas usadas para entrar em tanques devem ter pés envolvidos com feltro ou outro material macio. Como alternativa, podem ser usadas escadas de corda. A entrada em equipamentos deve ser permitida apenas a pessoas com sapatos de sola macia e livre de areia ou qualquer outro material abrasivo.

4 - Defeitos no liner e na barreira de corrosão. A tabela 1 lista os defeitos em liners e barreiras de corrosão de equipamentos novos. A maioria deles pode ser detectada por inspeção visual. Esses defeitos são tão óbvios que os fabricantes sempre os eliminam antes de submeter seus equipamentos à inspeção. Para o inspetor, a inspeção visual é uma rotina que geralmente confirma a ausência desses defeitos.

A cura da resina é avaliada apenas no liner. São três os ensaios que medem a cura de resinas:

- (1) O ensaio de dureza Barcol.*
- (2) O ensaio DSC.*
- (3) A ensaio de sensibilidade à acetona.*

Esses ensaios avaliam a cura da resina em liners de equipamentos novos. A medição da cura é importante, porque os liners mal curados são facilmente penetrados por produtos agressivos. O grau de cura é medido apenas no liner.

Os principais defeitos encontrados nas barreiras de corrosão são fibras secas, bolhas de ar e delaminações. A barreira de corrosão é formada por 2 ou mais lâminas de mantas M450. Os quatro ensaios usados para detectar defeitos em barreiras de corrosão, são:

- (1) *Ensaio visual para detectar fibras secas, bolhas de ar e delaminações.*
- (2) *Ensaio de percussão, que detecta delaminações batendo o laminado com objeto rígido.*
- (3) *Ensaio de varredura, que detecta delaminações passando uma vareta de aço com ponta esférica na superfície do liner.*
- (4) *Ensaio de termografia, que detecta defeitos fotografando a radiação infravermelha emitida por barreiras de corrosão aquecidas. Esse ensaio complexo raramente é usado, porque requer o uso de câmaras infravermelhas e o aquecimento da barreira de corrosão.*

Os ensaios (2) e 3) detectam falhas pela resposta sonora do laminado. O ensaio (4) faz isso usando resposta térmica.

O ensaio de percussão consiste em bater na superfície com martelo ou outro objeto rígido, e observar o som emitido. A resposta sonora indica a presença ou ausência de delaminações na barreira de corrosão.

A vareta de varredura é uma haste fina e flexível, de aço, com 1 metro de comprimento e uma esfera, também de aço, na ponta. O ensaio é feito segurando a vareta pelo pé e varrendo a superfície com a esfera. Ao passar sobre as falhas, a esfera emite sons diferenciados que são reconhecidos pelo inspetor. Esses ensaios se baseiam no fato que os defeitos próximos da superfície emitem sons característicos quando percutidos com objetos rígidos ou varridos pela esfera de aço. O ensaio com vareta de varredura é melhor que o de percussão para detectar defeitos próximos da superfície. Essa situação inverte para defeitos profundos, onde a percussão é melhor que a vareta. Muitas vezes é preciso bater no laminado para confirmar a presença de delaminações profundas.

O ensaio de termografia usa emissão térmica para detectar falhas como bolhas de ar, fibras secas, corpos estranhos ou delaminações na barreira de corrosão. O ensaio é feito aquecendo o local a ser examinado e em seguida fotografando sua emissão infravermelha. O aquecimento pode ser feito com aquecedores portáteis a gás ou elétricos. A fotografia infravermelha indica as dimensões de falhas localizadas perto da superfície. O ensaio de termografia serve apenas para avaliar laminados recém-fabricados ou envelhecidos em ambientes que não atacam a resina. Por exemplo, ele serve para verificar a existência de delaminações em cascos de barcos, porque a água não ataca a resina. Mas não serve para detectar essas mesmas delaminações na barreira de corrosão de tanques contendo soluções ácidas. O ensaio de termografia pode ser usado para inspecionar equipamentos recém-fabricados, ou barreiras de corrosão recém restauradas, mas não serve para avaliar a vida química residual de equipamentos envelhecidos em ambientes agressivos.

5 - Defeitos nas lâminas estruturais. Esses defeitos têm pouca relevância, e nem foram citados na tabela 1. Os defeitos estruturais presentes em equipamentos novos podem resultar de falhas ou acidentes na fabricação do equipamento. As falhas de fabricação mais comuns em lâminas estruturais, são:

- *Excesso de bolhas de ar*
- *Presença de objetos estranhos*
- *Delaminações*
- *Fibras secas*
- *Escassez de fibras*

As bolhas, as fibras secas e as delaminações indicam falta de esmero no processo de fabricação. A deficiência de fibras indica desatenção na contagem das lâminas. Muitas vezes o projetista pede que o equipamento seja fabricado com, por exemplo, 10 lâminas de manta M450, mas o fabricante “comete um engano” na contagem e usa, digamos, apenas 8 mantas. Nesse caso o laminado fica com espessura aproximadamente 2,0 mm menor que a especificada. Outras vezes o fabricante usa “por engano” mantas M300 em lugar das mantas M450 especificadas pelo projetista. Esses dois “enganos” devem ser considerados como defeitos na estrutura do equipamento.

Os equipamentos recém construídos podem sofrer danos estruturais acidentais, localizados ou generalizados, durante o processo de fabricação. Os primeiros são causados por impacto. Os últimos são causados por erros na execução de ensaios. Os erros de ensaios são raros, mas acontecem. Por exemplo, eu já presenciei um inspetor desatento fazer ensaio de pressão com 5 atm ao invés de 5 PSI. Se a pressão de ensaio for excessiva, as lâminas podem trincar, afetando o desempenho do equipamento. Esse tipo de acontecimento é preocupante, porque a vida estrutural dos compósitos é determinada supondo que as lâminas se mantenham íntegras. Além disso, se as trincas excederem o umbral de exudação, os produtos químicos podem invadir as lâminas estruturais causando falhas catastróficas em curto prazo. A vida estrutural dos compósitos é determinada supondo que o ambiente agressivo jamais tenha contato direto com as lâminas estruturais. A água é o único agente agressivo capaz de penetrar nos laminados e afetar a vida estrutural dos compósitos.

Os danos estruturais localizados ocorrem como decorrência de impactos ou da aplicação acidental de vácuo, ou até de forças externas excessivas no manuseio ou na instalação. Eles causam trincas estruturais difíceis de reparar e exigem a intervenção de engenheiro especializado. Este assunto é tratado com detalhes no capítulo sobre reparos.

Esses são os defeitos que podem ocorrer nas lâminas estruturais de equipamentos novos. Eles podem ser detectados por três ensaios.

- (1) *Ultra-som*
- (2) *Emissão acústica*
- (3) *Radiografia*

O que segue é uma breve descrição desses ensaios.

5.1 - Ultra-som. Os ensaios com ultra-som podem medir a espessura e identificar a geometria e a localização de defeitos estruturais em laminados.

Os compósitos têm alto poder de atenuação de ondas acústicas, requerendo por isso o uso de transdutores de baixa frequência, geralmente entre 0,5 MHz e 5,0 MHz. As ondas de baixa frequência têm grande poder de penetração nos laminados, mas reduzem a sensibilidade do ensaio e deixam passar despercebidos alguns defeitos de pequena magnitude.

Existem duas modalidades de ensaio com ultra-som. A primeira, conhecida como “pulso-eco”, aplica pulsos de alta frequência perpendiculares à parede do equipamento – direção “z” – e analisa os ecos refletidos. A outra modalidade aplica pulsos de baixa frequência que percorrem o plano “x – y” do laminado, sendo captados por sensores colocados em pontos distantes previamente escolhidos. Na primeira modalidade é usado

um único transdutor, que emite o sinal e capta o eco. Na segunda modalidade, são usados vários transdutores, sendo um emissor e os demais receptores. Os receptores são posicionados em locais estratégicos, para captar as ondas transmitidas na parede do equipamento.

O ensaio “pulso-eco” avalia apenas a parte do laminado imediatamente sob o transdutor. Ele serve para medir espessura e caracterizar defeitos de fabricação no plano “x – y” do laminado. Como o caminho percorrido pela onda “pulso-eco” é curto, igual a duas vezes a espessura do laminado, é possível usar transdutores de maior frequência para aumentar a sensibilidade e a resolução do ensaio. Os ensaios “pulso-eco” são usados para caracterizar defeitos estruturais como delaminações, bolhas de ar, fibras secas e a presença de objetos estranhos no laminado estrutural. Mas eles devem ser usados apenas quando o local dos defeitos for conhecido (por meio de outros ensaios, como emissão acústica, martelo, vareta, etc) ou para assegurar que regiões críticas, como pescoços de flanges ou uniões laminadas, sejam isentas desses defeitos estruturais. Seu caráter localizado o torna inapropriado para avaliar todo o equipamento.

O outro tipo de ensaio com ultra-som, que aplica o pulso em um determinado ponto e capta suas respostas em pontos distantes, tem duas vantagens sobre o de “pulso-eco”. Quando as ondas de ultra-som propagam no plano “x – y” do laminado, elas avaliam uma grande área do equipamento com um único pulso, detectando defeitos perpendiculares à parede do equipamento. As ondas de baixa frequência propagam com pouca atenuação, cobrindo longas distâncias e permitindo a avaliação de grandes áreas do equipamento. Esse é o mesmo princípio usado nos ensaios de emissão acústica, a ser discutidos em seguida. As ondas elásticas de baixa frequência são conhecidas como ondas de Lamb, em homenagem ao matemático Inglês Horace Lamb, que as estudou no começo do século passado.

A atenuação e a velocidade das ondas de Lamb dependem da qualidade do laminado onde elas propagam. Essas ondas podem detectar o grau de cura da resina nas lâminas estruturais.

Nota: As ondas de Lamb podem medir o grau de deterioração estrutural comparando a atenuação obtida imediatamente após a fabricação do equipamento com a medida depois dele envelhecer em uso. É possível até relacionar a atenuação das ondas de Lamb com a perda de módulo do laminado. Esses resultados permitem fazer inspeção não-destrutiva da capacidade estrutural de compósitos envelhecidos em uso. Se existir uma base de dados confiável e representativa para servir de referência, não há dúvida que as ondas de Lamb podem ser úteis para medir o módulo de tração residual e avaliar a vida química residual de equipamentos envelhecidos em uso.

Essas considerações nos levam a concluir que os ensaios de ultra-som servem não apenas para detectar defeitos em equipamentos novos, mas podem ser úteis também para avaliar a vida química residual de equipamentos envelhecidos em uso. Somente a vida química, que é controlada pelo módulo de tração residual, pode ser avaliada por ultra-som. A vida estrutural, determinada por cargas mecânicas, não é controlada pelo módulo residual e não pode ser avaliada usando essa tecnologia. Esse assunto é tratado em detalhes no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites”.

5.2 - Emissão acústica. O ensaio de emissão acústica detecta a energia de ondas elásticas emitidas em resposta a rupturas na resina ou nas fibras, bem como na união

entre as fibras e a resina. Esses três tipos de ruptura emitem ondas elásticas de baixa frequência (ondas de Lamb) que propagam no plano $x - y$ do laminado, sendo detectadas por sensores. As ondas de Lamb emitidas na ruptura das fibras e da resina têm baixas frequências, sofrendo pouca atenuação e permitindo a inspeção de equipamentos de grandes dimensões. O ensaio de emissão acústica é capaz de discriminar e reconhecer os três tipos de onda referentes à ruptura da resina, das fibras ou da união vidro-resina. Ademais, ele é capaz de indicar também suas localizações. O que ele não faz é informar a dimensão e a geometria da falha. Essa informação, se desejada, pode ser obtida fazendo ensaios localizados complementares de ultra-som na modalidade “pulso-eco”.

A diferença entre o ensaio de ultra-som e o de emissão acústica pode ser resumida em poucas palavras. As ondas acústicas usadas nas sondagens ultra-sônicas são geradas por transdutores e injetadas nos laminados. Essas ondas de frequências escolhidas pelo inspetor são refletidas, captadas e analisadas para dar as informações desejadas. Por outro lado, as ondas do ensaio de emissão acústica são geradas pelo próprio equipamento (e não pelo inspetor) em resposta a rupturas nas fibras, na resina ou na ligação vidro-resina. As ondas do ensaio de emissão acústica não são geradas pelo inspetor.

Nos equipamentos de aço, o ensaio de emissão acústica mede a intensidade da energia elástica liberada no crescimento de trincas. Ele é muito usado para avaliar a capacidade estrutural de equipamentos de aço e outros materiais homogêneos que falham pelo crescimento de uma única trinca crítica.

Os sinais acústicos emitidos pelos compósitos, ao contrário dos emitidos pelos materiais homogêneos, resultam do aumento da densidade de micro trincas e não do crescimento de uma única trinca. As micro trincas presentes nos compósitos surgem na interface vidro-resina, na resina e nas fibras. Elas crescem em número, mas não em tamanho.

Se a carga mecânica aplicada no ensaio for fixa, estacionária, a densidade de trincas nos compósitos não aumenta e não ocorre emissão acústica. Mas, aumentando a solitação, a densidade de trincas cresce, emitindo ondas elásticas. Eventualmente essas trincas aglutinam, causando a falha dos compósitos por infiltração, exudação, perda de rigidez e finalmente por ruptura. Portanto, a falha dos compósitos ocorre pela aglutinação de um número gigantesco de micro trincas e não pelo crescimento de uma única trinca, como acontece com os metais.

As emissões acústicas nos equipamentos metálicos sob cargas crescentes se devem ao crescimento dessa trinca única. Portanto, no caso dos metais, podemos associar as emissões acústicas com o crescimento de uma trinca fatal. No caso dos compósitos, porém, as emissões acústicas devem ser associadas ao crescimento na densidade de trincas.

O ensaio de emissão acústica aplicado aos compósitos deve associar as intensidades de energia das emissões com as densidades de trincas correspondentes a elas. Por exemplo:

- *A intensidade das ondas de baixa energia mede a taxa de descolamentos vidro-resina. Essas descolamentos não causam falhas em laminados e essas emissões são ignoradas.*

- *A intensidade das ondas de média energia mede a taxa de ruptura da resina. Essas rupturas produzem as falhas por infiltração, exudação e perda de rigidez.*
- *A intensidade das ondas de alta energia mede a taxa de ruptura das fibras.*

Os ensaios de emissão acústica medem as taxas de crescimento das densidades de trincas que eventualmente falham os equipamentos de compósitos. O analista deve ter conhecimento do método para associar as falhas a essas taxas de crescimento. Esse é o argumento que justifica os ensaios de emissão acústica para equipamentos de compósitos. Como os conceitos de falha por infiltração, exudação e perda de rigidez ainda são desconhecidos – estou tentando introduzi-los agora – eu suspeito que os ensaios de emissão acústica realizados atualmente focam apenas na falha por ruptura, que têm pouca relevância para equipamentos industriais.

5.3 - Radiografia. Para dar contraste, e permitir a identificação das falhas estruturais, os ensaios de radiografia são feitos usando um líquido penetrante e opaco aos raios “X”. Esse tipo de coisa é factível em laboratório, mas impraticável no campo. As medições com raios “X” podem ser úteis em laboratório, mas não têm utilidade prática para prever a vida estrutural ou a vida química de equipamentos de compósitos.

Capítulo 8

Inspeção de equipamentos envelhecidos em uso

1 – Introdução. O capítulo anterior mostrou como detectar e avaliar defeitos de fabricação em equipamentos recém construídos. Este capítulo discute os métodos para detectar e avaliar danos sofridos por equipamentos em serviço. O protocolo de inspeção para equipamentos envelhecidos em uso deve dar respostas claras e definitivas a quatro perguntas:

- *O equipamento deve ser retirado de uso?*
- *O equipamento pode ser mantido em uso sem reparos?*
- *Qual é a expectativa de vida residual do equipamento sem reparos?*
- *Que intervenções devem ser feitas para reabilitar o equipamento?*

A estratégia de inspeção nesses casos é semelhante à usada para equipamentos novos. A diferença entre elas está ligada mais na terminologia que nos procedimentos. A inspeção de equipamentos novos detecta **defeitos** de fabricação, ao passo que a de equipamentos envelhecidos procura por **danos** incorridos em serviço. Se entendermos “dano” como “defeito”, as duas estratégias são quase idênticas.

Este capítulo foca apenas da inspeção de equipamentos. Os protocolos de reparo são tratados nos capítulos seguintes.

2 - Os danos mais comuns. Os equipamentos em serviço são atacados pelos produtos armazenados ou conduzidos por eles. Além disso, eles sofrem também a deterioração causada por raios solares, além de impactos e de outros abusos. Esses equipamentos devem ser inspecionados periodicamente para programar eventuais manutenções. Os pontos seguintes devem ser observados:

2.1 - Descoloração – O liner e a barreira de corrosão podem apresentar mudança de cor quando penetrados por alguns ambientes. A foto em seguida mostra o liner escurecido depois de penetrado por vinhaça. Como a vinhaça não contém produtos agressivos à resina, essa mudança de cor não implica em deterioração. Em geral as mudanças de cor não inócuas e não implicam em deterioração ou necessidade de manutenção.



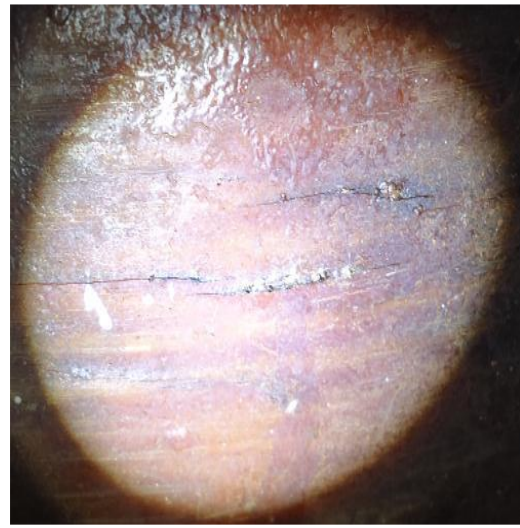
A foto mostra o liner escurecido quando penetrado por vinhaça. A barreira de corrosão, exposta pela remoção do liner, não foi atingida.

2.2 - Vazamentos – Os vazamentos observados em equipamentos velhos podem ser localizados ou generalizados.

2.2.1 – Vazamentos localizados. Os vazamentos localizados ocorrem em defeitos de laminação ou em rachaduras causadas por impacto ou deformação excessiva. Os vazamentos ocorrem principalmente nas fixações de bocais, na união de flanges e nas uniões laminadas.

No que diz respeito aos danos causados por impacto, os grandes vilões são as empilhadeiras ou outros veículos que transitam pela área onde os equipamentos são instalados. Outra causa comum é a queda de ferramentas dentro de tanques. Esses impactos podem rachar o equipamento e causar vazamentos. Atenção especial deve ser dada aos equipamentos feitos por enrolamento cruzado, onde o fluido que penetra nas rachaduras internas pode caminhar ao longo das fibras UD e vazar em locais distantes da área danificada. Esse é um complicador a mais na vida do inspetor, que vê o vazamento, mas nem sempre localiza sua origem.

As rachaduras provenientes de deformações excessivas são observadas em equipamentos flexionados ou comprimidos na direção axial. Elas podem acontecer também em equipamentos comprimidos radialmente, como mostra as fotos abaixo.



O vazamento ocorreu próximo à braçadeira metálica, de cor branca e visível na parte inferior da foto na esquerda. O aperto excessivo da braçadeira causou trincas ao longo das fibras UD, mostradas na foto da direita. Essas trincas ocorrem na resina. Fotos cedidas pela Suzano.

Os danos em bocais, flanges ou uniões laminadas são praticamente impossíveis de detectar a olho nu, sendo percebidos apenas quando ocorrem os vazamentos. Esses vazamentos resultam de desleixo do fabricante, geralmente acontecendo com a penetração e passagem de fluido pela interface mal preparada. O vazamento ocorrer em locais distantes do ponto de penetração da solução. As fotos abaixo ilustram esse tipo de vazamento.



Vazamentos ocorridos na interface da união laminada e o tubo. A foto na esquerda mostra o escoamento do material vazado. A foto na direita mostra apenas o resíduo de material vazado. Nos dois casos, o caminho seguido pelo material vazado acompanhou os locais secos (sem resina) na interface da união laminada e o tubo. Fotos cedidas pela Suzano.

2.2.2 – Vazamentos generalizados. Os vazamentos generalizados, observados em toda superfície, acontecem no fim da vida do equipamento após a penetração e destruição do laminado.

Eles podem acontecer também por erro de operação ou por acidente, se o equipamento for submetido a altas pressões e alongamentos acima do umbral de exudação. Se o umbral de exudação for excedido, a densidade de trincas fica muito grande e o equipamento vaza.

Os vazamentos generalizados não têm cura. Quando eles ocorrem, as lâminas estruturais plenamente contaminadas pelo ambiente agressivo não podem ser reparadas.

2.3 – Bolhas osmóticas – As bolhas osmóticas ocorrem no liner e algumas vezes na primeira manta da barreira de corrosão. Essas bolhas não afetam a capacidade estrutural ou a durabilidade do equipamento. Elas não são críticas e podem ser ignoradas. Os reparos são difíceis de executar, porque não colam em substratos contaminados.

2.4 - Afloramento de fibras no topcoat. – Os raios solares (ultravioleta) atacam a resina do laminado externo, causando o afloramento das fibras de vidro. Algumas vezes esse afloramento é intenso e assusta o usuário do equipamento. Esse dano não coloca o equipamento em risco, podendo ser facilmente corrigido por lixamento e remoção das fibras afloradas, seguido da aplicação de topcoat parafinado.

2.5 – Trincas – Os compósitos crescem trincas apenas na resina. Ao encontrar fibras, as trincas na resina param de crescer e espalham, formando outras que também crescem na resina até novamente ser paradas pelas fibras. Dessa maneira os compósitos formam muitas trincas pequenas, mas nunca trincas grandes como as observadas nos metais. Para os compósitos, o correto é falar em “densidade de trincas” e não em trincas. As únicas trincas grandes observadas nos compósitos acontecem na resina do liner, na resina entre fibras UD e nas delaminações.

Nota: Além dessas trincas na resina, existem também as muito raras trincas de strain-corrosion, que atravessam as fibras. A discussão completa do fenômeno de strain-corrosion pode ser encontrado no livro “Durability of Industrial Composites”.

Vamos discutir as trincas observadas em equipamentos envelhecidos em uso.

2.5.1 – Trincas no liner. As trincas no liner crescem apenas na resina, sendo paradas pelas fibras da barreira de corrosão. Elas são causadas por impacto, deformação excessiva, ou pelo ataque do ambiente. As trincas de impacto são do “tipo estrela”, porque irradiam de um ponto central. As trincas de deformação são paralelas e alinhadas na direção de tensão máxima. O ataque do ambiente forma trincas de direções aleatórias, como as observadas em lama seca.

Essas trincas invalidam a função do liner, deixando a barreira de corrosão exposta ao contato direto do ambiente agressivo. Isso, porém, não deve ser causa de preocupação, porque a barreira de corrosão é capaz de suportar sozinha o ataque do ambiente agressivo. Em princípio podemos ignorar a presença de trincas no liner de equipamentos usados. As tentativas de eliminar as trincas e aplicar um novo liner é geralmente frustrada pela dificuldade de colagem em substratos contaminados.

Nota: As trincas devem ser eliminadas apenas em liners de equipamentos novos, não contaminados, como prevenção contra strain-corrosion. O reparo é feito lixando a área afetada até expor as fibras da barreira de corrosão. Em seguida o liner é recomposto.

As trincas que aparecem no topcoat não afetam a vida química do equipamento, sendo reparadas conforme conveniência do usuário.

2.5.2 – Trincas ao longo das fibras UD. Essas trincas crescem na resina sem encontrar fibras que as parem. Elas são grandes e visíveis a olho nu, tendo a aparência de linhas brancas acompanhando as fibras UD. O produto agressivo penetra nessas trincas, passando rapidamente de uma lâmina UD para outra. Isso não é um problema grave, porque ocorre apenas em um local isolado de uma lâmina UD isolada. Porém, acima do umbral de infiltração da barreira de corrosão, essas trincas nas lâminas UD reduzem drasticamente a vida química do equipamento. A barreira de corrosão protege laminados UD trincados.

As trincas ao longo das fibras UD ocorrem na estrutura do laminado e não são reparadas. O equipamento deve ser mantido em serviço sem reparos.

2.5.3 – Delaminações. Delaminações são trincas que crescem na fina camada de resina entre lâminas. As delaminações próximas à superfície do equipamento, na barreira de corrosão, são facilmente reparadas lixando e substituindo o material na área afetada. Esses reparos, porém, raramente tem sucesso, porque não colam em substratos contaminados. As delaminações profundas, que ocorrem no laminado estrutural, são ignoradas.

Nota: As delaminações profundas são toleráveis e não acarretam prejuízo aos equipamentos que trabalham com pressão e temperatura constantes. Mas, se a pressão ou a temperatura de trabalho oscilarem, essas delaminações podem causar as raríssimas “falhas anômalas”. Para detalhes sobre a falha anômala, veja o livro “Durability of Industrial Composites”.

2.5.4 – Trincas de strain-corrosion. Strain-corrosion é um processo destrutivo que gera trincas em laminados flexionados em presença de produtos agressivos. As trincas de strain-corrosion são as únicas que crescem através das fibras. Sempre que o inspetor encontrar uma trinca de grandes dimensões cortando as fibras, ele pode afirmar com certeza a presença de strain-corrosion.

O processo de strain-corrosion não é auto limitante, crescendo suas trincas até romper o laminado. Muitas rupturas catastróficas e aparentemente inexplicáveis de equipamentos em serviço são causadas por strain-corrosion.

Sempre que o inspetor for chamado para explicar a causa da ruptura catastrófica de equipamentos, ele deve observar dois pontos antes de quaisquer outros. Primeiro, ele observa a boca de visita do equipamento, que muitas vezes é montada de maneira inadequada. Se a boca de visita não for a causa, ele deve procurar evidências da trinca de strain-corrosion. As trincas de strain-corrosion são fáceis de identificar. Suas principais características são:

- *Elas são muito longas*
- *Elas cortam o laminado perpendicularmente às fibras.*
- *Elas são distintas das rachaduras típicas de ruptura, por não terem fibras esgarçadas.*

O fenômeno de strain-corrosion é muito raro e os inspetores geralmente não são treinados para reconhecê-lo. A maioria dos inspetores olham para as trincas de strain-corrosion e as consideram triviais. Mas o inspetor bem treinado sabe que as coisas não são assim. Primeiro, os compósitos não desenvolvem trincas triviais. E segundo, as trincas de strain-corrosion são fatais. O reparo dessas trincas envolve intervenção nas lâminas estruturais, como mostramos no capítulo 9.

2.5.5 – Rasgamento. Rasgamentos são rachaduras ou rupturas de laminados causadas por esforços mecânicos extremos. Os rasgamentos são muitas vezes chamados de trincas, mas de fato não são trincas. Os compósitos não crescem trincas. As rachaduras (ou rasgamentos) apresentam fibras esgarçadas, típicas de falha por ruptura. As trincas de strain-corrosion, ao contrário, não apresentam fibras esgarçadas. O reparo de rachaduras é complexo, porque envolve intervenção nas lâminas estruturais. Os reparos estruturais são tratados no capítulo 9.

2.6 – Danos estruturais. Os danos estruturais podem ser generalizados ou localizados.

Os danos estruturais generalizados ocorrem em todo o laminado, quando o equipamento é danificado por vácuo, fogo ou pressão excessiva. O reparo desses danos pode ser oneroso e muitas vezes o custo da restauração é tão alto que é melhor descartar e substituir o equipamento. Quando a restauração for viável, ela deve ser feita na superfície externa do equipamento. Os protocolos de reparo estrutural são descritos no capítulo seguinte.

Os danos estruturais localizados ocorrem em áreas de pequena extensão, tendo como causa defeitos de fabricação que passaram despercebidos na inspeção ou erros operacionais ou ainda acidentes.

- *Os danos localizados causados por erro operacional são extremamente raros.*
- *Os danos estruturais associados a defeitos de fabricação são muito comuns. Por exemplo, um defeito de fabricação comum é a colagem inadequada de bocas de visita.*
- *Os danos acidentais podem ocorrer a qualquer momento e resultam principalmente de impacto ou vácuo. Não é raro encontrar tanques colapsados por vácuo causado pelo entupimento de respiros.*

Os procedimentos para reparar danos estruturais localizados são mostrados no capítulo seguinte.

O método mais usado para avaliar a capacidade estrutural de equipamentos envelhecidos em uso é, sem dúvida, o de emissão acústica. Esse método detecta não apenas defeitos de fabricação em equipamentos novos (v. capítulo anterior), mas também danos estruturais incorridos em uso.

Os equipamentos envelhecidos em uso são avaliados estruturalmente apenas nas raras situações de acidentes causados por impacto ou por erros operacionais envolvendo temperatura, pressão ou vácuo excessivos. Esses erros operacionais podem aumentar a densidade de trincas na lâmina crítica e encurtar a vida dos equipamentos submetidos a cargas cíclicas. Esse assunto é muito específico e foge do escopo deste capítulo. Os leitores interessados devem consultar a livro “Durability of Industrial Composites”.

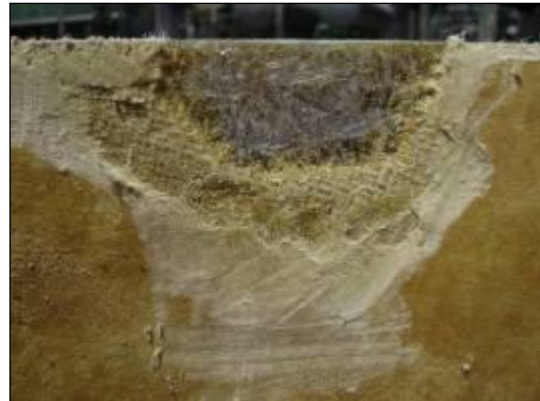
2.7 - Inspeção de tubos envelhecidos. A superfície interna de tubos de pequeno diâmetro não pode ser acessada para inspeção. Isso impede a execução da maioria dos itens de inspeção citados nas seções anteriores.

A inspeção de tubos novos, recém-fabricados, é limitada às medições da classe de pressão, classe de rigidez, dureza Barcol, espessura, diâmetro e comprimento. Se desejado, os tubos podem ser cortados e queimados para determinar sua capacidade estrutural. Fora isso, nada mais pode ser feito.

A vida química residual de tubos envelhecidos em uso é feita determinando o módulo de tração residual após longo tempo de operação. Para melhores resultados, são necessárias duas medições, feitas em tempos diferentes. Esses detalhes são amplamente discutidos no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites” e resumidamente no capítulo 16 deste livro.



A única maneira de medir a penetração do ambiente agressivo em tubos é cortando sua parede. A foto na esquerda mostra corte feito com broca de copo. A foto na direita, mostra corte de todo o tubo. Fotos cedidas pela Cenibra



Fotos que mostram a penetração do ambiente agressivo na barreira de corrosão de tubos. A foto na direita mostra barreira totalmente penetrada. Fotos cedidas pela Cenibra.

CAPÍTULO 9

Reparo de danos localizados.

1 – Introdução. O principal atrativo dos equipamentos de compósitos usados em ambientes agressivos é sua excepcional durabilidade e pouca necessidade de manutenção. Porém, como vimos no capítulo anterior, esses equipamentos podem requerer reparos para sanar danos incorridos antes ou durante o uso.

A manutenção é feita em três situações.

- *A manutenção interna é feita apenas em equipamentos novos, não contaminados em uso. Ela é feita para sanar danos ou defeitos na barreira de corrosão ou no liner.*
- *A manutenção externa é feita em tanques envelhecidos em uso, para restaurar a capacidade estrutural perdida por ataque químico.*
- *A terceira situação ocorre em equipamentos que sofrem arranhões, esbarros, impactos e outros abusos externos, que afetem localmente sua estrutura.*

Não recomendamos fazer reparos internos em tanques usados, envelhecidos em uso. Os reparos nessa situação dificilmente aderem nos substratos contaminados e, também importante, destroem o importante efeito escudo protetor do equipamento. Reparos internos podem ser feitos apenas em tanques novos, não contaminados.

2 – Protocolo geral de reparo. Como regra geral, os reparos são feitos substituindo o material danificado por outro saudável e capaz de assegurar o mesmo desempenho original. Os reparos de danos pequenos, sejam eles superficiais ou estruturais, são feitos obedecendo o seguinte protocolo.

- *A área de colagem deve ser vigorosamente lixada no laminado original até expor as fibras. Ela deve estar limpa e seca antes de iniciar o reparo.*
- *Transições bruscas de espessura ou geometria devem ser evitadas. A borda de transição do reparo com o laminado original deve ser chanfrada. Antes de receber o reparo, os cantos vivos devem ser adoçados.*
- *Crateras e depressões formadas pela remoção de material danificado devem ser niveladas com massa de resina. Esse nivelamento é necessário para evitar esforços fora do plano das lâminas.*
- *Os reparos são feitos manualmente com manta M450, tecido T800 e véu de superfície.*
- *A resina usada não precisa ser a mesma do laminado original. Os reparos de resina vinil éster colam bem sobre poliéster e vice-versa.*
- *Toda resina que curar exposta ao ar deve ser parafinada e ativada para cura rápida.*

Passemos agora à descrição dos protocolos de reparo. Este capítulo trata apenas de danos localizados. Os reparos de danos generalizados, requerendo troca da barreira de corrosão, ou reforço externo para restaurar a vida química, são tratados no capítulo 10.

3 - Reparos no liner. Os danos no liner de equipamentos recém-construídos são fáceis de reparar. O protocolo de execução consiste essencialmente na eliminação do dano e laminação de um liner novo.

- *As trincas presentes no liner não penetram na barreira de corrosão. Os reparos são feitos no local danificado, substituindo o liner trincado por outro novo.*
- *Para reparar liners, o laminador deve ter acesso ao interior do equipamento. Isso quer dizer que apenas tanques e tubos de grandes diâmetros podem ser reparados.*
- *Como o reparo cura exposto ao ar, ele deve ser parafinado.*
- *A remoção do dano pode ser feita com broca ou com lixadeira orbital.*
- *Se a temperatura de trabalho for maior que 100C, ou se o ambiente for muito agressivo, o reparo deve ser feito usando a tecnologia split-liner.*
- *Se a temperatura de trabalho for menor que 100C e se o ambiente for pouco agressivo, a tecnologia split-liner não é necessária. Nesses casos, o reparo consiste em substituir o liner danificado por outro novo, feito com véu de superfície ou com escamas de vidro. A figura 1 mostra a aplicação de liner novo feito com escamas de vidro.*

4 - Reparos na barreira de corrosão. Esses reparos são feitos unicamente em equipamentos novos, ainda sem contaminação. Os danos de pequena extensão presentes na barreira de corrosão de equipamentos novo podem ter origem em defeitos de fabricação ou em acidentes. Os reparos são feitos “removendo e substituindo o material danificado”. Os danos na barreira de corrosão são reparados da mesma maneira que dentistas restauram dentes cariados.

Vamos explicar porque não recomendamos reparar barreiras de corrosão envelhecidas em uso. Para ilustrar, vamos considerar dois reparos, um feito em cascos de barcos, outro em barreiras de corrosão. A preparação do substrato antes da restauração de barreiras de corrosão difere da feita para reparos em cascos de barcos ou em piscinas. Nos dois casos, o ambiente penetra no laminado e atinge as lâminas internas. A diferença é que, em barcos e piscinas, a água seca sem deixar resíduos, enquanto que em equipamentos industriais os ambientes secam deixando resíduos. Esses resíduos devem ser eliminados, porque impedem a aderência do reparo. É por isso que, ao contrário dos reparos feitos em barcos e em piscinas, o protocolo para reparo interno em equipamentos industriais exige a execução do teste de aderência. Nossa recomendação é contrária à laminação de reparos internos em equipamentos contaminados.

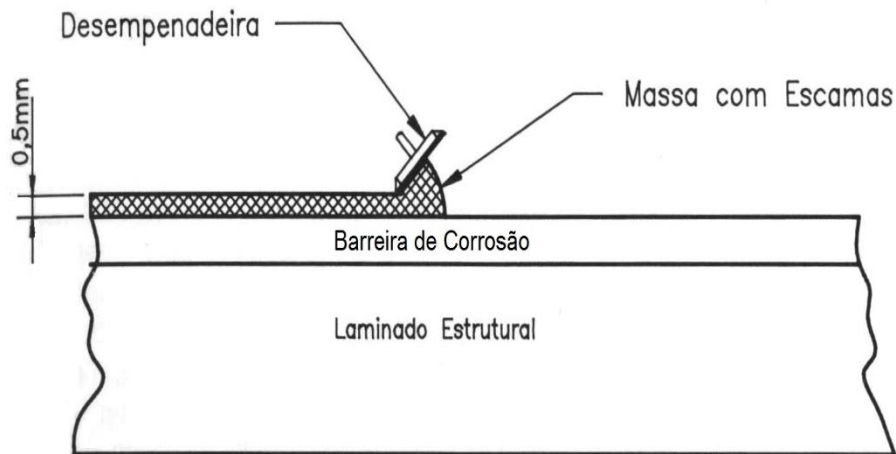


Figura 1

Trocando o liner. O liner danificado é substituído por outro feito com véu ou com escamas de vidro. As escamas são aplicadas com desempenadeira (escamas de 3,2 mm) ou com pistola (escamas de 0,4 mm). Como o novo liner cura exposto ao ar, a última demão deve ser parafinada para evitar inibição da cura.

Os reparos feitos na barreira de corrosão de equipamentos novos, sem uso, são feitos simplesmente removendo o material danificado e repondo no lugar deles as lâminas originais. A largura da faixa de colagem do reparo no substrato geralmente é da ordem de $\Delta = 50$ mm. Os reparos localizados feitos em barreiras de corrosão devem ter o mesmo esquema de laminação da barreira de corrosão original e devem se estender 50 mm ao redor da zona danificada. Os reparos são feitos no lado interno do equipamento, que deve ser acessível ao laminador. As barreiras de corrosão de tubos de pequenos diâmetros, inacessíveis do lado interno, não são reparadas.

O material danificado é removido com lixadeira, deixando um pequeno chanfro nas bordas para facilitar a laminação. O procedimento de execução é como segue.

1. Marcar com pincel atômico o contorno da área a ser lixada, incluindo a faixa de ancoragem de largura $\Delta = 50$ mm.
2. Remover o material danificado com lixadeira orbital, deixando chanfro de 20 mm nas bordas.
3. Lixar a superfície de ancoragem, com largura $\Delta = 50$ cm, para receber o reparo.
4. O substrato deve estar limpo e seco.
5. Se o reparo for feito em equipamento usado, fazer o teste de aderência
6. Aplicar primer, geralmente de resina
7. Nivelar o local do reparo com massa inerte
8. Laminar a nova barreira de corrosão
9. Laminar o liner com resina parafinada

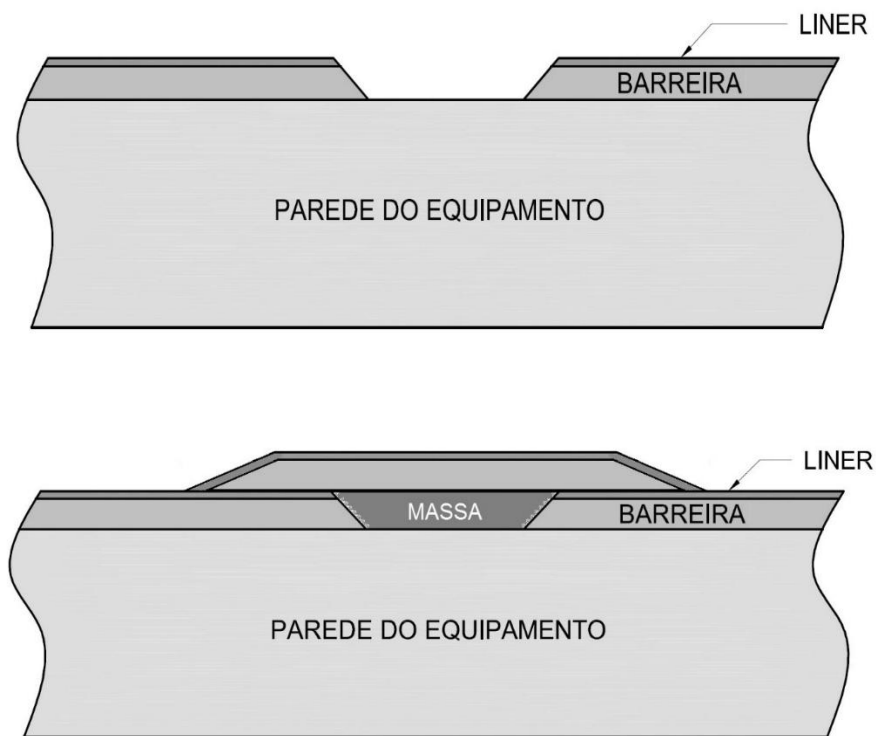


Figura 2

Reparo de pequena extensão feito em barreira de corrosão. A faixa lixada ao redor do dano não precisa ser maior que $\Delta = 50$ mm. A barreira de corrosão danificada é removida com lixadeira. Esse reparo funciona bem para equipamentos novos. Os reparos internos são difíceis de colar nos equipamentos envelhecidos em uso,

4 – Reparos no topcoat. O topcoat não trabalha imerso em ambientes agressivos e requer apenas resistência ao ataque de eventuais respingos corrosivos. A degradação observada em topcoats se limita a arranhões, trincas e afloramento de fibras de vidro, que são reparáveis por lixamento seguido de aplicação de resina.

Os arranhões e as trincas são inócuos e na maioria das vezes são deixados sem reparo. O afloramento de fibras de vidro é esteticamente objetável e pode ser corrigido removendo as fibras expostas e aplicando resina poliéster ou pintura convencional. Repetindo, os danos observados no topcoat são considerados cosméticos, isto é, não afetam o desempenho do equipamento.



O afloramento de fibras ocorre quando o ambiente externo ataca e remove resinas mal curadas. Esse problema é resolvido removendo as fibras soltas e aplicando pintura ou topcoat parafinado.

5 – Reparos estruturais. Os danos estruturais podem ser de dois tipos. Se todas as lâminas forem danificadas, dizemos que ele é total ou passante. Se apenas algumas lâminas forem danificadas, dizemos que ele é parcial ou não passante. Nos dois casos, a restauração é feita substituindo o material danificado por pares de mantas M450 e de tecidos T800.

O protocolo para dimensionar reparos estruturais em laminados de compósitos é idêntico ao usado para reabilitação estrutural de equipamentos de aço. Os mesmos princípios são válidos nos dois casos. Esse assunto foi ampla e exaustivamente discutido nos capítulos 9 e 10 do livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos”. O que segue é uma discussão resumida dos detalhes tratados nesse livro.

5.1 – Reparo de danos estruturais não passantes. O dimensionamento de reparos para danos estruturais não passantes é feito usando o critério de reposição da rigidez.

A espessura do reparo é determinada para restaurar a rigidez original do equipamento.

$$E_r \times t_r = E_s \times \Delta e$$

$$t_r = \frac{E_s}{E_r} \times \Delta e$$

Onde

t_r é a espessura do laminado de reparo

Δe é a espessura removida

E_s é o módulo de tração do substrato

E_r é o módulo de tração do reparo

A equação acima calcula a espessura do reparo estrutural não passante quando são conhecidos o módulo de elasticidade E_s do laminado, a espessura Δ_e removida e o módulo de elasticidade E_r do reparo. Para reparos feitos com pares de mantas M450 e de tecidos T800, $E_r = 123\ 000\ \text{kg/cm}^2$.

A largura Δ da faixa de ancoragem que transfere por cisalhamento os esforços de tração do costado para o reparo é

$$\Delta = \frac{N \times CS}{\tau}$$

Onde

N é a força por unidade de comprimento atuante no reparo. Essa força deve ser conhecida.

CS = 10 é o coeficiente de segurança de longo prazo mandado pela ASME RTP1

$\tau = 140\ \text{kg/cm}^2$ é a resistência ao cisalhamento secundário segundo a ASME RTP1.

A remoção do material danificado nos reparos não passantes deixa uma depressão na parede do equipamento, que precisa ser enchida e nivelada com massa de resina. Esse nivelamento é necessário para evitar forças fora do plano do reparo.

Os danos estruturais não passantes ocorrem nas lâminas externas – causados por cortes ou impactos. Os danos não passantes afetam apenas algumas lâminas estruturais externas e não requerem abertura de janela na parede.

A reabilitação estrutural é feita por fora, com pares MT, após remoção das lâminas externas danificadas. A espessura e a largura da faixa de colagem do reparo são calculadas pelas equações mostradas antes.

O protocolo de execução é como segue

1. *Marcar o perímetro da área danificada*
2. *Marcar a faixa de ancoragem, de largura Δ , ao redor da área danificada.*
3. *Remover as lâminas danificadas com lixadeira orbital. A remoção é feita do lado externo. A cavidade deixada por essa remoção deve ser nivelada com massa de poliéster.*
4. *Lixar a largura Δ da faixa de ancoragem.*
5. *Aplicar o primer.*
6. *Encher e nivelar a cavidade formada pela remoção das lâminas danificadas.*
7. *Laminar o reparo aplicando as lâminas largas por baixo e as estreitas por cima.*
8. *O reparo é executado com lâminas de larguras decrescentes, para formar os degraus mostrado na figura 4.*
9. *Aplicar topcoat parafinado*

A figura 4 mostra um reparo estrutural não passante aplicado do lado de fora. Note a cavidade deixada pelas lâminas removidas, enchida e nivelada com massa de resina. Isso é necessário para evitar forças fora do plano das lâminas.

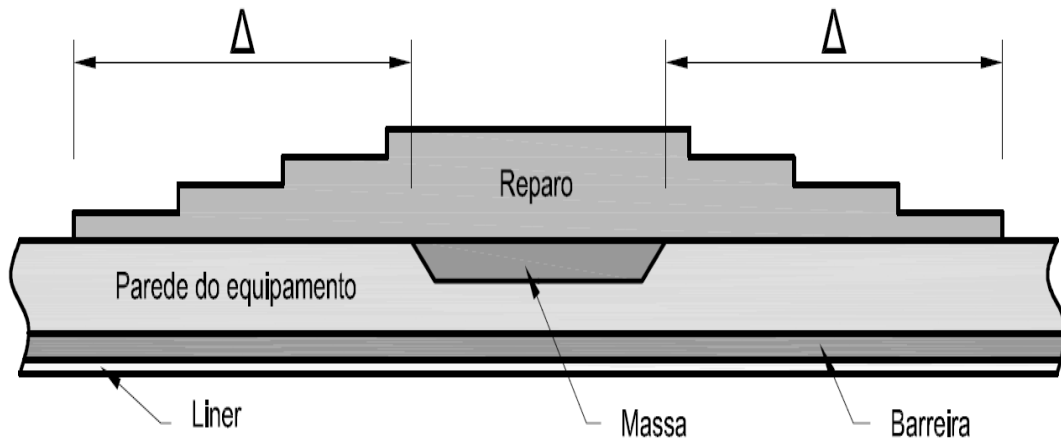


Figura 4

A borda de corte deve ser chanfrada, e a cavidade deixada pelas lâminas removidas deve ser enchida com massa de resina. Essa massa nivela a superfície e evita esforços fora do plano das lâminas.

Exemplo 1. Calcular a espessura do reparo estrutural para o costado UD70 de um tanque vertical cilíndrico danificado localmente. A inspeção indicou a necessidade de remover 3,0 mm do lado externo da parede. As lâminas danificadas foram cortadas e removidas.

São dados:

$\Delta e = 3,0 \text{ mm}$ (Espessura removida)
 $E_s = 298200 \text{ kg/cm}^2$ (Módulo do substrato UD70)
 $E_r = 123000 \text{ kg/cm}^2$ (Módulo do reparo)
 $N = 150,0 \text{ kg/cm}$ (Força de tração na parede do tanque)
 $t = 5,0 \text{ mm}$ é a espessura original do costado

Aplicando a equação

$$t_r = \frac{E_s}{E_r} \times \Delta e$$

$$t_r = \frac{298200}{123000} \times 3,0 = 7,3 \text{ mm}$$

O reparo feito com 5 mantas M450 e 4 tecidos T800 dá a espessura $5 \times 1,05 + 4 \times 0,85 = 8,65 \text{ mm}$. Assim, são necessários 8,65 mm de laminado feito com mantas M450 e tecidos T800 para substituir 3,0 mm de laminado cruzado UD70. O reparo será aplicado por fora do tanque.

A largura Δ da faixa de ancoragem é

$$\Delta = \frac{N \times CS}{\tau} = \frac{150 \times 10}{140} = 11 \text{ cm}$$

O reparo é feito por fora, sem afetar o liner e a barreira de corrosão. A reabilitação do tanque é feita da seguinte maneira:

- *A área danificada é marcada por fora do tanque.*
- *As lâminas internas, provavelmente danificadas pelo contato prolongado com o produto químico, não são removidas*
- *O reparo estrutural é laminado por fora.*

5.2 – Reparo de danos passantes. O dimensionamento de reparos para danos estruturais passantes é feito essencialmente da mesma maneira que o dos não-passantes, discutidos na seção anterior. O critério de reposição da rigidez nesse caso é

$$E_r \times t_r = E_s \times t_s$$

$$t_r = \frac{E_s}{E_r} \times t_s$$

Onde

t_r é a espessura do laminado de reparo

t_s é a espessura do equipamento

E_s é o módulo de tração do substrato

E_r é o módulo de tração do reparo

A equação acima calcula a espessura do reparo estrutural passante quando são conhecidos o módulo E_S e a espessura t_S do equipamento, bem como o módulo E_R do reparo. Para reparos feitos com pares de mantas M450 e de tecidos T800, E_R = 123 000 kg/cm².

A largura Δ da faixa de ancoragem que transfere por cisalhamento os esforços de tração do costado para o reparo é

$$\Delta = \frac{N \times CS}{\tau}$$

Onde

N é a força atuante no reparo por unidade de comprimento. Essa força deve ser conhecida.

CS = 10 é o coeficiente de segurança de longo prazo mandado pela ASME RTP1

τ = 140 kg/cm² é a resistência ao cisalhamento secundário segundo a ASME RTP1.

Vamos mostrar como fazer o reparo de danos estruturais passantes. A região danificada deve ser cortada e removida, deixando um espaço vazio, ou janela, na parede do equipamento. A figura 3 mostra os detalhes do reparo estrutural aplicado nessa janela. Observe que a espessura do laminado é construída em degraus, caindo do valor máximo sobre a janela até o valor mínimo na borda da faixa de ancoragem. O número de degraus depende da espessura do reparo e da largura da faixa de colagem. O procedimento para calcular a largura Δ da faixa de ancoragem e o número de degraus está bem explicado no apêndice do capítulo que trata de uniões laminadas.

A parede do equipamento não precisa ser chanfrada ao longo da borda de corte da janela. Porém, se desejado, pode ser feito chanfro do lado interno do equipamento. A borda de corte deve ser envelopada com barreira de corrosão igual à do equipamento original. Se a janela for muito estreita e não permitir isso, esse envelopamento é dispensado. O reparo é laminado do lado externo, sobre molde descartável colocado sobre a janela. Esse molde descartável deve ter curvatura igual à do equipamento original. O protocolo de execução é descrito em seguida.

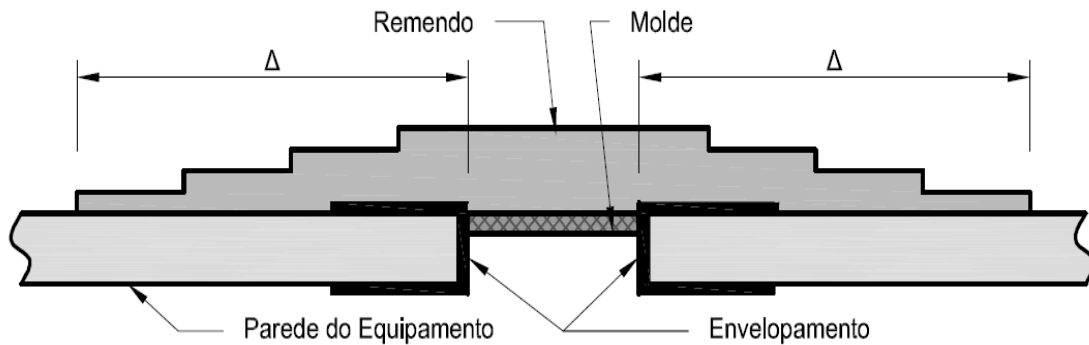


Figura 3

O reparo estrutural passante é laminado por fora, sobre molde descartável. Observe a construção em degraus na área de ancoragem. A figura não mostra chanfro na borda de corte.

1. Marcar com pincel atômico, do lado externo do equipamento, os contornos do dano e da área de ancoragem. A largura Δ da faixa de ancoragem é calculada em função dos esforços atuantes.
2. Cortar e remover o laminado danificado.
3. Chanfrar internamente a borda do equipamento ao longo da janela.
4. Lixar na superfície interna do equipamento, sobre o liner, uma faixa de 50 mm para envelopar a borda da janela.
5. Lixar na superfície externa do equipamento a largura Δ da faixa de ancoragem previamente demarcada
6. Envelopar a borda cortada, com mantas M450 e véu de superfície. Esse envelopamento deve reproduzir a barreira de corrosão original.
7. Cobrir a janela com molde descartável. Isso só é possível se a superfície interna do equipamento for acessível. O molde descartável deve ter a mesma curvatura do equipamento original e deve cobrir a janela sem deixar saliências ou depressões. As saliências devem ser lixadas e as depressões encheidas com massa de resina. O reparo deve ser aplicado sobre superfície bem nivelada para evitar forças fora do plano.
8. Laminar os degraus formados por pares MT sobre o molde descartável, do lado de fora, começando com as lâminas grandes e terminando com as pequenas.
9. O laminado de reparo deve ser aplicado em degraus como mostra a figura 3.
10. Se a superfície interna do equipamento não for acessível, o molde descartável deve ser substituído por molde permanente, feito com mantas M450 e véu de superfície,

reproduzindo a barreira de corrosão. Esse molde permanente é posicionado sobre a janela e o reparo é laminado sobre ele.

6 – Danos estruturais generalizados. Esses danos são observados no final da vida química dos equipamentos, quando o ambiente agressivo que penetra e danifica a estrutura do equipamento. Outra situação acontece quando picos de pressão interna excede, por acidente, o umbral de infiltração do equipamento. Esses danos devem ser reparados por fora, como mostrado no capítulo 10. Mas, na maioria das vezes o equipamento é descartado, porque o reparo fica muito caro.

7 – Reparos urgentes. Alguns danos estruturais podem exigir intervenção imediata. Se o equipamento não puder ser tirado de operação, o reparo deve ser feito sob carga, pelo lado externo. O vazamento deve ser estancado por qualquer meio improvisado no local. Por exemplo, usando massa de resina poliéster ativada para cura extremamente rápida. Ou outra massa qualquer. O importante aqui não é a qualidade da massa, mas estancar o vazamento. O reparo estrutural é executado do lado de fora do laminado danificado, que serve de molde.

Os reparos de emergência feitos em tubos sob carga são executados colocando sobre a área danificada uma sela de compósito com a parte interna coberta com massa de poliéster ativada para cura rápida. Essa sela é comprimida sobre a área danificada e mantida nessa condição por meio de cintas para estancar o vazamento. Em seguida, a sela e o tubo são envolvidos por várias lâminas de mantas e de tecidos impregnadas com resina. Esse tipo de reparo temporário é tão bom que muitas vezes ele passa a ser definitivo.

Se não for possível estancar o vazamento, o equipamento deve ser tirado de carga para a execução dos trabalhos.

8 – Reparo de bocais. Os bocais são particularmente suscetíveis a vazamentos, sendo geralmente reparados pela substituição do item danificado. Os detalhes de instalação do novo bocal estão muito bem apresentados na norma ASME RTP-1, que especifica a espessura e a largura da união e dos revestimentos interno e externo. As prescrições dessa norma devem ser obedecidas para assegurar que o novo bocal tenha desempenho igual ao original.

Muitas vezes o vazamento do bocal é corrigido sem remover o item danificado. Nesses casos, se o bocal danificado tem alinhamento e capacidade estrutural satisfatórias, sendo o problema unicamente vazamento, o reparo pode ser feito inserindo um bocal menor dentro do velho. O item novo deve ter diâmetro externo ligeiramente inferior ao diâmetro interno do original, no qual ele será inserido. A figura 5 mostra essa situação. A operação é executada com o equipamento vazio. O bocal danificado deve estar limpo, seco e com as superfícies de colagem bem lixadas. As faces dos flanges – a externa do flange original e a interna do novo flange – devem ser lixadas antes de receber a massa que cola uma na outra. Essa massa pode ser formulada adicionando 5% de agente tixotrópico (aerosil) na resina, e deve ser ativada para curar na temperatura ambiente. A massa é aplicada com espátula sobre as faces externa do flange original e interna do flange novo.

Em seguida o bocal substituto é inserido no original, apertando os flanges para expremper o excesso de massa. Os dois flanges devem permanecer apertados durante a cura da massa de colagem. A laminação do novo bocal no lado interno do tanque é feita como mostrado na figura 5. Devem ser usadas pelo menos 2 mantas M450, 1 véu de superfície e o topcoat parafinado. A resina usada no topcoat deve ser parafinada, porque cura exposta ao ar. Os grampos de aperto podem ser removidos logo que a resina completar o ciclo de cura. O excesso de massa é eliminado e o novo flange é furado conforme o original.

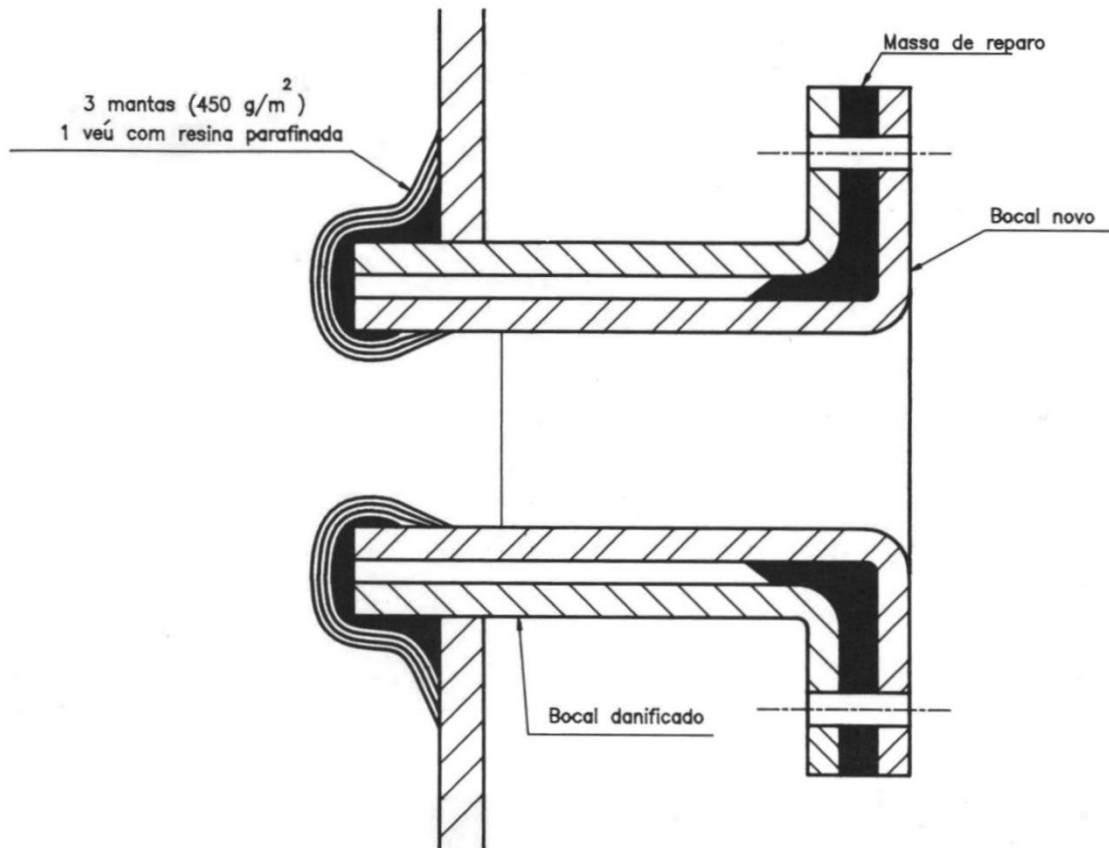


Figura 3.5
Inserção de bocal menor, para eliminar vazamento em bocais danificados.

9 - Reparo de tubos. A restauração estrutural de tubos pode ser feita cortando e substituindo a parte danificada, como mostra a figura 6. O novo segmento de tubo é unido ao original por união laminada. Esse tipo de reparo deve ser feito com a linha fora de carga. O protocolo de execução da união laminada é descrito em detalhes no livro “Tubulações de Compósitos”.

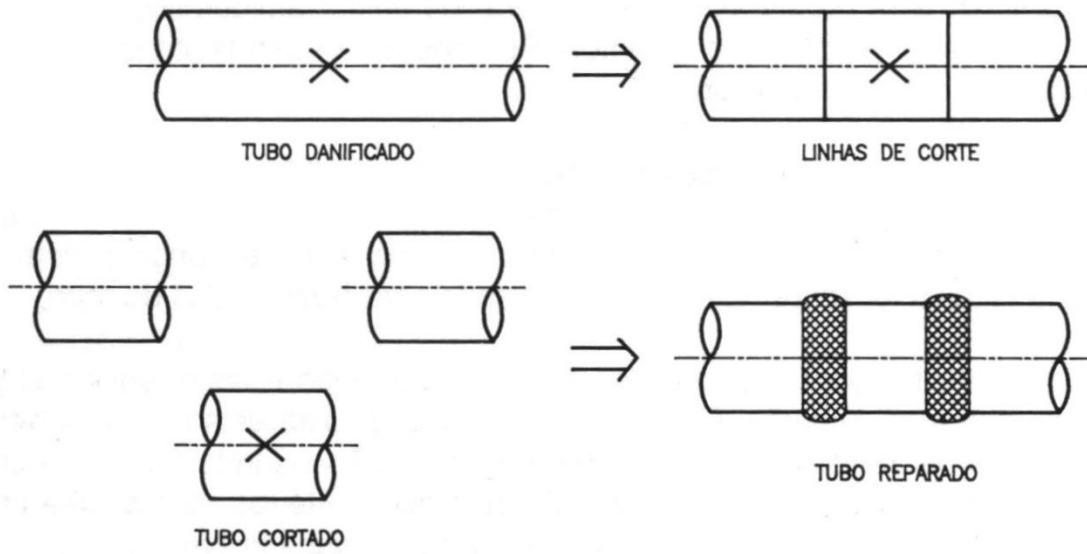


Figura 6

Reparo de tubos com danos localizados. O reparo é feito cortando e eliminando a parte danificada, que é substituída por um segmento novo. As extremidades são ligadas por uniões laminadas.

Capítulo 10

Restauração da vida química

1 - Introdução. Este capítulo trata da restauração da vida química de equipamentos envelhecidos em uso. A intensidade do envelhecimento depende de vários fatores, como temperatura, concentração e reatividade do produto agressor e outros.

- *Os produtos de baixa agressividade causam pouco dano, mas penetram fundo nos laminados. A pequena deterioração é compensada pela alta difusão das moléculas agressivas, que eventualmente saturam a parede do equipamento. Os produtos pouco agressivos produzem ataque moderado e profundo*
- *Os produtos de alta agressividade, ao contrário, causam muito dano, mas penetram lentamente nos laminados. Esses produtos causam ataque intenso e pouco profundo.*

É óbvio que a profundidade penetrada e a intensidade do ataque dependem do tempo de exposição. Para igual tempo de exposição, temos duas situações de deterioração química. Uma envolvendo ataque moderado e profundo. Outra envolvendo ataque intenso ao material próximo à superfície. De qualquer maneira, os produtos químicos sempre penetram e danificam a resina e as fibras do laminado penetrado. A vida química residual do equipamento é estimada medindo a intensidade do ataque em duas ocasiões distintas, como descrito com detalhes no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites”, e resumidamente no capítulo 16 deste livro.

Nota: A justificativa para a excepcional durabilidade química dos compósitos em ambientes agressivos resulta do efeito escudo, que reduz as altas concentrações dos produtos agressivos nas soluções externas a concentrações baixas no interior dos laminados. Por exemplo, a concentração de 20% em uma solução externa pode ser reduzida a apenas 1,0% no interior do laminado. A longa vida química dos equipamentos de compósitos resulta do efeito escudo.

A adequação dos compósitos aos ambientes agressivos é testada e informada pelos fabricantes das resinas. Assim, os fabricantes recomendam suas resinas para uso apenas naqueles ambientes em que a deterioração é pequena, seja porque a velocidade de penetração é lenta, ou porque o ataque é moderado. A vida química dos equipamentos de compósitos usados comercialmente é muito longa, requerendo pouca manutenção.

2 – Manutenção de equipamentos usados. Existe no presente momento um consenso sólido entre os especialistas, favorável à intervenção interna em equipamentos deteriorados por ataque químico. Essa intervenção interna consiste em eliminar e substituir o liner, a barreira de corrosão e parte da estrutura deteriorada. Se essa intervenção for executada nos tempos certos, o produto agressivo não atinge a maioria das lâminas estruturais, tornando a vida química dos equipamentos praticamente infinita. Essa intervenção interna é difícil e onerosa, sendo feita muito raramente. Os equipamentos sem essa intervenção sofrem deterioração progressiva e têm vida química limitada.

Estou propondo neste livro (escrevo em agosto de 2025) que nenhuma intervenção interna seja feita em equipamentos envelhecidos. A barreira de corrosão deve ser mantida intocada durante toda a vida do equipamento. Todas intervenções no costado devem ser feitas do lado externo, sem perturbar o laminado interno ou a barreira de corrosão. As justificativas que tenho para isso são:

- *O material interno não removido assegura a manutenção integral do muito importante efeito escudo, essencial para a durabilidade química do equipamento.*
- *A restauração do costado feita por laminação externa dispensa lixamentos e laminações internas em ambientes confinados.*
- *A contaminação química dos equipamentos dificulta a aderência de reparos internos.*

Vamos citar um exemplo dramático, para fixar as ideias. É sabido que o liner pode trincar em contato com produtos químicos muito agressivos. Essas trincas, causadas por strain-corrosion da resina, podem ser evitadas usando a tecnologia “split-liner” discutida no capítulo 3 deste livro. A tecnologia split-liner elimina o problema de trincas em liners de equipamentos de compósitos.

Exemplo 1. Suponha um tanque de compósito usado para armazenar solução ácida a 110°C. Essa temperatura é muito alta, acima da aceita pelas resinas vinil éster de bisfenol A, como a DK 411. A resina recomendada para essa aplicação é a DK 470 com tecnologia split-liner. Porém, vamos supor que o fabricante não tenha usado a tecnologia split-liner nessa aplicação.

Essa omissão resulta em trincas generalizadas no liner. A resina DK 470 tem alto HDT, sendo excelente para uso em altas temperaturas, mas por ser rígida ela pode trincar em ambientes ácidos a 110°C. Por isso, em aplicações como essa, ela deve ser usada com a tecnologia split liner. Mas isso não foi feito, e o liner trincou.

Em minha opinião o reparo não deve ser feito. O tanque, com o liner destruído, deve ser mantido em uso até o final de sua vida química.

3 – Reabilitação estrutural do costado. A vida química dos equipamentos pode ser estendida reabilitando estruturalmente o laminado danificado em uso. Minha recomendação é que essa reabilitação seja feita do lado externo do equipamento. Os liners e as barreiras de corrosão não devem ser restaurados, deixando o ambiente agressivo penetrar nas lâminas estruturais do equipamento. As lâminas estruturais penetradas e atacadas perdem rigidez, o que produz um lento e gradual aumento no alongamento. O equipamento falha quando o alongamento se torna igual ao umbral de infiltração. A vida química dos equipamentos termina quando o alongamento iguala o umbral de infiltração.

A reabilitação estrutural do costado de tanques (ou tubos) nessa condição deve ser feita do lado externo, para restaurar a rigidez perdida em uso. A reabilitação externa tem as seguintes vantagens sobre a tradicional laminação interna:

- *Dispensa o teste de aderência*
- *Dispensa a remoção do material degradado*
- *Evita trabalho em espaço confinado.*

O material penetrado e degradado (em alguns casos, toda a espessura do costado) é mantido intocado, para funcionar como escudo e retardar a deterioração.

Exemplo 2. Calcular a espessura do reparo estrutural externo para reabilitar um tanque vertical cilíndrico de fundo plano.

São dados:

$E_r = 123\ 000\text{ kg/cm}^2$ (Módulo dos pares MT do laminado de reparo)

$H = 8\text{ m}$ é a altura do tanque

$D = 3\text{ m}$ é o diâmetro do tanque

$\gamma = 1,1\text{ g/cm}^3$

$T_i = 0,50\%$ é o umbral de infiltração para resina DK 411

$CS = 2$ é o coeficiente de segurança

O reparo é feito com resina Derakane DK 411 e pares MT de espessura 1,9 mm por par e módulo $E_r = 123\ 000\text{ kg/cm}^2$

A espessura do reparo será calculada supondo que o equipamento tenha atingido em uso o umbral de infiltração. O módulo residual do equipamento será ignorado.

A espessura do reparo externo é calculada pela equação

$$t_r = \frac{0,1 \times \gamma \times H \times D}{2 \times E_r \times T_i / CS}$$

Onde $CS = 2$ é o coeficiente de segurança e $T_i = 0,005$ é o umbral de infiltração para resina DK 411

$$t_r = \frac{0,1 \times 1,1 \times 8 \times 3000}{2 \times 123\ 000 \times 0,005 / 2} = 4,29\text{ mm}$$

Essa espessura pode ser obtida com o laminado seguinte

MTMTM

Esse laminado tem 4,8 mm de espessura. A reabilitação estrutural deve ser feita por fora, no costado do equipamento. A reabilitação estrutural é feita com pares MT laminados externamente. A espessura do reparo é determinada para manter o alongamento acima do umbral de infiltração.

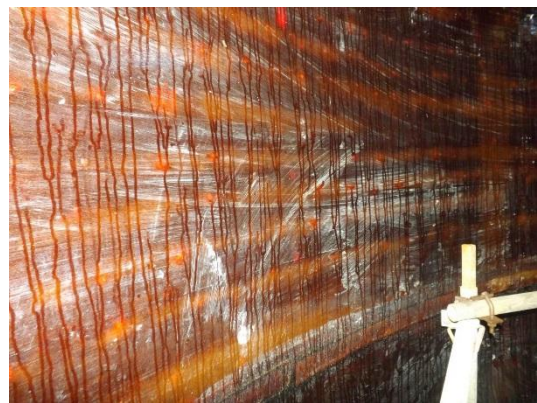
4 – É impossível laminar o lado externo de fundos. Não temos acesso à superfície externa de fundos planos, apoiados em bases de concreto, o que nos impede de restaurar sua rigidez fazendo laminação por fora. Porém, os fundos planos de tanques verticais transferem o peso do fluido armazenado diretamente para as bases, sem sofrer esforço de tração. Assim, os fundos planos integralmente apoiados não sofrem alongamentos e nunca atingem o umbral de infiltração. Nossa recomendação é que os fundos não sejam reforçados, nem por dentro e nem por fora.

Esse assunto é descrito brevemente no capítulo 16 deste livro e em detalhe no capítulo 10 do livro “Durability of Industrial Composites”.

Apêndice

1 – Introdução. Este apêndice descreve o método clássico para fazer a reabilitação interna de equipamentos. Eu não advogo este método. Em minha opinião as intervenções devem ser feitas unicamente no lado externo dos equipamentos.

A inspeção visual interna é feita com lanternas e ferramentas simples, como estiletes e espátulas, para arranhar a superfície e melhor avaliar sua integridade. A aparência do liner serve de indicador da agressividade do ambiente. Liners com superfícies lisas e brilhantes indicam ambientes benignos que não atacam resinas e, nos casos de revestimento, provavelmente não atacam o substrato. A água é um exemplo de ambiente benigno. A inspeção visual observa principalmente o liner. Para a maioria dos inspetores, a destruição do liner parece assustadora, dando a impressão de falha iminente. De fato, isso não é assim. A destruição do liner não implica em risco iminente de falha. Se, porém, a inspeção visual indicar que o ambiente agressivo invadiu a barreira de corrosão, o dano deve ser avaliado medindo a profundidade penetrada. A medição da profundidade penetrada (teste de aderência) é importante para assegurar a colagem do laminado interno no substrato contaminado.



Vista interna de tanque após 21 anos de contato permanente com ácido clorídrico. A foto na esquerda mostra bolhas osmóticas causadas pelo ataque do ácido às fibras de vidro. A foto na direita mostra a mesma superfície após remoção do liner e das bolhas. Observe as linhas verticais indicativas de escoamento do ácido retido na barreira de corrosão e no laminado estrutural. Fotos cedidas pela Canexus.



Teste de aderência do reparo. A área lixada (esquerda) mostra exudação de ácido retido no laminado. Essa superfície está contaminada e nenhum reparo adere nela. A foto na direita mostra isso. Observe a total falta de aderência do reparo ao ser separado da superfície contaminada. A vida química residual de equipamentos revestimentos internamente é estimada medindo a espessura penetrada pelo ambiente. A medição da profundidade penetrada é a única maneira de avaliar a vida química residual nesses casos. Fotos cedidas pela Canexus.

2 – Medindo a profundidade penetrada. Existem dois métodos para medir a profundidade penetrada pelos produtos químicos. Um deles consiste em cortar a parede, remover corpos de prova e fazer a medição. Esse método é destrutivo. O outro consiste em escavar e remover o material penetrado até chegar na profundidade sem contaminação.

Esta seção descreve como medir a profundidade penetrada escavando o revestimento. A medição inicia com a escolha dos locais que serão inspecionados. Essa escolha deve focar nos pontos onde o ataque aparenta ser mais intenso. A extensão da área examinada é determinada pelo teste de aderência – descrito mais adiante – e não precisa exceder 25 cm x 25 cm. Ver a figura 1.

Os locais examinados devem ser bem identificados para referência posterior. O revestimento deve ser removido de maneira gradual, 0,5 mm a 1,0 mm por vez. A remoção cessa ao atingir material não contaminado.

A remoção pode ser feita usando talha, alicate, rebolo ou lixadeira rotativa. As lixadeiras rotativas devem ser usadas com cautela, pois podem remover material em excesso, afetando a precisão da medição. Os rebolos parecem ser mais adequados para fazer a remoção. A profundidade a ser removida é definida pelo teste de aderência explicado mais adiante. O procedimento que segue mostra como fazer a remoção com rebolo.

Remoção com rebolo. O Spirit, desenvolvido pelo saudoso Batista da Fibermaq, remove o material contaminado usando rebolo de avanço controlado. A profundidade de corte é regulada e controlada pelo inspetor usando escala graduada em mm. O protocolo de operação é simples:

1. Marcar a área de remoção, de dimensões 25 cm x 25 cm.
2. Remover com rebolo o liner e a barreira de corrosão. A remoção pode ser feita em incrementos de 0,5 mm ou de 1,0 mm. A profundidade de remoção, isto é a profundidade de corte do rebolo, é fixada pelo inspetor no mostrador do equipamento.

3. O rebolo remove o material danificado na profundidade escolhida pelo inspetor. Feito isso, se houver indícios visuais de contaminação, a remoção segue usando o mesmo procedimento, isto é, removendo mais 0,5 mm ou 1,0 mm. Ver as fotos e a figura 2.
4. O processo segue assim até eliminar os vestígios visuais de contaminação. Nesse momento deve ser feito o teste de aderência para confirmar a ausência de contaminação.
5. O teste de aderência é executado arrancando um laminado de teste aplicado no local escavado. A falta de aderência indica presença de contaminação.
6. Se o teste de aderência indicar contaminação, o processo de remoção deve ser retomado.
7. A remoção cessa quando o teste de aderência indicar ausência de contaminação.
8. A profundidade penetrada é lida na escala do aparelho

Essa remoção nos dá duas informações:

- O conhecimento da espessura penetrada nos permite calcular a construção do laminado interno de reparo.
- O teste de aderência nos informa, com algum grau de desconfiança, que o revestimento vai aderir no substrato.

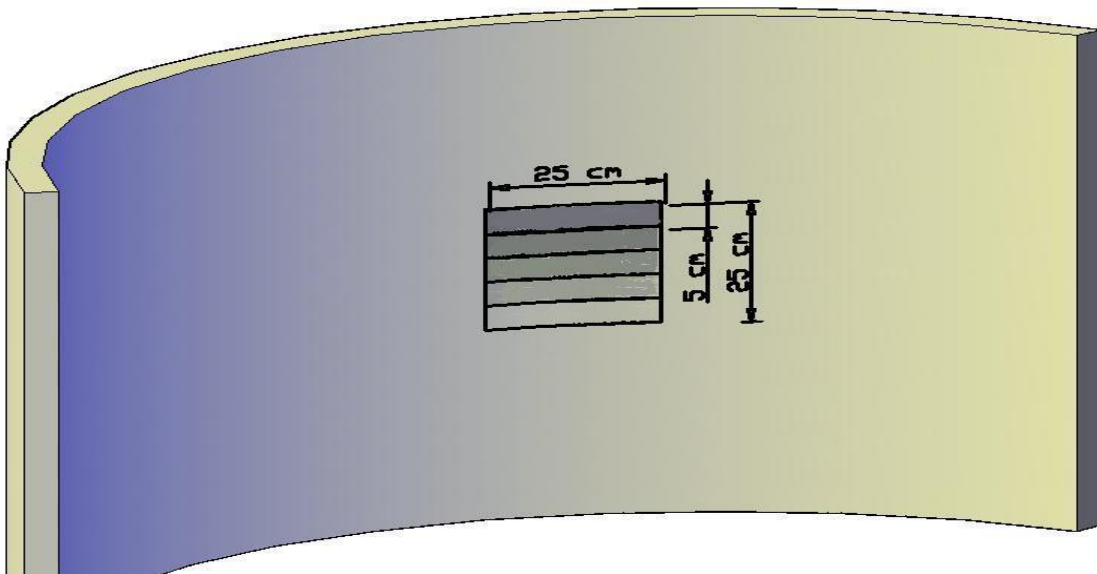


Figura 1

Mostra a área de teste, de 25 cm x 25 cm, e as faixas onde serão feitas a remoção pela passagem do rebolo. O rebolo, nesse caso corta faixas de largura 5 cm. As profundidades da remoção são mostradas na figura 2 para incrementos de 1,0 mm.

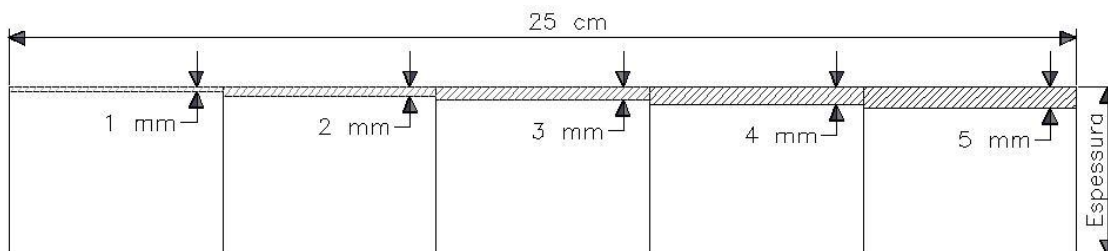
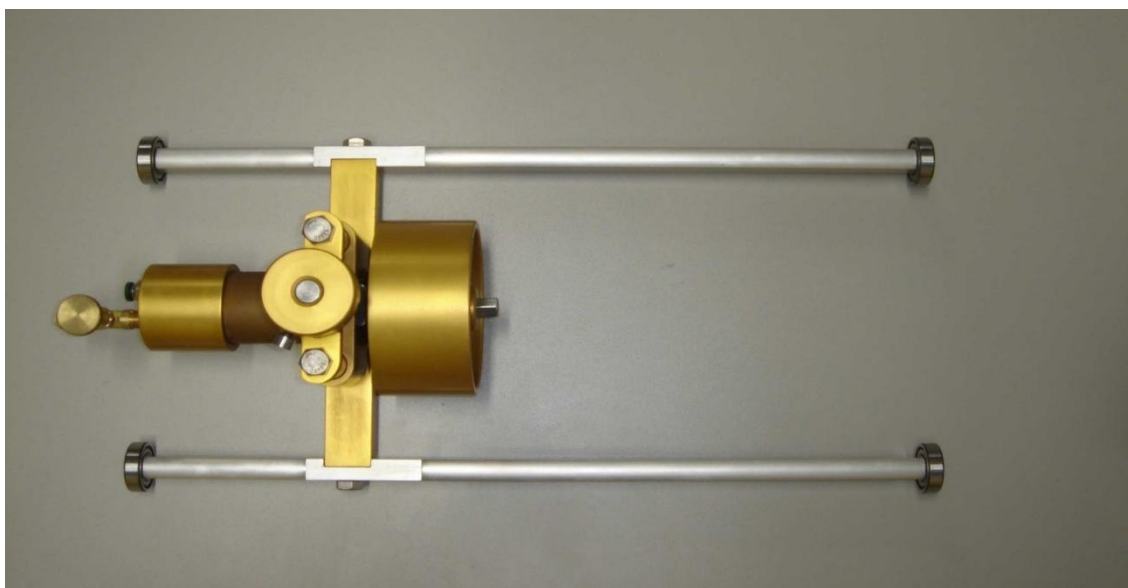
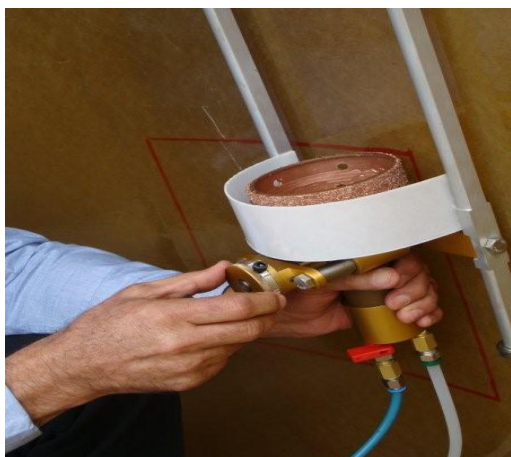


Figura 2

Mostra a vista lateral, em corte, da área de teste. Observe a remoção do material danificado feita em incrementos de 1,0 mm e em faixas de 5 cm. A primeira passada remove 1,0 mm da espessura. A segunda passada remove mais 1,0 mm, e assim sucessivamente até o teste de aderência indicar que a espessura penetrada foi totalmente removida.



Este é o Spirit. Ele desliza sobre rodas para cobrir a área de remoção. O rebolo é acionado por motor pneumático e a profundidade de remoção é ajustada pelo inspetor. Foto cedida pela Fibermaq.



A foto na esquerda mostra o saudoso Batista fazendo ajuste da profundidade de remoção. A foto na direita mostra o processo de remoção. Fotos cedidas pela Fibermaq.



A foto na esquerda mostra o processo de remoção da barreira de corrosão. A da direita mostra a faixa de inspeção após a remoção de 1,0 mm na espessura. Fotos cedidas pela Fibermaq.

Remoção com alicate e entalhadeira. A remoção tem início cortando a área demarcada em retângulos de pequenas dimensões. Os retângulos recortados são removidos com entalhadeira, martelo e alicate. A diferença entre esse processo e o anterior é que o Spirit permite ajustar a profundidade de corte.



Remoção com entalhadeira e alicate. Nesse caso o laminado é cortado com broca de copo. Fotos cedidas pela Jatfibra.



A entalhadeira remove o material cortado pela broca de copo. A remoção das partes soltas é feita com alicate. Foto cedida pela Jatfibra.

Teste de aderência. O teste de aderência é feito por dentro do equipamento, após remoção do material penetrado e deteriorado. Esse teste, em tese, assegura que nenhum reparo seja aplicado sobre superfície contaminada por produtos químicos. O laminado interno deve ser aplicado sobre material não contaminado, após o teste de aderência.

O teste de aderência é feito arrancando um laminado de fibras picadas, de dimensões 15 cm x 15 cm x 6 mm aplicado sobre a área preparada. O laminado de teste é aplicado em várias profundidades, até satisfazer o teste de aderência. A avaliação é feita arrancando o laminado de teste. Havendo contaminação, as superfícies separam com facilidade e sem esgarçar fibras. Isso indica que a penetração do produto agressivo foi maior que a espessura removida e que a remoção deve continuar. A remoção cessa quando as superfícies separadas apresentarem fibras esgarçadas. Este teste não é quantitativo e depende da interpretação do inspetor.

O laminado de teste tem dimensões 15 cm x 15 cm x 6 mm, sendo feito com 6 lâminas de mantas M450. Essa construção assegura resistência e rigidez suficientes para forçar o descascamento na superfície de colagem. Uma das bordas do laminado de teste é deixada “livre”, sem aderir ao substrato, para servir de “agarre” para o puxamento. Os laminados de teste devem estar bem curados antes de ser arrancados.

A qualidade da aderência é decidida observando as superfícies descascadas. Se a aderência for boa, o laminado de teste deixa fibras no substrato. Se ela for inadequada, ele descola sem esgarçar fibras. Muitas vezes é necessário aceitar resultados de aderência aquém dos desejados, mas nenhum revestimento ou laminado deve ser feito sobre substratos contaminados que não tenham pelo menos algumas fibras esgarçadas nas superfícies descascadas.

Apêndice

Restauração de revestimentos em substratos de aço.

Este apêndice descreve o procedimento para substituir revestimentos em substratos de aço. Os revestimentos velhos devem ser totalmente removidos, de modo que não se faz o teste de aderência.

Se os ambientes forem pouco agressivos ao aço, o efeito escudo deve ser suficiente para proteger o equipamento após penetração plena e total saturação do revestimento. Nesses casos, a durabilidade do revestimento é extremamente longa e ele talvez nunca seja substituído.

Nos casos envolvendo ambientes muito agressivos ao aço, o efeito escudo pode ser insuficiente para proteger o equipamento. Nesses casos, os revestimentos devem ser substituídos imediatamente após o substrato ter contato com o ambiente agressivo. É prática comum entre os engenheiros de manutenção escavar o revestimento para medir a profundidade penetrada e estimar o tempo para fazer a manutenção definitiva. O problema nesse caso é a perda do efeito escudo no local escavado.

A tabela 1 deixa claro que a inspeção interna de revestimentos pode ser mais complexa que um simples exame visual.

<i>Aparência visual do liner e da barreira de corrosão</i>	<i>Exemplos de ambientes que causam essa aparência.</i>	<i>Expectativa de vida do revestimento.</i>
<i>Superfície lisa e brilhante</i>	<i>Salmoura, soluções salinas em geral.</i>	<i>Muito longa. O ambiente não é agressivo e provavelmente não ataca o substrato</i>
<i>Superfície lisa e brilhante, com pequenas bolhas osmóticas sob o liner</i>	<i>Ámbiente aquoso neutro em altas temperaturas.</i>	<i>Muito longa. O ambiente provavelmente não ataca o substrato</i>
<i>Superfície lisa e brilhante, com grandes bolhas osmóticas sob o liner. Possível presença de trincas no liner.</i>	<i>Ámbiente aquoso neutro em altas temperaturas. As grandes bolhas osmóticas são causadas por impurezas na resina.</i>	<i>Muito longa. As trincas do liner não penetram no revestimento. Bolhas osmóticas não colocam o revestimento em risco.</i>
<i>Superfície fosca com ataque intenso no liner. Liner trincado.</i>	<i>Ambiente oxidante agressivo. Considere o uso da tecnologia split liner.</i>	<i>Limitada. O ambiente pode atacar o substrato. A durabilidade do revestimento é igual ao tempo para o ambiente atingir o substrato.</i>
<i>Liner destruído. Evidência de bolhas e de delaminação na primeira lâmina da barreira de corrosão. Ataque à barreira de corrosão.</i>	<i>Ambientes ácidos com alto poder de penetração. As bolhas osmóticas e as delaminações resultam de ataque do ácido às fibras.</i>	<i>Idem acima. A durabilidade pode ser estimada medindo a profundidade penetrada.</i>
<i>Liner destruído. Ataque intenso à barreira de corrosão.</i>	<i>Ambientes oxidantes de alta agressividade, como cloro, dióxido de cloro, etc. Considere o uso da tecnologia dual split liner.</i>	<i>Idem acima.</i>

Tabela 1

Efeito do ambiente na aparência e na expectativa de vida de revestimentos. O efeito escudo permite a penetração plena de ambientes pouco agressivos no revestimento. Nos ambientes muito agressivos, porém, o efeito escudo pode ser insuficiente e a vida do revestimento é medida pelo tempo de penetração.

1 - Jateamento. O jateamento abrasivo é feito com material inerte – óxido alumínio ou abrasivos sinterizados – para remover a parte solta da superfície deteriorada.

2 - Lixamento. A remoção do material penetrado é feita com rebolos e lixas de malha grossa (# 16 a # 24).

3 - Limpeza da superfície. Os resíduos particulados devem ser eliminados com escovas de nylon e/ou com aspirador de pó.

4 - Teste de aderência. O teste de aderência não é feito, porque o revestimento antigo é totalmente removido.

5 - Primer. O primer promove a aderência do reparo ao laminado estrutural. Ele pode ser de resina poliéster, vinil éster, epóxi ou poliuretano.

6 - Base. A base é uma massa aplicada com desempenadeira, feita misturando 4 partes de sílica com 1 parte de resina. Ela serve para arredondar cantos e nivelar irregularidades no costado. A presença da base facilita a laminação do reparo.

7 - Laminação. São aplicados tantas mantas quanto necessárias. A primeira manta não deve ser aplicada antes de a base curar até o ponto de toque, nem depois dela curar plenamente. A espera pelo ponto de toque evita que a pressão dos roletes de compactação afete a espessura da base. E a laminação antes da cura plena melhora a aderência. As mantas devem superpor pelo menos 50 mm nas emendas. Se o revestimento for aplicado em substratos horizontais e não existir possibilidade de escorrimento da resina, a segunda manta pode ser aplicada imediatamente sobre a primeira, sem esperar pelo tempo de gel. A barreira de corrosão deve ter pelo menos duas mantas M450 impregnadas com resina. Cada manta M450 acrescenta 1,05 mm à espessura do revestimento.

Nota: Se o ambiente for muito agressivo, a espessura do laminado pode ser aumentada. Por exemplo, para ácido clorídrico concentrado recomendamos usar pelo menos quatro lâminas de manta M450.

8 - Liner. O liner é feito com véu de superfície. Como opção, ele pode ser feito com resina e escamas de vidro aplicadas com rolo de pintura. Os liners feitos com escamas de vidro devem ser aplicados em camadas finas para deitar as escamas que devem ficar paralelas ao substrato. Para controlar a aplicação, as lâminas de escamas devem ter cores diferentes.

9 - Topcoat. O topcoat de resina parafinada é aplicado sobre o liner. A parafina assegura cura plena da resina exposta ao ar.

10 - Pós cura. A pós cura aumenta o grau de interligação e reduz a permeabilidade da resina. Ela alonga significativamente a vida química do revestimento. A pós-cura deve ser feita com ar quente.

11 - Inspeção. A inspeção do revestimento é feita da mesma maneira que a de equipamentos recém-fabricados. Os testes de termografia, vareta de deslizamento, percussão, etc, servem para indicar a ausência de falhas de laminação. A cura da resina pode ser avaliada pelo ensaio de DSC ou pela dureza Barcol. A inibição da cura pode ser avaliada pelo teste de acetona.

A sensibilidade à acetona é um método simples para determinar se a cura do topcoat foi inibida. Em essência, esse teste consiste em esfregar a superfície com algodão embebido em acetona. Consideramos que a cura foi inibida se a resina esfregada com acetona ficar ligeiramente pegajosa. Esse problema pode ser corrigido aplicando mais um topcoat, dessa vez usando resina parafinada.

A dureza Barcol serve para avaliar o grau de interligação da resina. Os revestimentos sem pós-cura têm dureza Barcol mais baixas que as das barreiras de corrosão de equipamentos. Isso acontece porque o pico exotérmico na cura de revestimentos é mais baixo que o que ocorre na cura de equipamentos. Essa diferença deixa de existir quando é feita pós-cura.

CAPÍTULO 11

Transporte, manuseio e instalação de tanques

1 – Introdução. Os tanques de compósitos são transportados, manuseados e instalados da mesma maneira que os de aço. Os protocolos são praticamente iguais nos dois casos, derivando de regras ditadas pelo bom senso. Este capítulo faz uma breve descrição dessas regras e protocolos.

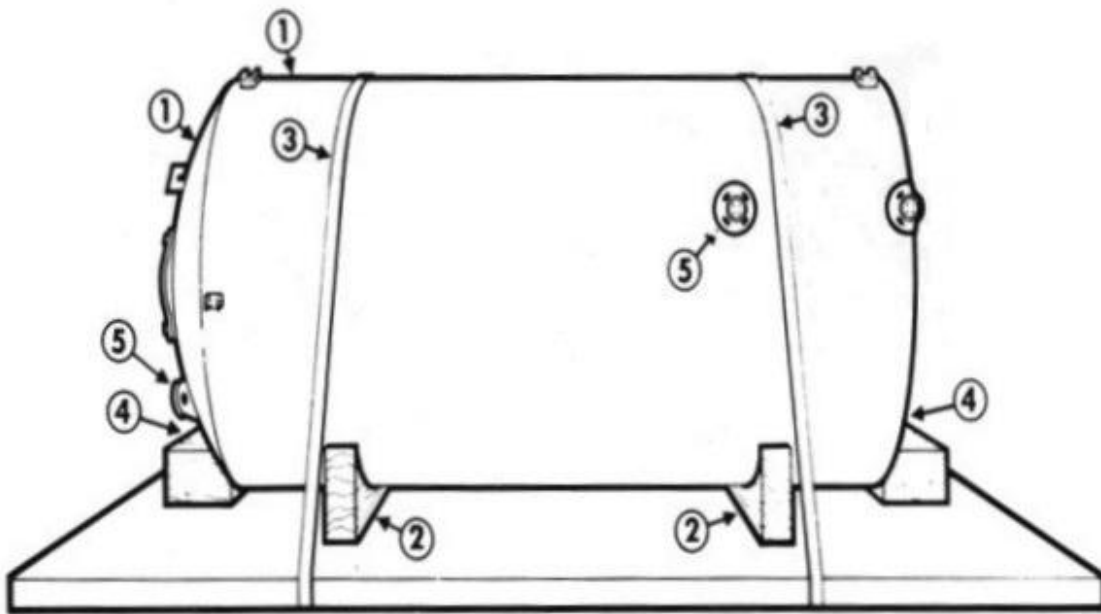
2 – Carregamento e transporte. O carregamento dos tanques no veículo transportador é responsabilidade do fabricante, que deve observar os pontos seguintes:

- *Os berços devem ser firmemente fixados à carroceria e forrados com material macio, para não machucar a superfície externa do equipamento durante o transporte.*
- *Nenhuma parte do equipamento, incluindo as conexões, deve distar menos que 5 cm do assoalho ou das paredes laterais do veículo.*
- *A amarração deve ser firme e segura, para não afrouxar durante o transporte. De preferência a amarração deve ser feita com cintas ou cabos de aço. Os cabos de aço devem ser usados com interposição de material macio, como feltro, para não machucar a superfície do equipamento.*
- *Os equipamentos devem ser calçados em suas extremidades para não deslizar sobre os berços em acelerações ou freadas bruscas.*
- *Quando dois ou mais tanques forem carregados no mesmo veículo, a distância entre eles (incluindo as conexões) nunca deve ser inferior a 5 cm. Se isso não for possível, os equipamentos podem encostar uns nos outros, desde que entre eles seja colocada uma proteção de material macio.*
- *Os tanques cilíndricos e sem tampa, assim como dutos ou tubos de grandes diâmetros, devem ser enrijecidos com cruzetas ou anéis de madeira nas extremidades abertas. Essas cruzetas e esses anéis impedem a ovalização das extremidades abertas durante o transporte e o manuseio.*
- *Os tanques não devem ser transportados ou estocados completamente fechados. Um pequeno orifício (respiro) deve ser deixado aberto para permitir a entrada e a saída de ar.*
- *Os tanques pequenos normalmente são transportados em pé e paletizados para maior proteção.*

3 – Descarga e manuseio. Ao chegar no destino, antes da descarga, o comprador deve observar se o equipamento sofreu danos no transporte. Para isso, ele deve examinar os locais mais vulneráveis, mostrados na figura 1. Terminada essa inspeção, o comprador autoriza o descarregamento. Os tanques de compósitos, da mesma maneira que os de aço, devem ser descarregados e manuseados com cautela para evitar cargas concentradas e

impactos. Os tanques de aço podem amassar quando impactados. Os de compósitos podem trincar. Por exemplo:

- Os tanques não devem ser rolados ou arrastados.
- Os tanques não podem sofrer quedas ou impactos.
- A descarga e o manuseio devem ser feitos com cuidado para evitar deformações excessivas. O liner dos tanques de compósito é frágil e pode trincar quando deformado em excesso.
- Os equipamentos devem ser amarrados com firmeza
- Os equipamentos devem ser guiados para não impactar outras estruturas
- Deve ser interposto um forro de material macio (feltro, borracha, espuma flexível) entre o equipamento e qualquer estrutura rígida na qual ele se apoie, como garfos de empilhadeira, cabos de aço ou correntes. Esse cuidado é necessário para proteger a superfície externa contra arranhões.
- Cuidados especiais devem ser tomados para evitar a ocorrência de impactos ou de arranhões nas conexões, especialmente nos flanges.



- 1 - As partes extremas, mais altas ou mais largas, estão sujeitas a sofrer esbarros e raspões em trânsito.
- 2 - Pontos de apoio sobre os berços, observando a presença de arranhões, trincas ou sinais de movimentação do tanque em relação aos apoios.
- 3 - Pontos de contato com as cordas de amarração.
- 4 - Pontos de contato com os calços das extremidades.
- 5 - Todas as conexões, como bocais de entrada e saída, respiros, boca de inspeção.
- 6 - Todas as áreas de contato com estruturas metálicas ou de madeira, como as cruzetas colocadas nas extremidades dos tanques para manter seu formato cilíndrico.

Figura 1

Os pontos assinalados devem ser inspecionados antes de iniciar o descarregamento

Os tanques de compósitos em geral têm apenas 1/3 do peso dos equivalentes feitos de aço, podendo ser descarregados e manuseados com equipamentos leves. Muitas vezes eles são descarregados e movimentados com empilhadeiras, tomando cuidado para evitar que os garfos impactem ou arranhem a superfície.

Os tanques pequenos de fundo abaulado ou cônico, fornecidos com os pés de apoio montados na fábrica, devem ser transportados na posição vertical. Esses tanques podem ser arrastados sobre os pés desde que eles sejam soldados à cinta de apoio.



Tanque amarrado sobre carreta, pronto para o transporte.

Os tanques grandes e pesados devem ser içados através dos olhais laminados em sua extremidade superior. Se esses olhais não foram previstos no projeto, o tanque deve ser movimentado usando 2 cintas de nylon com, no mínimo, 7 cm de largura. Essas cintas sustentam o tanque, sendo amarradas às extremidades de barras de aço ou de madeira ligadas ao guindaste. Cordas guias são amarradas nas extremidades do equipamento para que ele possa ser direcionado na posição desejada, sem risco de impactar estruturas próximas.

Os tanques com as extremidades fechadas (tampa e fundo) devem ser equipados com olhais de içamento, pelo menos dois, em sua parte superior. Os tanques abertos e sem tampa não têm esses olhais e devem ser movimentados com as cintas de nylon, conforme descrito. A figura 2 mostra essas situações.

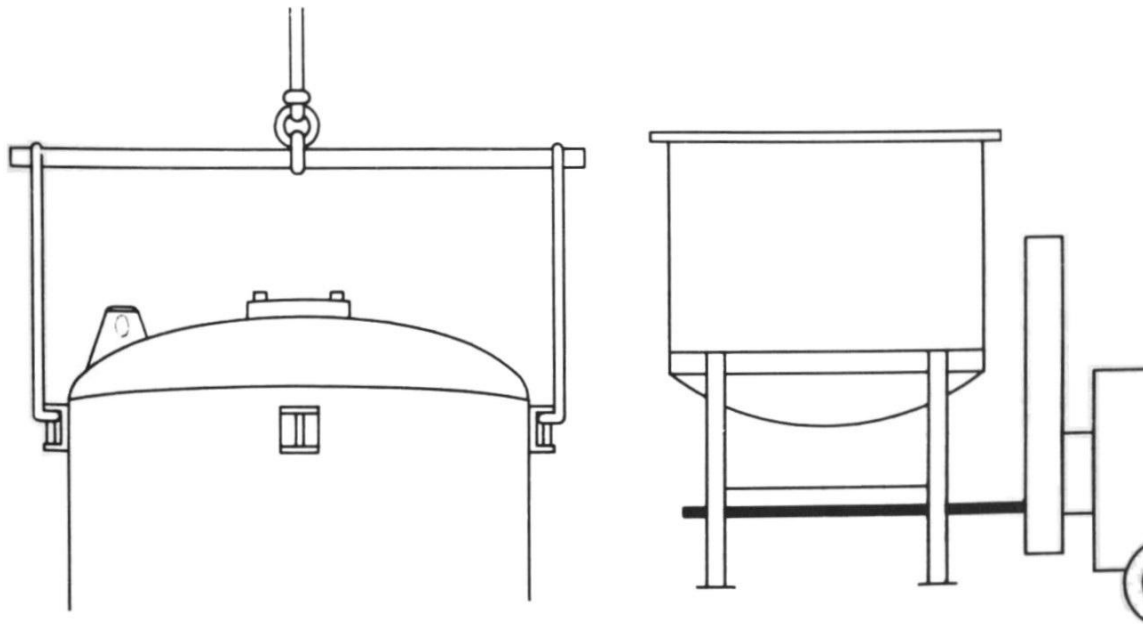


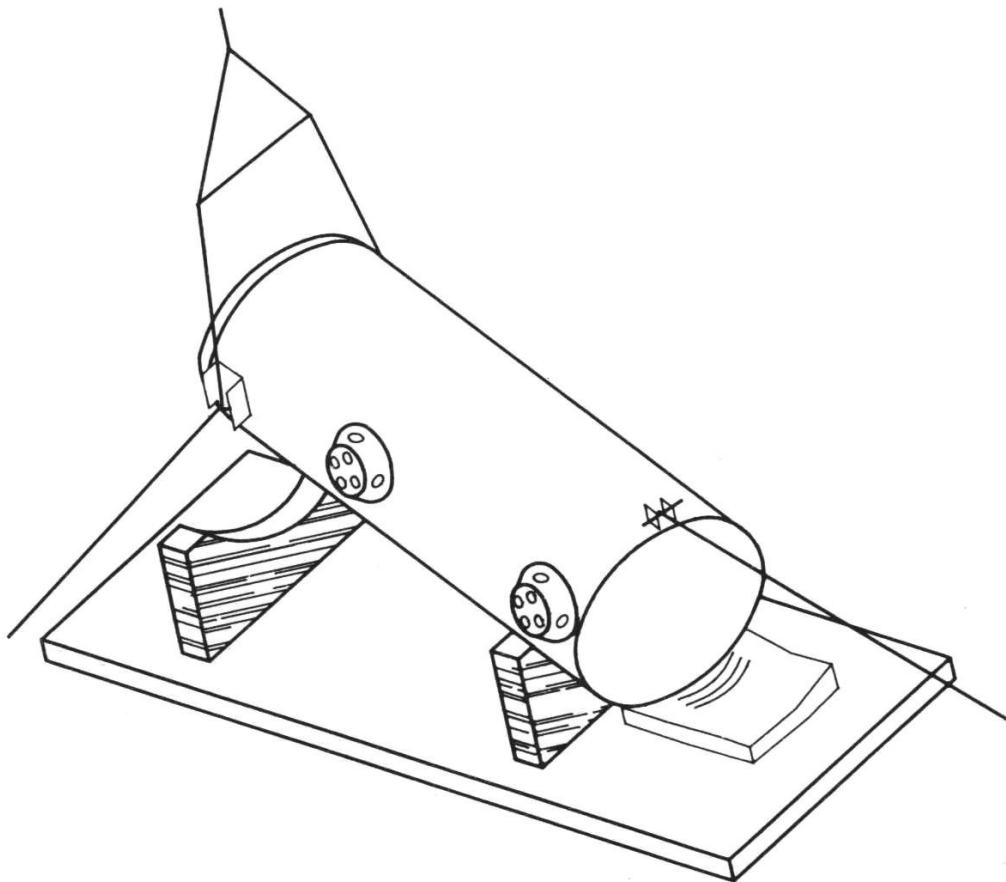
Figura 2
Movimentação de tanques com balancim ou com empilhadeira.

3 - Instalação. Enquanto aguardam instalação definitiva, os tanques devem ficar bem protegidos e apoiados em superfícies firmes e bem niveladas, isenta de protuberâncias que possam arranhar ou exercer pressão localizada em sua superfície. Os tanques não devem apoiar sobre rochas, ferramentas ou qualquer outro objeto rígido pontiagudo. Se estocados fora de galpões, eles devem ser amarrados para não ser arrastados pelo vento. Como opção, os tanques verticais podem ser lastreados com água até 1/3 de suas alturas e não precisam ser amarrados.

Os equipamentos de grandes dimensões, estocados deitados, devem ser colocados em pé para instalação definitiva. Essa verticalização é feita içando a extremidade superior, com o fundo apoiado no piso forrado com material macio. Durante a verticalização o tanque deve ser guiado por cordas amarradas na sua parte inferior. A figura 3 mostra os detalhes.



Verticalização de tanque. Foto cedida pela Tecniplas.



*Figura 3
Verticalização de tanque vertical cilíndrico*

Os tanques verticais de fundo chato são instalados em bases rígidas, em geral de concreto, calculadas para suportar o peso do equipamento cheio. A superfície do concreto

deve ser lisa e nivelada para dar apoio integral e uniforme ao fundo do tanque. Os fundos chatos dos tanques verticais não são rigorosamente planos. Na realidade eles são ligeiramente abaulados para dentro (côncavos) e, para ter apoio uniforme, requerem a forração da base com areia ou mantas de feltro. Algumas vezes essa forração é feita com argamassa.

- *A argamassa pode ser formulada com uma parte de cimento para duas ou três partes de areia fina, com água suficiente para dar uma massa bem fluida. A argamassa é colocada mais alta no centro da base de concreto, onde a concavidade do fundo é mais acentuada. O tanque é então posicionado sobre essa argamassa e girado para os lados para assegurar apoio completo e uniforme.*
- *A forração com mantas de feltro requer a aplicação de várias camadas. A parte central da base, onde é mais acentuada a concavidade do fundo, requer o uso de camadas adicionais, como mostra a figura 4.*
- *A forração com areia é a solução mais usada. A areia deve ser confinada com mureta de contenção construída ao redor do fundo.*

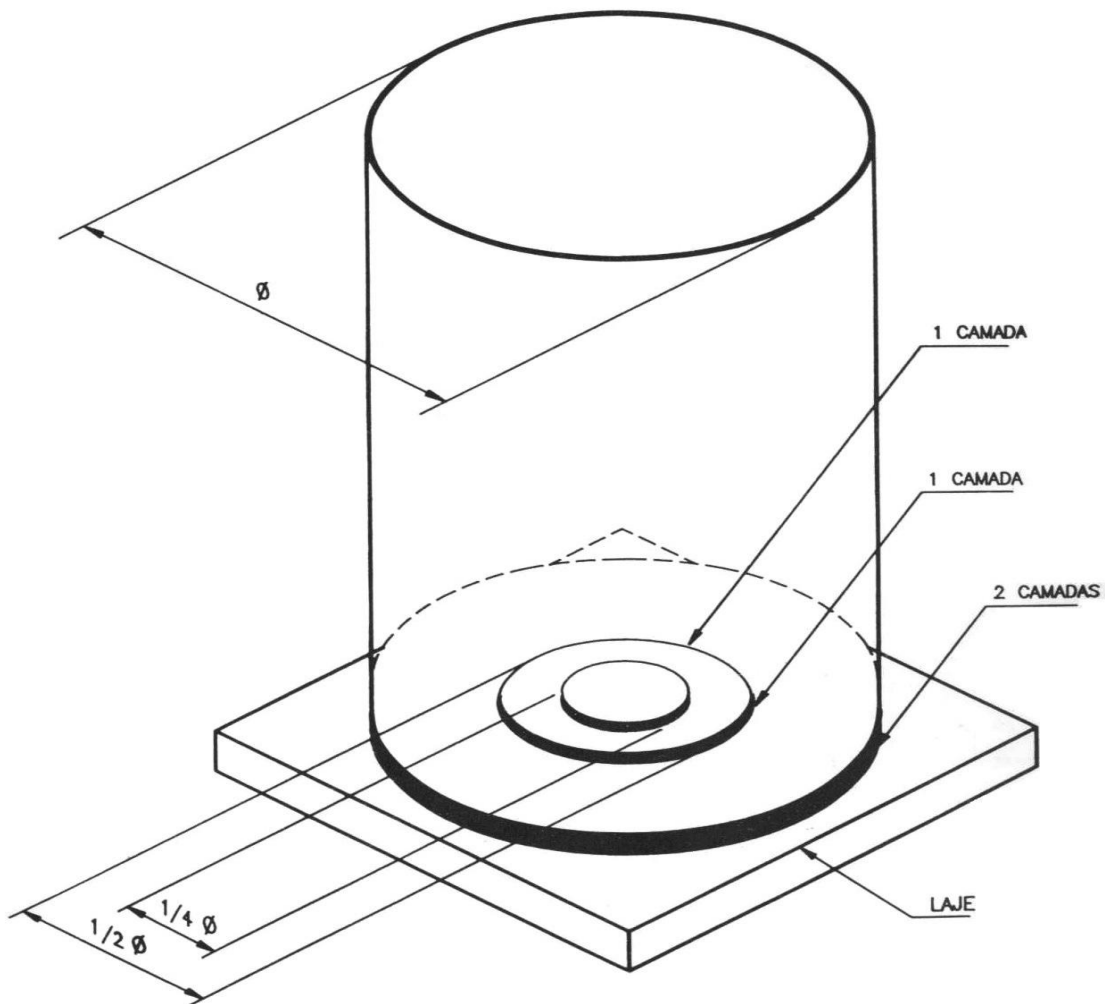


Figura 4

Forração da base de concreto para receber o tanque. A base pode ser forrada com areia, com argamassa ou com várias camadas de feltro, como mostra a figura.

Se necessário, a base de concreto deve ter recesso para acomodar o dreno no fundo do tanque. Esse recesso, cortado ou moldado no concreto, deve ser o menor possível, suficiente para acomodar o dreno sem prejudicar a condição de apoio integral para o fundo do tanque. A figura 5 mostra essa situação.

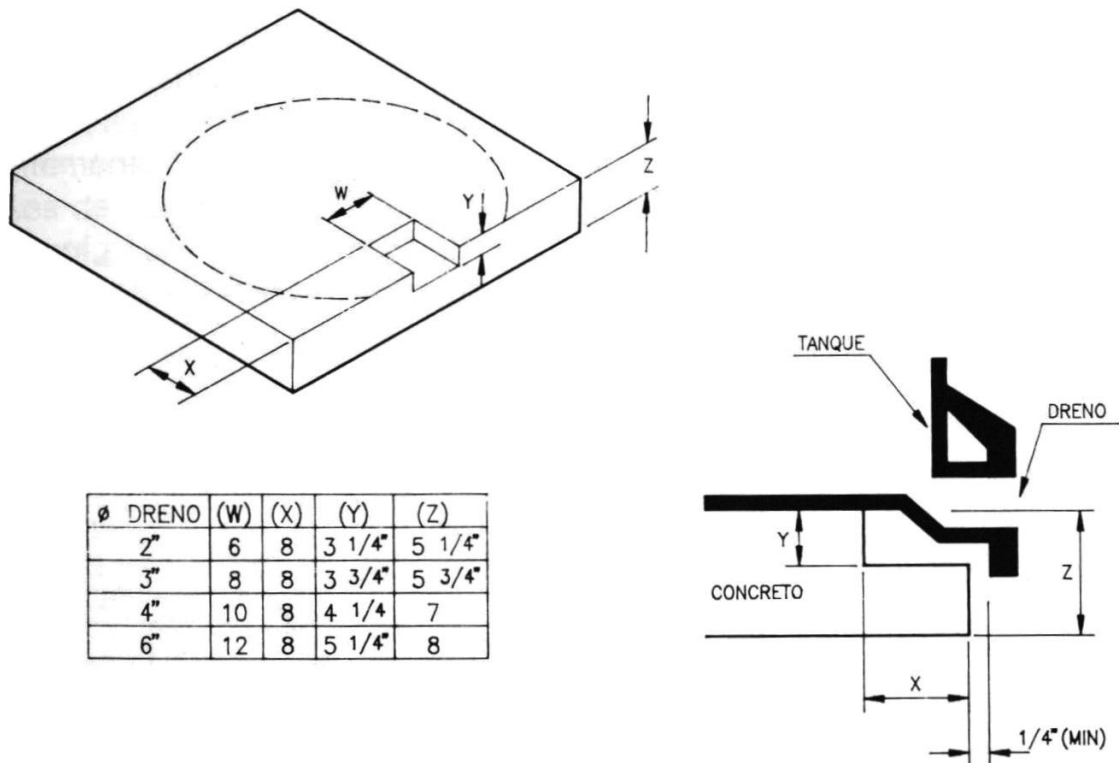


Figura 5

Corte na laje de concreto, para acomodar o dreno

Os tanques instalados ao ar livre, fora de galpões, devem ser ancorados contra forças de vento. Essa ancoragem é necessária também para os tanques de fundo plano que trabalham com pressão interna. A ancoragem é feita com sapatas soldadas no costado, próximas ao fundo. As sapatas de ancoragem devem ficar pelo menos 10 mm mais altas que o fundo do tanque para acomodar eventuais irregularidades na laje de concreto. A figura 6 mostra esse detalhe.

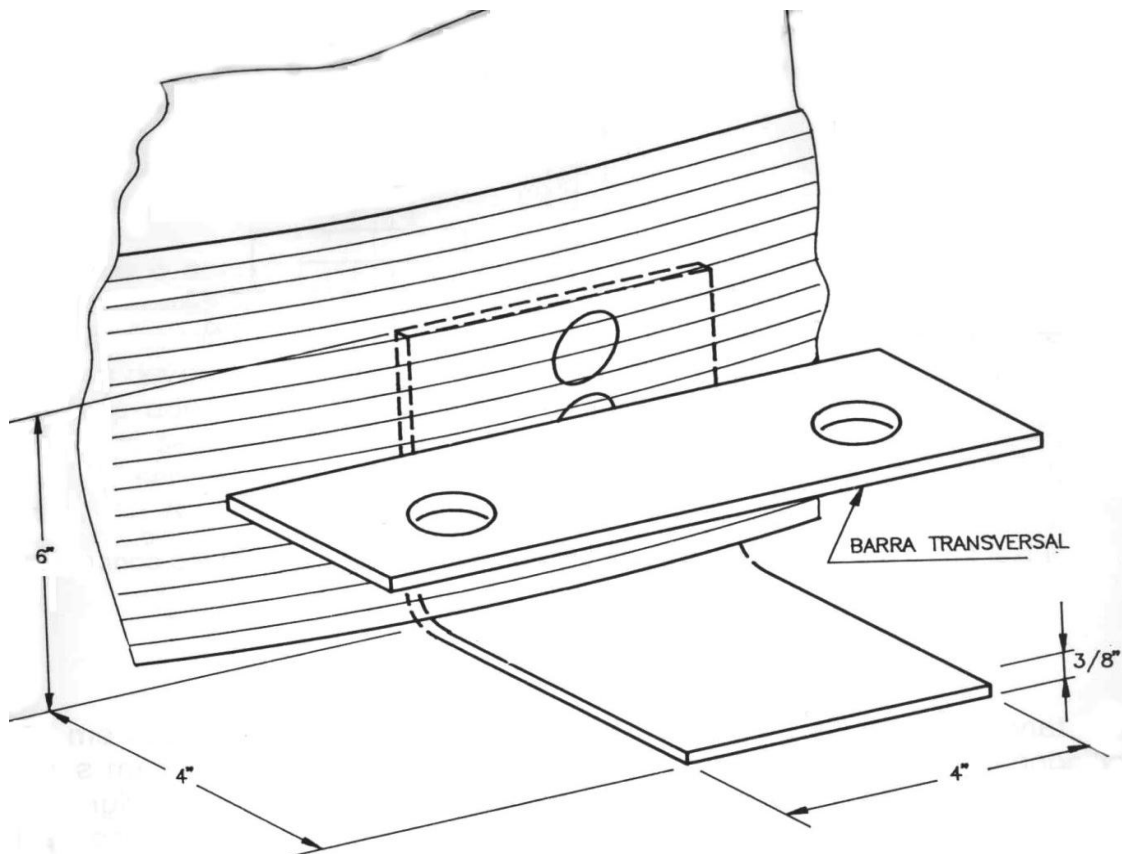


Figura 6
Mostra a sapata de ancoragem embutida no costado do tanque

As sapatas de ancoragem são fixadas na laje com parafusos prisioneiros embutidos no concreto. A posição exata desses parafusos não é conhecida, de modo que a furação da base deve ser feita no campo, no momento da instalação. Como opção, podem ser usados dois parafusos prisioneiros, separados 20 - 25 cm um do outro, para fixar uma barra transversal posicionada sobre as sapatas. Nessa situação, a barra transversal pode ser acomodada sobre os dois parafusos, como mostra a figura 7, dispensando a furação no campo.

Os tanques de compósito dilatam quando colocados em carga. Por isso, os parafusos de fixação devem ser apertados após o enchimento do tanque, para evitar concentração de tensões provenientes dessa dilatação.

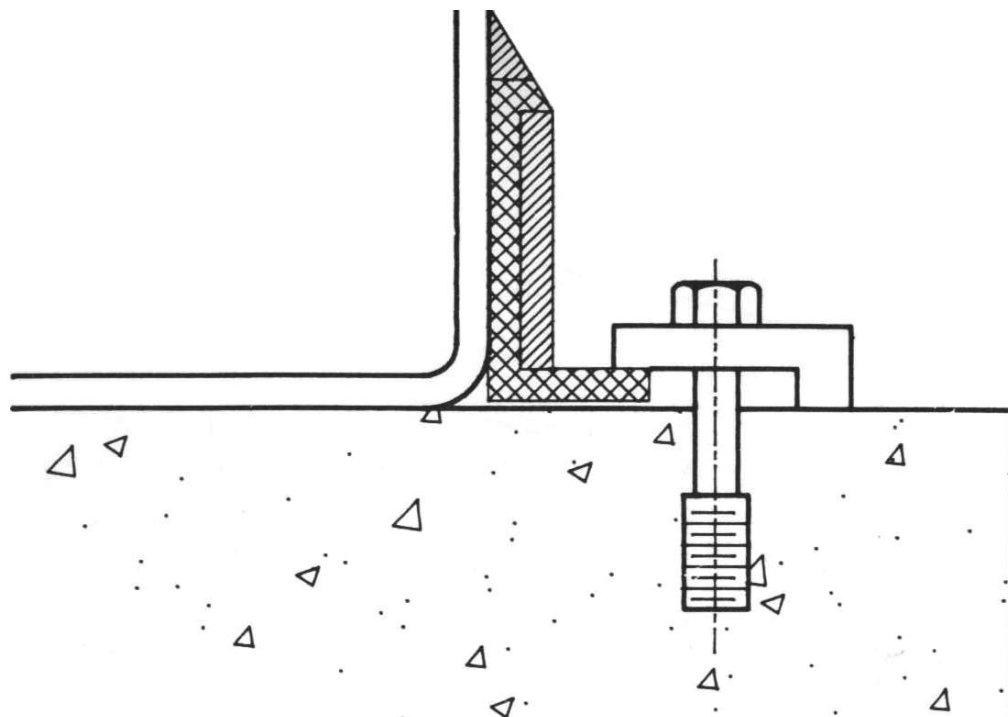


Figura 7

Fixação da sapata aos parafusos embutidos no concreto. O aperto dos parafusos deve ser feito após colocar o tanque em carga.



Laminação de emendas no campo. Foto cedida pela Tecniplás.



Torre de branqueamento de celulose montada no campo. As emendas foram feitas com uniões laminadas, mostradas na cor amarela. Foto cedida pela FGS, divisão NOV.

Os tanques verticais de fundo cônico ou torisférico são apoiados em saias cilíndricas ou em estruturas metálicas, que por sua vez repousam sobre base de concreto. A base de concreto deve suportar o peso do tanque e do seu conteúdo, como mostram as figuras 8 e 9.

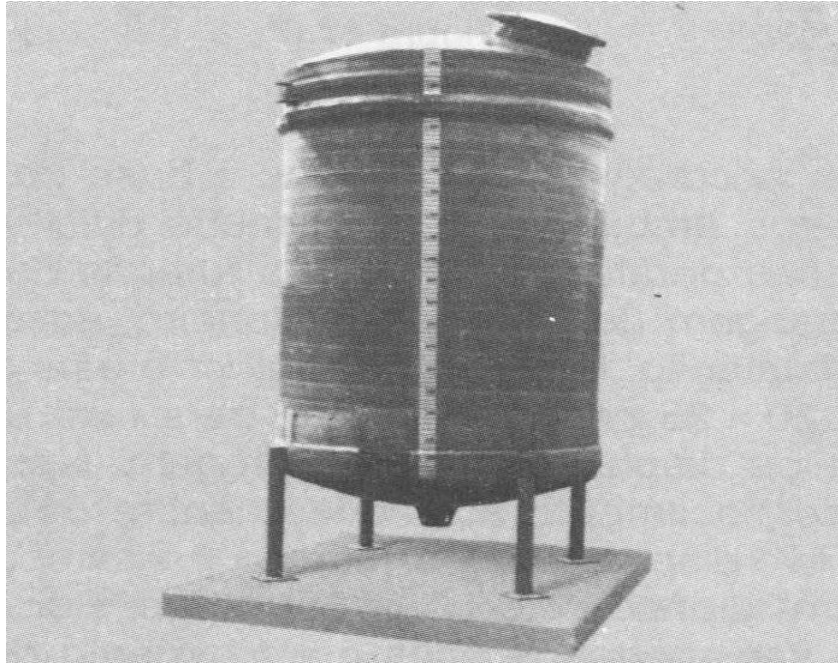


Figura 8
Tanque vertical de fundo abaulado apoiado em cinta de aço.

A saia e a cinta de aço são dimensionadas para suportar o peso do tanque cheio. A cinta transfere o peso do tanque cheio para a estrutura metálica. As bases das colunas são fornecidas sem furação, para serem furadas no campo conforme a localização dos parafusos prisioneiros embutidos no concreto. Essas sapatas devem ser calçadas e niveladas para que o peso fique bem distribuído entre elas.

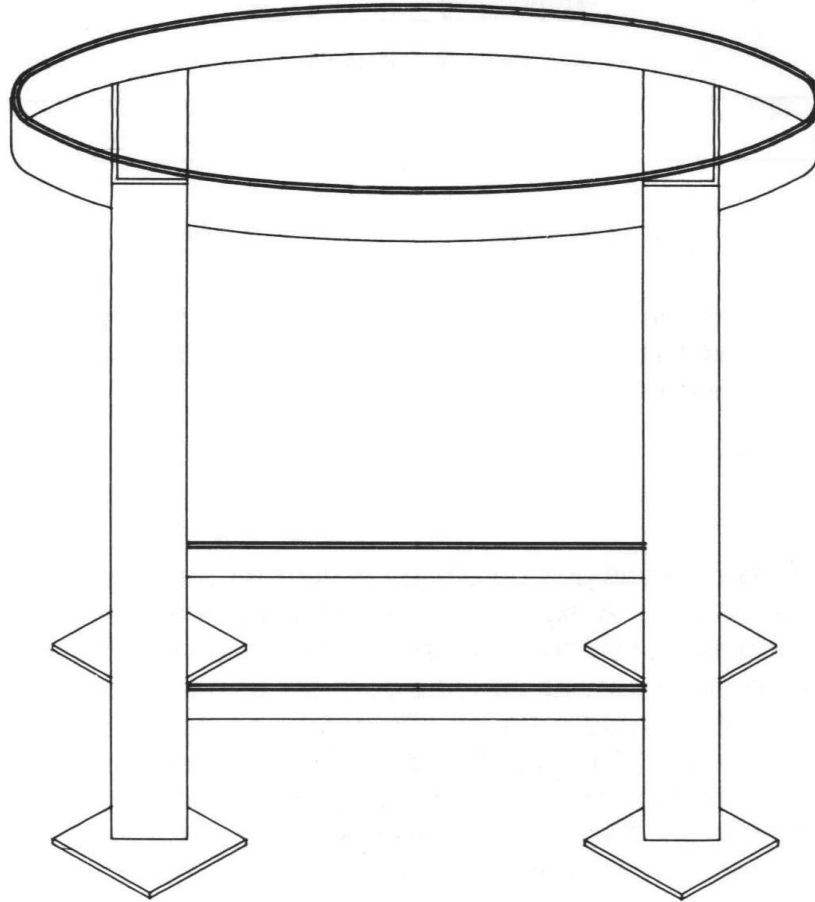


Figura 9
Mostra a estrutura metálica de apoio para tanques verticais aéreos de pequenas dimensões.

Terminado o assentamento, os tanques são ligados à tubulação através de bocais flangeados. Os flanges que conectam com equipamentos de compósitos devem ter faces planas. Se esses flanges tiverem ressaltos ou saliências, eles devem ser usinados e nivelados ou então adaptados com anéis de espessura adequada para assegurar a condição de face plana. Essa condição deve ser cumprida para evitar danos no pescoço do flange, ao ser feito o aperto dos parafusos. A figura 10 mostra isso.

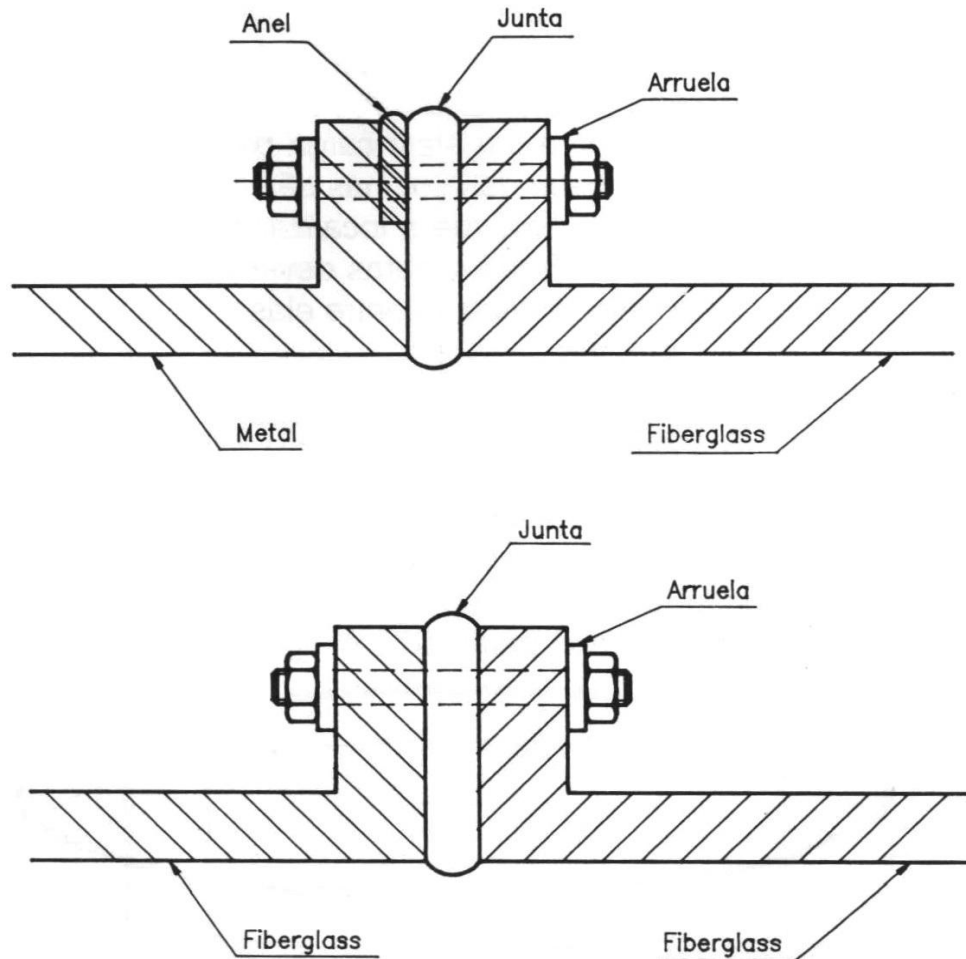


Figura 10

Mostra os anéis para nivelar o ressalto de flanges. Os flanges metálicos ligados aos de compósitos devem ter faces planas. Os ressaltos devem ser eliminados por usinagem ou nivelados com anéis de espessura adequada para assegurar essa condição.

Arruelas são usadas para espalhar os esforços nos flanges. A superfície do flange oposta à face, onde ficam as arruelas, deve ser escariada e planificada para ficar paralela à face. Somente o nicho para as arruelas deve ser usinado, não havendo necessidade de planificar todo o flange. Os parafusos devem ser apertados por igual, com torque de 25 ft x lb (3,5 kg x m), para assegurar compressão adequada à junta. Devem ser usadas somente juntas cheias, com dureza 60 –70 shore A. Os flanges de compósitos devem ser sempre vedados com juntas cheias. Isso é necessário para evitar danos ao pescoço do flange durante o aperto dos parafusos.

Os bocais de saída, localizados no fundo dos tanques, são ligados a válvulas que devem ser ancoradas para não transmitir empuxo ou torque ao costado durante o fechamento ou abertura. Essas válvulas devem ser ligadas por conexões flexíveis, como mangueiras ou foles, para absorver as dilatações dos tanques, que aumentam de diâmetro quando colocados em carga.

Os flanges dos bocais localizados no fundo devem distar pelo menos 5 cm da base de concreto

Os costados de tanques cilíndricos horizontais são reforçados nas regiões de apoio. Na maioria das vezes, além desse reforço localizado, a região dos apoios é enrijecida com nervuras circunferenciais. Esses reforços e nervuras servem para manter o formato cilíndrico do tanque e assegurar que ele trabalhe como viga. Os apoios dos tanques horizontais podem ser construídos em aço, em concreto ou em compósitos. A base e o solo devem ser suficientemente rígidos para impedir recalques diferenciais nos apoios e assim evitar tensões excessivas no tanque.

Os apoios de concreto podem ser pré-moldados ou então fundidos no local, antes de assentar o tanque. Caso sejam fundidos no local, os tanques são fornecidos com apoios de compósito colados nele, nos locais apropriados para servir de forma para o concreto. Esses apoios de compósito servem apenas de forma para o concreto e suportam apenas o peso do tanque vazio. O concreto é despejado nessas formas através de aberturas feitas nelas para essa finalidade. O tanque pode ser colocado em carga após a cura do concreto. A figura 11 mostra essa operação.

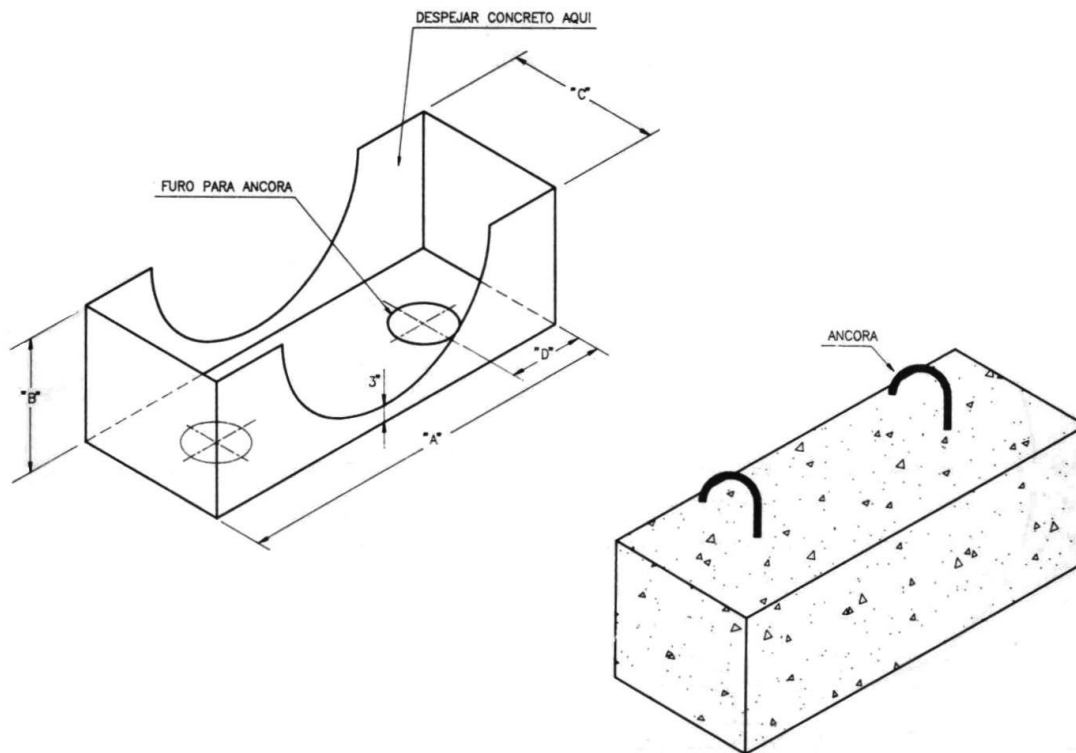


Figura 11

O concreto é inserido nas formas de compósito coladas no costado. O tanque pode ser colocado em carga após a cura do concreto.

Os tanques horizontais podem também ser assentados sobre apoios pré-moldados de aço ou de concreto. Nesse caso deve ser intercalado material flexível (feltro, espuma ou borracha) entre os apoios e o costado. Essa transição flexível acomoda eventuais

irregularidades superficiais e assegura apoio uniforme ao tanque. Nesse caso é conveniente usar apoios partidos, com duas metades, como mostra a figura 12. O assentamento é feito da seguinte maneira:

- *As duas metades do apoio são cobertas pelo material flexível.*
- *As duas metades são posicionadas nos locais designados, frente a frente, deixando um espaço de aproximadamente 10 cm entre elas.*
- *O tanque é colocado sobre os apoios, sendo o espaço de 10 cm ajustado até que as duas metades toquem sua superfície externa. A aproximação dessas metades é feita apertando parafusos previamente montados para essa finalidade.*
- *O espaço entre as metades do apoio, após o aperto, deve ficar entre 0 e 10 cm.*
- *Os apoios são chumbados à laje e o tanque está pronto para ser colocado em uso.*

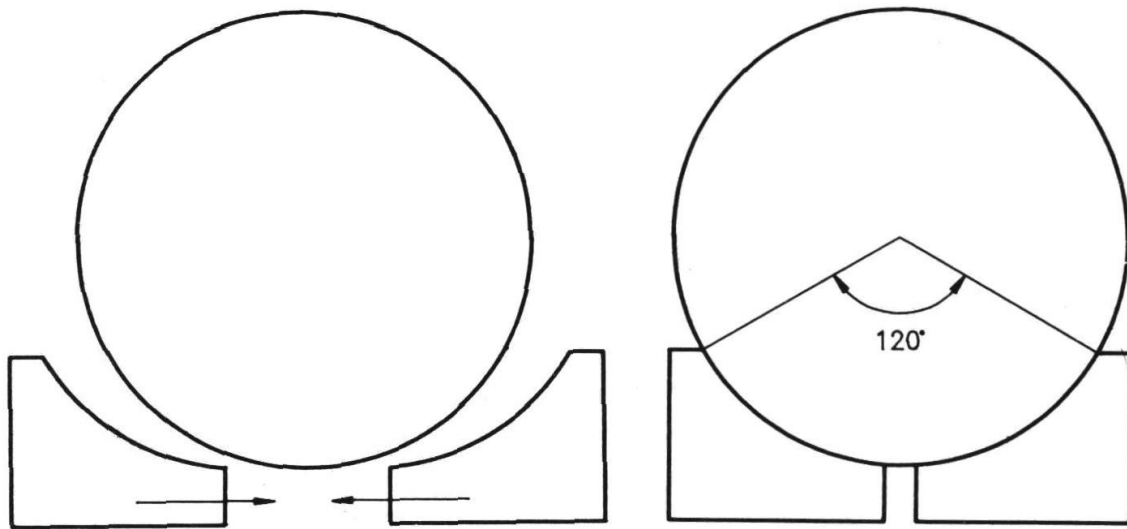


Figura 12
Mostra o ajuste das duas metades do apoio pré-moldado

Atualmente tem havido uma forte tendência ao uso de apoios de compósitos, fornecidos pré-moldados ao costado. Esses apoios são, obviamente, dimensionados para receber o peso do tanque cheio. Nesses casos, o assentamento é feito baixando o tanque suavemente sobre leito de concreto ainda líquido, antes da cura. Esse cuidado assegura o nivelamento dos apoios.



Os tanques enterrados usados para armazenar combustíveis são feitos com parede dupla.



Caminhão tanque usado para transporte de produtos agressivos. Foto cedida pela Edra.

CAPÍTULO 12

Manuseio e montagem de tubulações aéreas

1 – Introdução. Os cuidados e procedimentos para manusear, transportar e estocar tubos e dutos de compósitos, são semelhantes aos usados para outros materiais. Assim, tudo que foi dito sobre carregamento, descarregamento e transporte de tanques, vale também para tubos e dutos. Tendo em vista isso, faremos aqui apenas uma rápida menção dos procedimentos usados para manusear, transportar e estocar tubos e dutos de compósitos.

Nosso foco será na apresentação de justificativas para os procedimentos usados na montagem de tubulações aéreas feitas de compósitos. A argumentação vai mostrar que esses procedimentos seguem preceitos ditados pelo bom senso e aplicáveis a qualquer material. Especificamente, vamos tratar das técnicas para acomodar dilatações térmicas, calcular as distâncias entre os apoios, fazer uniões laminadas e outros detalhes.

Este capítulo prioriza o uso de fórmulas em lugar de tabelas. Em meu entendimento, fórmulas são mais informativas que tabelas e, além disso, elas podem ser adaptadas para uso em outras situações. Neste capítulo vamos tratar dos aspectos gerais da montagem. As ligações entre tubos serão discutidas no capítulo seguinte.

2. Embalagem. A embalagem de tubos e conexões para transporte e manuseio é muito simples e não difere do que é feito para tanques e outros equipamentos. Por exemplo:

- *As extremidades e os flanges devem ser envolvidas com material macio para proteção contra impactos.*
- *As extremidades roscadas devem ser protegidas com "plugs" ou "caps".*
- *As embalagens de peças soltas, como parafusos, arruelas e juntas devem suportar estocagem no campo. As embalagens devem conter a lista das peças, para facilitar a contagem no recebimento.*
- *Itens de tubulação, como peças e conexões, devem ser paletizados ou encaixotados para o transporte.*
- *Os tubos e os dutos devem ser transportados sobre berços de madeira forrados com material macio.*
- *A resina e os agentes de cura usados para fazer a uniões laminadas devem ficar em local seco e fresco, protegidos contra a incidência direta de raios solares. As fibras de vidro devem ser mantidas na embalagem original, à prova de água.*

3. Carga e descarga. As recomendações referentes ao manuseio de tubos e dutos durante a carga e descarga são as mesmas aplicáveis a qualquer material sensível a impactos e outros danos. Por exemplo:

- *Antes de ser movimentados, os tubos de pequeno diâmetro devem ser juntados em feixes.*
- *O manuseio de tubos isolados deve ser feito com dois pontos de apoio, distando 1/3 de cada extremidade. Tubos isolados não devem ser içados pelo centro.*
- *O içamento deve ser feito com cintas de nylon ou com cordas de grande diâmetro. Cabos de aço ou correntes, se usados, devem ser forrados com material macio ou com sarrafos, como mostra a figura 1.*
- *Os tubos e dutos podem ser rolados sobre pranchas ou superfícies lisas, mas não devem sofrer impactos.*
- *Os tubos, dutos e conexões devem ser estocados em local isento de tráfego para minimizar a probabilidade de acidentes.*
- *Os tubos e dutos devem ser estocados em superfície lisa e regular. Se empilhados, o empilhamento deve alternar pontas e bolsas. As conexões e as extremidades roscadas devem ser estocadas com os "caps" e os "plugs" usados no transporte. Da mesma maneira, os flanges devem permanecer protegidos durante a estocagem, sendo geralmente envolvidos por material macio, como feltro ou espuma.*

4. Inspeção. Da mesma maneira que os tanques discutidos no capítulo anterior, os dutos, os tubos e as conexões devem ser inspecionados antes de ser descarregados. Essa inspeção deve incluir:

- *Os flanges e as superfícies externas, notando a presença de cortes, arranhões, esfolamentos e trincas.*
- *As superfícies internas, notando a presença de trincas e de arranhões.*
- *O estado dos apoios e dos paletes, que pode indicar ocorrência de impactos ou traumas no transporte.*

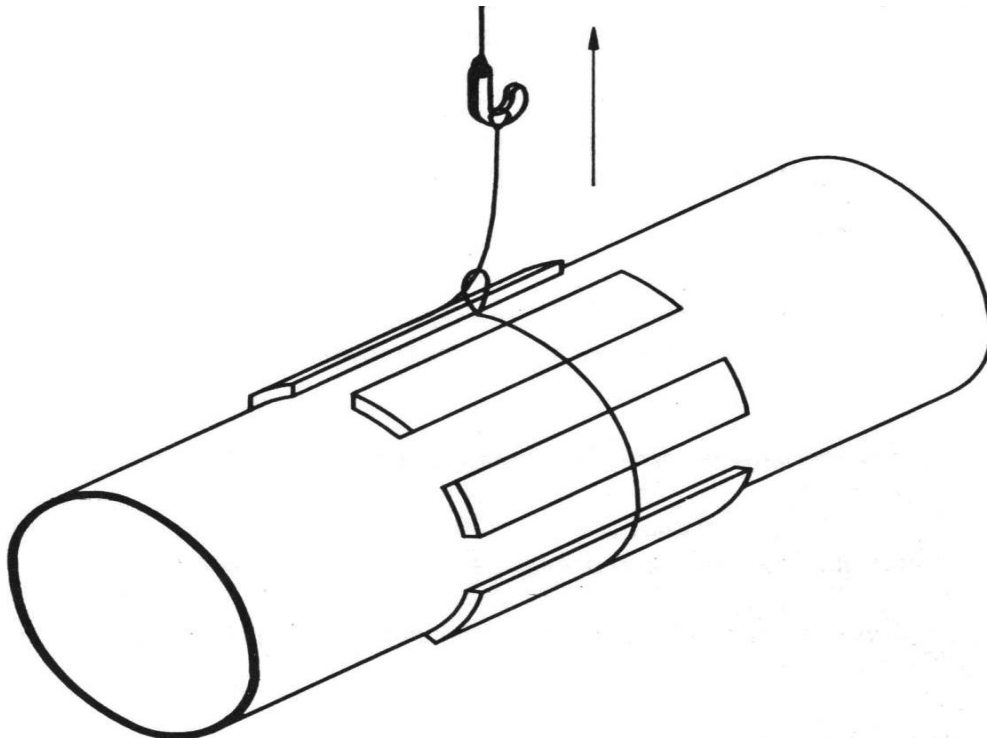


Figura 1

Movimentação de tubos/dutos com cordas ou cabos de aço.

Exemplo 1. A figura 2 mostra um tramo de tubulação içado em dois pontos. Determinar a localização ótima desses pontos e o comprimento máximo para o tramo.

São dados:

p = peso do tubo por unidade de comprimento (kg/cm)

t = espessura do tubo (cm).

E_x = módulo axial do tubo (kg/cm²)

R = raio do tubo (cm)

d = densidade do laminado do tubo (g/cm³)

ε = máximo alongamento admissível.

São desconhecidos:

L = comprimento do tramo içado (m)

L_1 = distância dos apoios às extremidades do tramo (m)

$L_2 = L - 2L_1$ é a distância entre os apoios (m)

A distância L_1 é determinada para igualar os momentos fletores nos apoios e no centro do tramo.

$$(M)_{\text{apoio}} = \frac{p \times L_1^2}{2}$$

$$(M)_{\text{centro}} = \frac{p}{2} \times \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right)^2 - p \times \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) \times \frac{L_2}{2}$$

Igualando essas expressões obtemos

$$L_1 = 0,21 \times L$$

Assim, o tramo deve ser apoiado de modo que as partes em balanço tenham 21% do comprimento total. O comprimento máximo do tramo, L , é determinado pelo alongamento máximo admissível na direção axial

$$\varepsilon = \frac{M \times R}{E_x \times I} = \frac{M}{E_x \times \pi \times R^2 \times t}$$

O momento fletor máximo é calculado sabendo que o comprimento da parte em balanço deve ser igual a $0,21 \times L$.

$$M = \frac{p \times (0,21 \times L)^2}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{p \times (0,21 \times L)^2}{2} \times \frac{1}{E_x \times \pi \times R^2 \times t}$$

O peso do tubo por unidade de comprimento, em kg/cm, é

$$p = 0,001 \times \pi \times 2R \times t \times d$$

Onde R é o raio em cm, t é a espessura em cm e d é a densidade em g/cm^3 .

Fazendo as devidas substituições, obtemos

$$L = 1,50 \times \sqrt{\frac{E_x \times \varepsilon \times R}{d}}$$

Onde

L = comprimento máximo do tramo (m)

E_x = módulo axial do tubo (kg/cm^2).

ε = alongamento axial admissível.

d = densidade do laminado (g/cm^3)

R = raio em cm

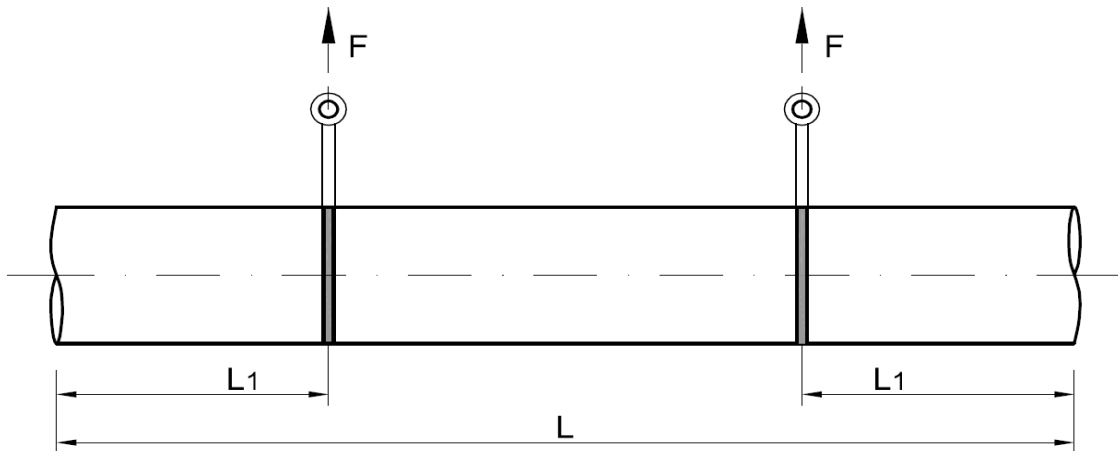


Figura 2

Tramo de tubulação içado com cintas em dois pontos de apoio.

Exemplo 2. Suponhamos uma tubulação enterrada, feita pelo processo hoop-chop. Os tubos são entregues na obra em barras de 12 metros. Essas barras são ligadas por uniões laminadas. Para facilitar a montagem, alguns tubos são ligados fora da vala. Determinar o número máximo de tubos unidos fora da vala.

São dados:

$$E_x = 110200 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{Laminado hoop-chop})$$

$d = 2,0 \text{ g/cm}^3$ (Densidade do material do tubo)
 $R = 500 \text{ mm}$ (raio do tubo)
 $\varepsilon = 0,001$ (Alongamento admissível)

O comprimento máximo do tramo que pode ser içado sem danificar os tubos é dado pela equação

$$L = 1,50 \times \sqrt{\frac{E_x \times \varepsilon \times R}{d}}$$

$$L = 1,50 \times \sqrt{\frac{110200 \times 0,001 \times 50}{2,0}}$$

Fazendo as contas obtemos o comprimento $L = 78,73 \text{ m}$. Esse comprimento corresponde a aproximadamente 6 barras. Portanto, podemos unir até 6 tubos fora da vala. O tramo assim obtido, com 72 m, pode ser içado e lançado na vala.



Chaminé içada com balancim. Observe o uso de cintas de lona, para evitar danos na superfície do laminado.

5. Curvatura de tubulações pré-montadas. Muitas vezes as tubulações de compósitos são curvadas depois de montadas, para contornar obstáculos ou acomodar pequenos desalinhamentos. Esta seção mostra como calcular a curvatura máxima que pode ser imposta às tubulações de compósito depois da montagem.

O raio de curvatura mínimo é determinado por dois critérios:

- **Critério de alongamento:** O raio de curvatura mínimo é determinado para o alongamento axial não exceder o valor admissível. Este critério é dominante para tubulações de grandes diâmetros. O raio de curvatura mínimo é determinado pela relação:

$$\rho = \frac{R}{\varepsilon}$$

Onde R é o raio do tubo, ε é o alongamento admissível e ρ é o raio de curvatura mínimo.

- **Critério de estabilidade.** Esse critério é dominante para as tubulações de pequenos diâmetros. O raio de curvatura mínimo é dado pela relação

$$\rho = \frac{R}{\varepsilon_{cri}}$$

Onde ε_{cri} é o alongamento crítico, que colapsa o tubo comprimido na direção axial. O alongamento crítico é calculado pela expressão

$$\varepsilon_{cri} = 0,60 \times \left[0,1 + 0,9 \exp\left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right] \times \frac{t}{R}$$

Entrando esse alongamento na equação para o raio de curvatura obtemos

$$\rho = \frac{R^2}{0,60 \left[0,1 + 0,9 \exp\left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right] \times t}$$

Exemplo 3. Calcular o raio de curvatura mínimo para uma tubulação de compósito que tem 100 cm de diâmetro e 10 mm de espessura. O alongamento admissível é $\varepsilon = 0,20\%$.

Pelo critério de alongamento: O raio de curvatura mínimo é calculado pela equação

$$\rho = \frac{R}{\varepsilon}$$

$$\rho = \frac{50}{0,002} = 25000 \text{ cm}$$

$$\rho = 250 \text{ m}$$

Pelo critério de estabilidade: O raio de curvatura mínimo é calculado pela equação

$$\rho = \frac{R^2}{0,60 \left[0,1 + 0,9 \exp\left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right] \times t}$$

$$\rho = \frac{50^2}{0,60 \left[0,1 + 0,9 \exp\left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{50}{1}}\right) \right] \times 1}$$

$$\rho = 61 \text{ m.}$$

Neste exemplo, o raio de curvatura é controlado pelo alongamento e não deve ser menor que 250 metros. A curvatura acomodada por tubulações de grandes diâmetros geralmente é controlada pelo alongamento admissível.

6. Generalidades sobre montagem. As tubulações aéreas devem ser apoiadas e guiadas. Os apoios impedem a movimentação vertical. A distância entre os apoios é determinada para limitar a deflexão. Os guias impedem a movimentação lateral e mantêm o alinhamento. A distância entre os guias é determinada por critério de estabilidade. As tubulações aéreas geralmente são ancoradas nos pontos de transição, onde ocorrem mudanças de direção, de diâmetro ou de material.

As recomendações que seguem são aplicáveis ao projeto e à localização dos guias, dos apoios e das âncoras.

- Os tubos montados não devem apoiar sobre arestas ou objetos pontudos, que gerem tensões concentradas. A largura mínima dos apoios deve ser conforme a tabela 1.
- Nos apoios e guias, os tubos devem ser protegidos contra abrasão e concentração de tensões. Isso é feito inserindo selas entre o tubo e os suportes. Para tubos com diâmetros menores que 12 polegadas, as selas devem cobrir pelo menos 120 graus da circunferência do tubo. Para tubos de grandes diâmetros (maior que 12") ou muito flexíveis (dutos) as selas devem cobrir 180 graus.
- As válvulas e outros equipamentos pesados devem ter apoios independentes, para não transferir esforços aos tubos.
- Os trechos verticais das tubulações devem trabalhar sob compressão e não sob tração. Isso pode ser feito com colares de apoio nas bases dos trechos verticais, como mostra a figura 3.
- As tubulações devem ser ancoradas nos pontos de transição, onde a linha muda de direção, de material ou de diâmetro. As âncoras dividem a tubulação em trechos retos.
- Os trechos retos, entre âncoras, devem ser guiados para não flambar quando submetidos a compressão axial causada por aumento de temperatura. A distância máxima entre guias será determinada mais adiante.

<i>Diâmetro do tubo (polegadas)</i>	<i>Largura mínima do apoio (polegadas)</i>
1,0	0,88
1,5	0,88
2,0	0,88
3,0	1,25
4,0	1,25
6,0	1,50
8,0	1,75
10,0	1,75
12,0	2,00
14,0	2,00
16,0	2,50

Tabela 1

Mostra a largura mínima dos apoios em função do diâmetro dos tubos.

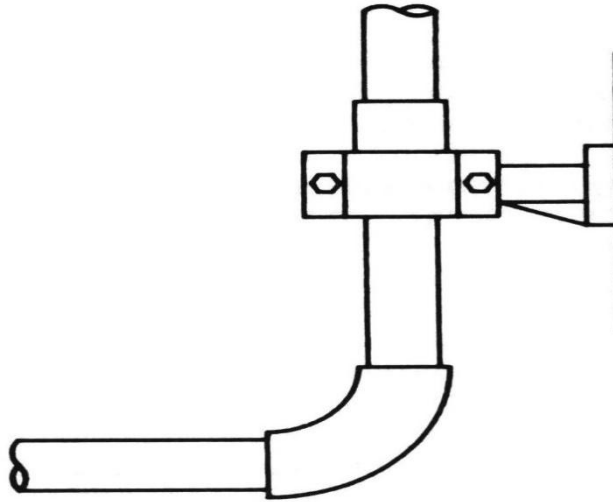


Figura 3

Colar de apoio para manter trechos verticais sob compressão

7 - Distância máxima entre apoios. As tubulações aéreas devem ser apoiadas para manter a deflexão no centro do vão abaixo de limites estabelecidos pela declividade da linha. O espaçamento máximo entre apoios é determinado analisando a tubulação como viga contínua ou descontínua, uniformemente carregada pelo seu peso próprio acrescido do peso do fluido conduzido.

A deflexão máxima entre apoios, considerando a tubulação como viga contínua, é calculada pela expressão

$$d_{\max} = \frac{w \times l^4}{384 \times E_x \times I}$$

Onde

d_{\max} - Deflexão no centro do vão (cm)

w é o peso do tubo cheio (kg/cm)

$$w = \frac{\pi R^2 \gamma + 2\pi R t d}{1000} \quad (\text{kg/cm})$$

I é o momento de inércia da seção reta do tubo (cm⁴)

$$I = \frac{\pi}{4} [(R + t)^4 - R^4] \text{ cm}^4$$

l = Distância entre apoios (cm)

$E_x = \text{Módulo axial (kg/cm}^2\text{)}$
 $R = \text{Raio interno do tubo (cm)}$
 $t = \text{Espessura do tubo (cm)}$
 $\gamma = \text{Densidade do fluido conduzido (g/cm}^3\text{)}$
 $d = \text{Densidade do laminado (g/cm}^3\text{)}$

A distância máxima entre apoios é obtida substituindo esses valores na equação acima. Fazendo essa substituição, obtemos para a máxima distância entre os apoios

$$l = 17,60 \times [E_x \times d_{\max}]^{1/4} \times \left[\frac{(R+t)^4 - R^4}{R^2 \gamma + 2Rtd} \right]^{1/4} \quad (1)$$

Essa equação é válida para tubulações aéreas ligadas por uniões rígidas (laminadas ou flangeadas) e fixadas a estruturas também rígidas. Nessas condições, a tubulação pode ser analisada como viga contínua uniformemente carregada.

Se a tubulação for ligada por uniões flexíveis do tipo ponta e bolsa com anel, como é o caso das usadas para transportar água, esgoto ou alguns despejos industriais, a análise deve ser feita considerando os tubos como vigas simplesmente apoiadas. Nesse caso, a deflexão no centro do vão e a distância máxima entre os apoios são

$$d_{\max} = \frac{5}{384} \times \frac{wl^4}{E_x I}$$

$$l = 11,70 \times [E_x \times d_{\max}]^{1/4} \times \left[\frac{(R+t)^4 - R^4}{R^2 \gamma + 2Rtd} \right]^{1/4} \quad (2)$$

A figura 4 mostra alguns guias, apoios e âncoras usados em tubulações de compósitos.

- *Os guias permitem movimentação apenas na direção axial. As movimentações laterais e verticais são impedidas pelos guias.*
- *As âncoras restringem completamente a movimentação da tubulação, que fica impedida de se deslocar tanto axial como vertical e lateralmente. As âncoras são instaladas nos pontos de transição da linha, onde ocorrem mudanças de direção, de diâmetro ou de material.*
- *Os apoios permitem movimentação lateral e axial, restringindo apenas a movimentação vertical.*

Deve ficar claro que a distância entre apoios depende da deflexão máxima admitida pelo projetista. A deflexão máxima admissível é um dado de projeto.

- *As linhas com ligações rígidas (flanges, uniões laminadas) são analisadas como vigas contínuas e a distância máxima entre apoios é determinada pela equação (1).*

- *As linhas com ligações flexíveis (ponta e bolsa com anel, luva com anel) são analisadas como vigas simplesmente apoiadas e para elas a distância máxima entre apoios é calculada pela equação (2).*

A deflexão máxima é definida pelo projetista para evitar empoçamento de fluido no centro do vão. O empoçamento não acontece se

$$G \geq \frac{d_{\max}}{l}$$

Onde G é a declividade, ou gradiente, da linha.

Por exemplo, se a declividade da linha for $G = 1/300$, a deflexão máxima deve ser

$$d_{\max} \leq \frac{l}{300}$$

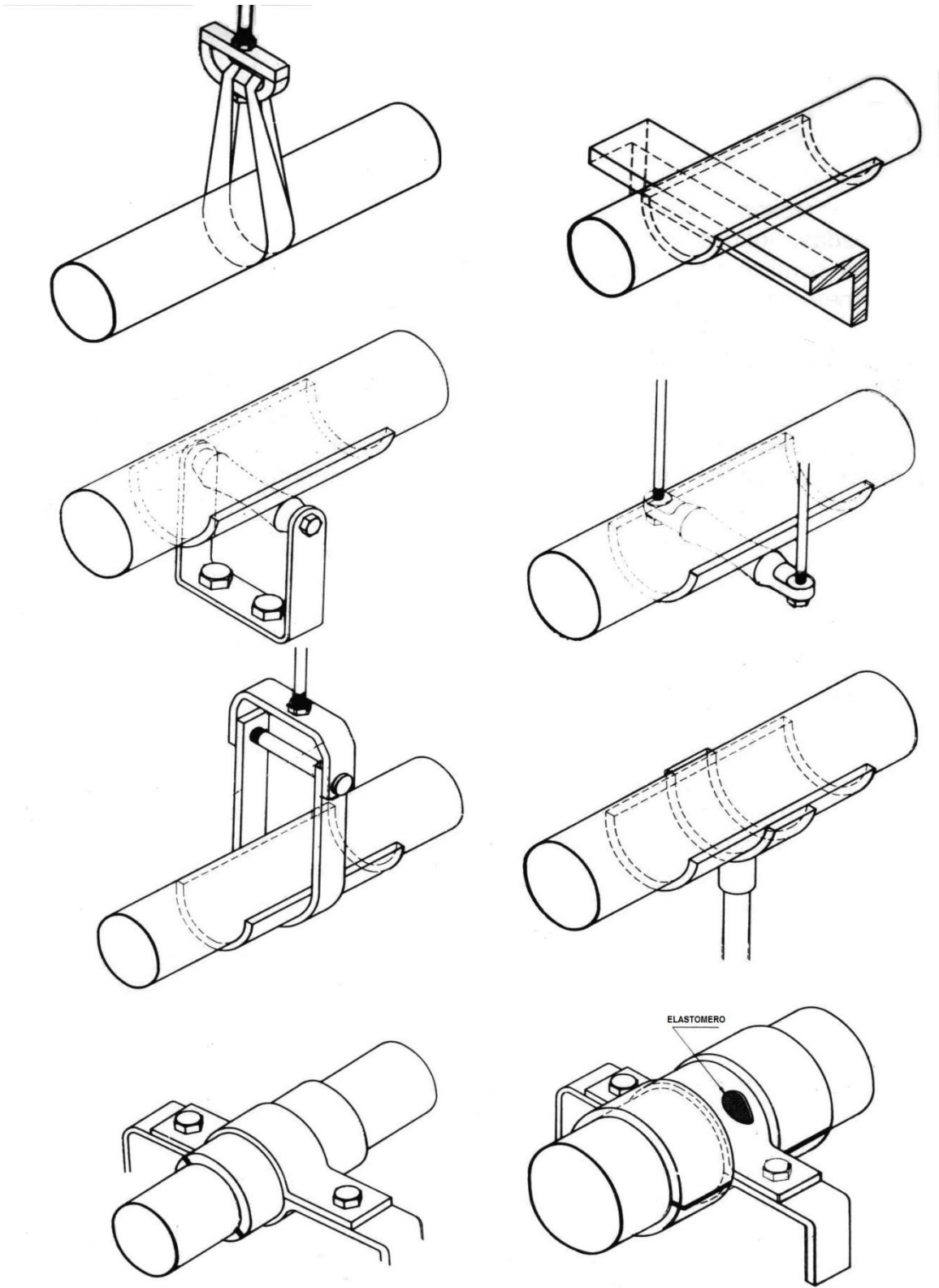


Figura 4
Guias, apoios e âncoras usados para fixar tubulações de compósitos.

Exemplo 4. Comparar a distância entre apoios de tubulações idênticas, montadas com uniões rígidas ou flexíveis.

Comparando as equações (1) e (2) notamos que as tubulações montadas com uniões rígidas admitem vãos 50% maiores que as montadas com uniões flexíveis.

Exemplo 5. Calcular a distância máxima entre apoios para tubulações de compósitos feitas por enrolamento cruzado UD55 e montadas com uniões laminadas. A espessura estrutural dos tubos é $t = 2,5 \text{ mm}$ e a declividade da linha é $G = 1/300$.

São dados:

$$E_x = 93100 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$d = 1,93 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\gamma = 1,20 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$t = 2,5 \text{ mm}$$

$$R = 150 \text{ mm}$$

$$G = 1/300$$

A declividade da linha, $G = 1/300$, exige que a deflexão admissível seja menor que $d_{\text{max}} = l/300$.

Entrando esses valores na equação (2), obtemos

$$l = 17,60 \times [E_x \times d_{\text{max}}]^{1/4} \times \left[\frac{(R+t)^4 - R^4}{R^2 \gamma + 2Rtd} \right]^{1/4}$$

$$l = 17,60 \times \left[93100 \times \frac{l}{300} \right]^{1/4} \times \left[\frac{(15+0,25)^4 - 15^4}{15^2 \times 1,20 + 2 \times 15 \times 0,25 \times 1,93} \right]^{1/4}$$

$$l^{3/4} = 138$$

$$l = 712 \text{ cm} = 7,12 \text{ m}$$

Se a tubulação fosse ligada com uniões flexíveis, a máxima distância entre apoios seria

$$l = \frac{7,12}{1,5} = 4,75 \text{ m}$$

8 - Dilatação térmica. A montagem de tubulações aéreas leva em conta as dilatações térmicas. Essas dilatações podem ser impedidas por ancoragem e guiamento, ou podem ser acomodadas por laços ou liras de expansão, ou ainda por juntas de dilatação.

Os coeficientes de dilatação térmica axial de tubos de compósitos podem ser computados com grande precisão em função da composição do laminado. V. o livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos”. Esses coeficientes são maiores que o dos tubos de aço. A tabela 2 mostra os coeficientes de dilatação axial e circunferencial de alguns tubos típicos.

<i>Laminado</i>	α_x (sugerido) ($\times 10^{-6} / ^\circ C$)	α_y (sugerido) ($\times 10^{-6} / ^\circ C$)
<i>M450 + T600</i>	30,0	22,0
<i>M450 + T800</i>	23,0	21,0
<i>Hoop – chop</i>	33,0	12,0
<i>UD55</i>	33,0	32,0
<i>UD70</i>	35,0	20,0

Tabela 2

Mostra os coeficientes de dilatação térmica típicos para tubos comerciais. Esses valores podem ser computados com grande precisão se a composição do laminado for conhecida.

Apesar dos altos coeficientes de dilatação térmica, as tubulações de compósitos exercem empuxos pequenos nas âncoras. Isso acontece porque os módulos axiais dos compósitos são muito inferiores aos dos metais. Vamos ver um exemplo numérico para esclarecer isso.

Exemplo 6. *Calcular o alongamento axial de compressão, a tensão de compressão e o empuxo nas âncoras de uma tubulação de aço e de outra equivalente de compósitos. As duas tubulações são ancoradas nas extremidades e operam nas condições seguintes:*

<i>Dados</i>	<i>Tubo de compósito</i>	<i>Tubo de aço</i>
<i>Diâmetro D (mm)</i>	100	100
<i>Módulo axial E_x (kg/cm²)</i>	70.000	2.100.000
<i>Coefficiente de dilatação α_x (1/^oC)</i>	30×10^{-6}	12×10^{-6}
<i>Espessura estrutural t (mm)</i>	4,5	2,0
<i>Variação de temperatura ΔT (^oC)</i>	60	60

As duas linhas são instaladas a 20^oC e operam a 80^oC. Assim, a variação de temperatura é $\Delta T = 60^{\circ}C$. O módulo de compressão axial do laminado de compósito é suposto igual a 70.000 kg/cm².

Os alongamentos axiais de compressão são calculados pela expressão

$$\varepsilon = \alpha_x \times \Delta T$$

$$\varepsilon = (30 \times 10^{-6})(60) = 0,18\% \quad (\text{Compósitos})$$

$$\varepsilon = (12 \times 10^{-6})(60) = 0,07\% \quad (\text{Aço})$$

Como o trecho analisado é ancorado nas duas extremidades, a dilatação térmica é totalmente absorvida como compressão. A tensão média de compressão é calculada pela lei de Hooke:

$$\sigma = E_x \times \varepsilon$$

$$\sigma = (70000)(0,0018) = 126 \text{kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{Compósito})$$

$$\sigma = (2100000)(0,0007) = 1510 \text{kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{Aço})$$

Os empuxos nas âncoras são calculados multiplicando as tensões de compressão pelas áreas das seções transversais dos tubos.

$$F = A \times \sigma$$

$$F = \frac{\pi}{4} [(D + 2t)^2 - D^2] \times \sigma$$

$$F = \frac{\pi}{4} [(10 + 2 \times 0,45)^2 - 10^2] \times 126 = 1860 \text{kg} \quad (\text{Compósito})$$

$$F = \frac{\pi}{4} [(10 + 2 \times 0,20)^2 - 10^2] \times 1510 = 9670 \text{kg} \quad (\text{Aço})$$

Este exemplo mostra com eloquência a diferença entre os empuxos exercidos nas âncoras pelas tubulações de aço e as de compósitos. O comprimento da linha é irrelevante e nem foi mencionado.

As âncoras dividem a tubulação em trechos retos que são analisados de maneira independente. A figura 5 mostra a posição das âncoras em uma mudança de direção da linha. As âncoras devem ser construídas para resistir o empuxo e outras cargas oriundas da operação do sistema.

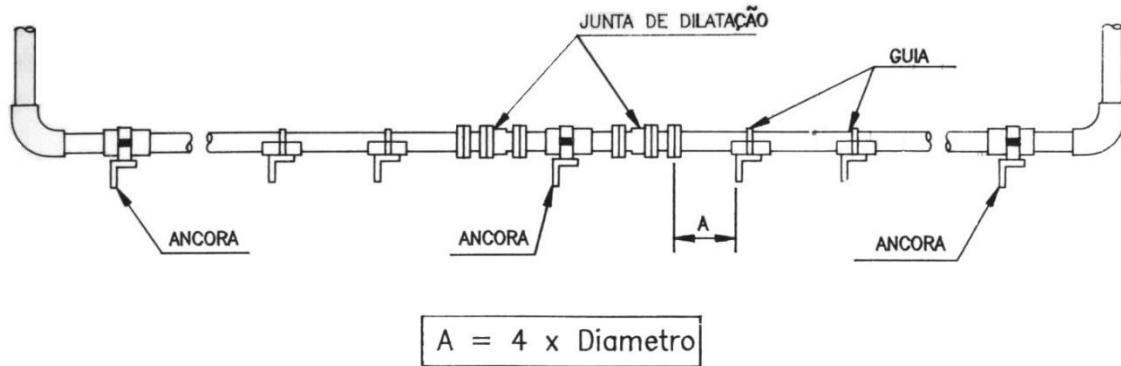


Figura 5

Mostra a posição das âncoras em mudanças de direção. O empuxo exercido por tubulações de compósitos é muito inferior ao exercido por tubulações equivalentes de aço.

O trecho reto da linha, entre âncoras, deve ser guiado para não flambar devido à carga de compressão. A máxima distância entre guias, para evitar essa flambagem, é calculada pela fórmula de Euler, considerando o segmento de tubo entre guias como viga engastada e comprimida pelo empuxo de dilatação. Nessa situação, a força de compressão crítica é

$$F_{cri} = 4\pi^2 \frac{E_x \times I}{l^2}$$

A distância máxima entre os guias é obtida igualando essa força crítica ao empuxo exercido pelas âncoras, com coeficiente de segurança adequado. Assim,

$$A \times E_x \times \alpha_x \times \Delta T = 4\pi^2 \frac{E_x \times I}{l^2} \times \frac{1}{CS}$$

Adotando coeficiente de segurança $CS = 4$ a distância máxima entre guias é

$$l = \pi \times \left[\frac{I}{A \times \alpha_x \times \Delta T} \right]^{1/2}$$

Onde

l é a máxima distância entre guias (cm)

$I = \frac{\pi}{4} [(R+t)^4 - R^4]$ é o momento de inércia da seção transversal do tubo (cm⁴)

$A = \pi [(R+t)^2 - R^2]$ é a área da seção transversal do tubo (cm²)

α_x é o coeficiente de dilatação térmica axial (1/°C)

ΔT é a variação de temperatura (°C)

R é o raio interno do tubo (cm)

t é a espessura do tubo (cm)

Entrando na equação acima com as expressões para I e A , obtemos

$$l = \frac{\pi}{2} \times \left[\frac{(R+t)^2 + R^2}{\alpha_x \times \Delta T} \right]^{1/2} \quad (3)$$

A equação (3) computa a distância máxima entre guias para evitar flambagem da tubulação. Ela embute o coeficiente de segurança $CS = 4$.

Exemplo 7. *Vamos recapitular as regras para posicionar as âncoras, os guias e os apoios de tubulações aéreas.*

- *As âncoras devem ser instaladas sempre que a tubulação mudar de direção, de diâmetro ou de material. Elas devem ser instaladas também nas ligações da tubulação com equipamentos, como tanques, para impedir a transmissão de empuxos.*
- *Os guias devem ser instalados nos trechos retos entre as âncoras, para evitar flambagem pelo empuxo oriundo de aumentos de temperatura. A distância entre os guias é calculada pela equação (3)*
- *Os apoios são instalados entre os guias. Suas posições são determinadas da maneira mais favorável, após posicionar os guias. A distância máxima entre apoios é calculada como mostrado no texto para condição de viga contínua ou descontínua.*

9. Juntas de dilatação. As juntas de dilatação para tubulações de compósitos diferem das usadas para tubulações metálicas nos pontos seguintes

- *Os pequenos empuxos nas tubulações de compósito requerem o uso de juntas de dilatação com baixa força de ativação.*
- *As linhas de compósito dilatam mais que as metálicas e exigem juntas de grandes cursos.*

A força de ativação das juntas de dilatação deve ser no máximo igual a 1/4 da força crítica de flambagem.

$$F_{ativação} < \frac{1}{4} F_{cri} = \frac{\pi^2 \times E_x \times I}{l^2}$$

A parcela do empuxo menor que a força de ativação é absorvida pelos tubos como compressão.

Para assegurar alinhamento dos esforços, a distância entre os guias deve ser reduzida nas proximidades da junta de dilatação. As figuras 4 e 5 mostram a posição dos guias próximos à junta de dilatação.

Não tenho conhecimento de juntas de dilatação tipo fole (figura 6) fabricadas em compósito. A razão para isso eu não sei, porque essas juntas me parecem muito interessantes. As juntas tipo fole são feitas por laminação manual com mantas de fibras picadas, reproduzindo a barreira de corrosão dos tubos. Os gomos do fole defletem quando a tubulação é tracionada ou comprimida e ao fazer isso absorvem a movimentação axial da linha. A espessura dos foles deve ser estabelecida pela pressão de trabalho e não precisa ser muito grande. A pequena espessura dá aos foles de compósitos grande flexibilidade e

boa capacidade de absorver dilatações. O curso das juntas de dilatação tipo fole não se alteram, isto é, não mudam com o tempo.

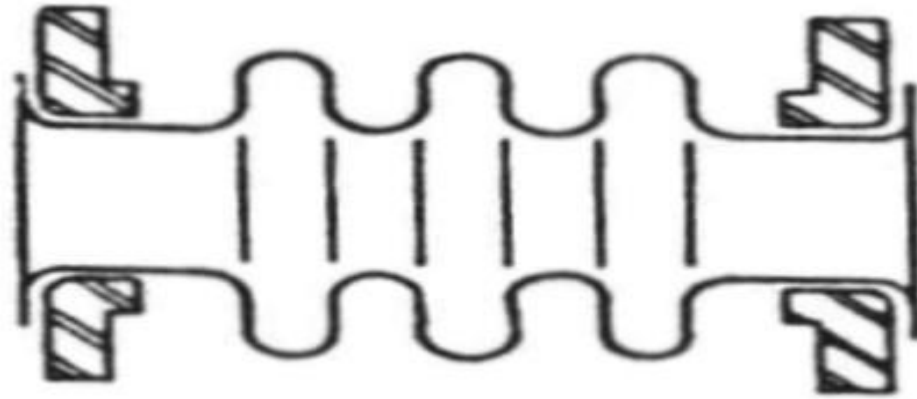


Figura 6
Junta de expansão tipo fole, feita em compósitos. Essas juntas são ligadas à tubulação por uniões laminadas ou flangeadas.

10. Liras de expansão. As juntas de dilatação disponíveis no mercado são projetadas para tubulações de aço. Elas são pouco usadas em tubulações de compósitos. O alto custo e o pequeno curso delas, aliados ao baixo empuxo exercido pelas tubulações de compósitos, favorecem o uso de liras em lugar dessas juntas de expansão. Este cenário pode ser mudado com juntas de expansão próprias para as tubulações de compósitos.

A figura 7 mostra uma lira típica. As dilatações são acomodadas por flexão na perna "A" da lira. A dimensão "A" é calculada supondo a perna como viga em balanço, engastada, submetida a afundamento igual à dilatação a ser acomodada. A figura 8 mostra uma viga nessa condição.

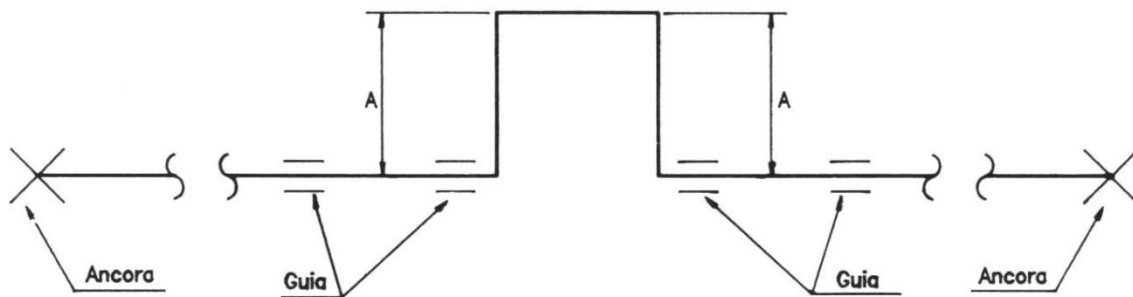


Figura 7
Lira de expansão típica. As dilatações da linha são acomodadas como flexão na perna "A".

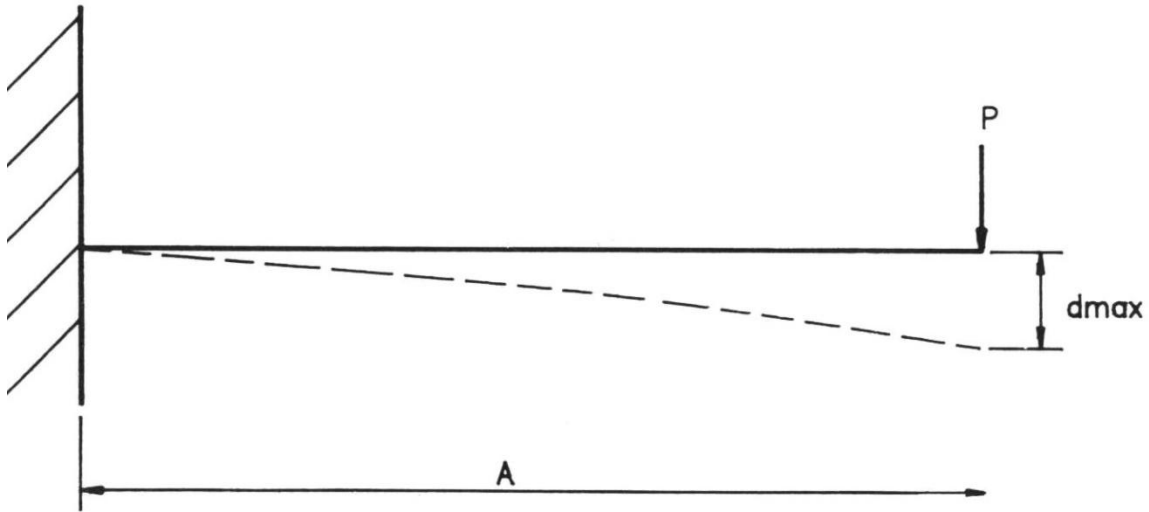


Figura 8
Viga em balanço, engastada, submetida ao afundamento d_{max} .

Observando a figura 8, a força P que causa o afundamento d_{max} na extremidade da viga de comprimento “A” gera um alongamento de flexão no engaste dado por

$$\epsilon = \frac{P \times A \times D}{2 \times E_x \times I}$$

Lembrando que o afundamento d_{max} é função de P

$$d_{max} = \frac{P \times A^3}{3E_x \times I}$$

Combinando as equações acima obtemos o alongamento ϵ em função do afundamento d_{max}

$$\epsilon = 3 \times d_{max} \times \frac{R}{A^2}$$

Substituindo $d_{max} = L \times \alpha \times \Delta T$ obtemos

$$\epsilon = 3 \times \frac{R}{A^2} \times L \times \alpha_x \times \Delta T$$

O comprimento mínimo da perna “A” da lira de expansão é

$$A = \sqrt{3 \times \frac{R}{\epsilon_x} \times L \times \alpha_x \times \Delta T}$$

Onde

R é o raio da tubulação (cm)

L é o comprimento do trecho entre a lira de expansão e a âncora mais próxima (cm)

α_x é o coeficiente de dilatação térmica axial ($1/^\circ\text{C}$)

ϵ_x é o alongamento admissível na direção axial

ΔT é a variação de temperatura ($^\circ\text{C}$).

Exemplo 8. Calcular a dimensão “A” da lira de expansão necessária para acomodar a dilatação térmica de uma tubulação feita por enrolamento cruzado UD55.

São dados:

$$R = 10 \text{ cm}$$

$$L = 50 \text{ m}$$

$$\alpha_x = 33,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_x = 0,002$$

$$\Delta T = 80 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A dimensão “A” é calculada pela expressão acima

$$A = \sqrt{3 \times \frac{R}{\epsilon_x} \times L \times \alpha_x \times \Delta T}$$

$$A = \sqrt{3 \times \frac{10}{0,002} \times 5000 \times 33 \times 10^{-6} \times 80}$$

$$A = 4,5 \text{ m}$$

O capítulo seguinte trata das uniões de tubos e de conexões, com ênfase especial nas uniões laminadas.

CAPÍTULO 13

Uniões de tubos

1 – Introdução. As uniões laminadas são feitas cobrindo a linha de contato de dois laminados de compósitos com tiras de fibras impregnadas com resina. Essas uniões são universalmente usadas para emendar ou unir laminados de compósitos em praticamente todas aplicações. Especificamente, elas são usadas para unir partes de tanques, dutos e tubos usados em ambientes agressivos. Essencialmente, essas uniões consistem em justapor as arestas a ser unidas e laminar sobre elas as tiras de fibras bem centradas sobre a linha de contato. Essas uniões são fáceis de executar, têm baixo custo e são muito confiáveis. Quando bem projetadas e executadas elas oferecem excelente serviço em ambientes agressivos sob esforços de tração, de compressão, de torção ou de flexão.

Para facilitar a apresentação, nossa narrativa será particularizada à união de tubos. Assim, quando falarmos em “união de tubos”, o leitor deve entender que estamos de fato falando sobre uniões de quaisquer itens de compósitos, sejam eles de tubulações (T, curva), ou de qualquer outra estrutura.

As considerações para dimensionar uniões laminadas de tubos são:

- *Elas são analisadas como danos estruturais passantes, isto é, danos com destruição total de todas lâminas dos tubos.*
- *A largura Δ deve ser suficiente para resistir aos esforços axiais.*
- *A rigidez axial deve ser pelo menos igual à dos tubos. Essa condição assegura a continuidade de rigidez axial da tubulação.*

Nota: As tubulações aéreas usadas para transportar produtos agressivos são montadas preferencialmente com uniões laminadas. As tubulações para produtos não agressivos – água, esgoto e vinhaça – geralmente trabalham enterradas e ligadas por uniões flexíveis feitas com luvas e juntas de elastômero.

As uniões laminadas são caracterizadas por três parâmetros:

- *A largura total Δ*
- *A rigidez axial de tração*
- *A resistência axial de tração*

A figura 1 mostra as dimensões críticas de uma união laminada típica. Observe que ela é construída em degraus laminando tiras, ou faixas, de reforço com diversas larguras. Para evitar esforços fora do plano, as tiras largas são laminadas primeiro, por baixo das estreitas. A construção em degraus não é essencial, mas é muito usada por usar menos material e facilitar a laminação em campo. Observe que as pontas dos tubos mostrados na figura 1 não têm chanfros. Essa é a situação comum em aplicações comerciais.

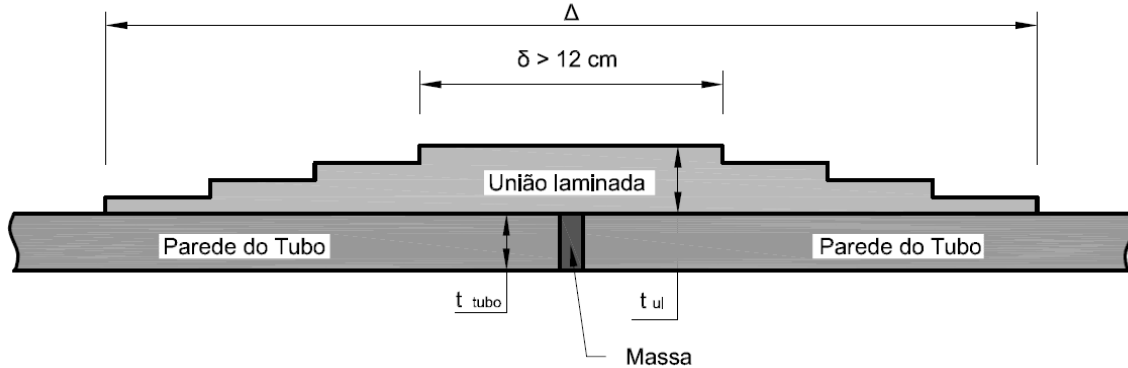


Figura 1

A construção em degraus é universalmente usada para fazer uniões laminadas. A tira do degrau inferior deve ter largura igual ou maior que Δ . A tira do degrau superior deve ter largura maior que 12 cm. Observe que as pontas dos tubos não têm chanfros.

2. Controvérsias sobre uniões laminadas. Antes de iniciar o protocolo de dimensionamento das uniões laminadas, vamos esclarecer três pontos controversos sobre elas.

2.1. Uniformidade das tensões de cisalhamento: Essa controvérsia diz respeito à distribuição das tensões de cisalhamento na largura Δ da união. Nossa análise supõe que o adesivo das uniões laminadas trabalhe na região plástica, com tensões de cisalhamento uniformes ao longo da largura Δ . Essa situação é contestada por alguns autores, que aceitam tensões cisalhantes uniformes apenas em uniões curtas. Este argumento é verdadeiro e está correto. As tensões são uniformes apenas para larguras abaixo do valor eficaz descrito no livro “Cálculo estrutural de tubos e tanques”. O comprimento, ou largura, que exceder o valor eficaz simplesmente não é acionado e nele a tensão cisalhante é zero. Esse tópico está bem explicado no livro citado acima.

2.2. Proteção das pontas. As uniões laminadas são feitas justapondo as extremidades dos dois tubos e laminando sobre elas faixas de fibras de largura Δ . É sabido que a penetração de produtos agressivos é muito pequena na direção perpendicular ao plano das lâminas, isto é, na direção que é perpendicular às fibras e radial para os tubos. É sabido também que essa penetração é grande no plano das lâminas, ao longo das fibras. Alguns especialistas dizem que as fibras “chupam o produto agressivo” por capilaridade. De fato, não se trata disso, mas de difusão ao longo da interfase vidro-resina, como explicado na discussão do fenômeno “Cavalo de Troia” no capítulo 3 deste livro.

Podemos dizer que:

- A velocidade de penetração de produtos químicos na direção radial, perpendicular às fibras, é muito lenta. Isso é bom, porque dá grande durabilidade química aos itens de tubulação.
- A penetração de produtos químicos pelas pontas, no plano das fibras, é rápida.

Isso sugere que a profundidade penetrada por produtos agressivos nas pontas dos tubos pode ser grande. Essa é a justificativa para envelopar as pontas dos tubos, antes de executar a união laminada. As soluções seguintes são usadas para proteger as pontas de tubos nas uniões laminadas.

- 1 – Laminar barreira de corrosão clássica, com 2,5 mm de espessura, sobre as pontas expostas. Essa solução é conhecida como “envelopamento pleno das pontas”.
- 2 – Laminar apenas 1 véu de superfície, com 0,3 mm de espessura, sobre as pontas expostas. Essa solução é conhecida como “envelopamento parcial das pontas”.
- 3 – Deixar as pontas sem qualquer proteção. Essa é a minha recomendação.

O envelopamento pleno sem dúvida retarda a penetração de produtos agressivos nas pontas dos tubos. Porém, a prática mostra que esse envelopamento tem vida curta e não é necessário. A argumentação que segue explica isso.

Ao penetrar pelas pontas desprotegidas, os produtos agressivos atacam a resina e as fibras, que permanecem no local formando um escudo protetor. A profundidade penetrada é grande em relação à espessura, mas pequena quando comparada à largura Δ da união. Essa situação é ilustrada na figura abaixo, onde mostramos a profundidade penetrada por solução de NaOH a 80C em lâminas de fibras picadas sem proteção nas arestas.



Os produtos químicos penetram lentamente na direção perpendicular aos laminados. Porém, na direção paralela ao plano das lâminas essa penetração pode ser rápida. A penetração pelas pontas desprotegidas de tubos deve ser levada em conta ao calcular a largura Δ das uniões laminadas. A largura Δ deve ser aumentada para compensar essa penetração. Neste livro estamos propondo um aumento de $2 \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$ em Δ , para compensar a penetração de produtos químicos

Neste livro vamos assumir que a penetração em pontas desprotegidas não passe de 20 mm. Essa penetração pode ser compensada aumentando a largura da união em $2 \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$.

A prática não registra vazamentos de uniões laminadas causados por deterioração progressiva da resina. A deterioração nas pontas de tubos unidos sem envelopamento não deve ser causa de preocupação.

Nota: Essas observações sobre envelopamento valem apenas para tubos SEM núcleo de areia. Os tubos usados para transportar água e esgoto urbano geralmente são feitos com núcleos de areia, que podem trincar quando submetidos a manuseio rude. As pontas de tubos com núcleo de areia DEVEM ser envelopadas.

2.3 – Controvérsia sobre o chanfro externo. Alguns montadores de tubulações de compósito chanfram externamente as pontas dos tubos antes de executar as uniões laminadas. V. Figura 2. Esse chanfro externo, usado para soldar tubos de aço, não é necessário para tubos de compósitos.

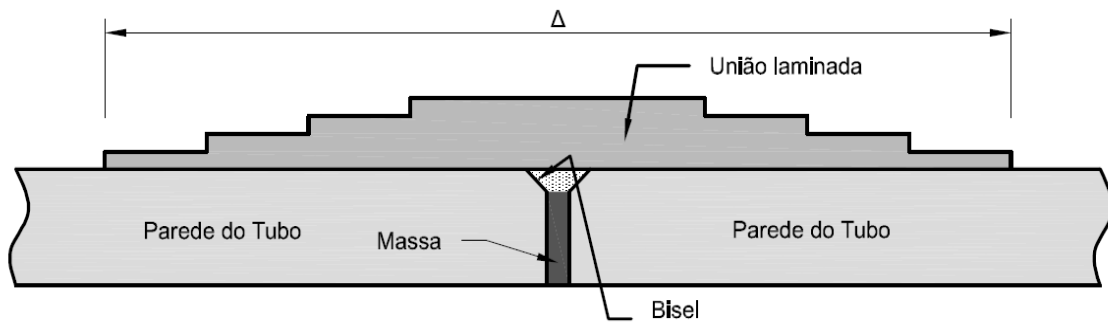


Figura 2
O chanfro externo facilita a soldagem de tubos de aço. Os tubos de compósito não são soldados como os de aço e não precisam ser chanfrados externamente. O chanfro externo, como mostrado na figura, não deve ser feito.

3 – Espessura t_u de uniões laminadas. A espessura das uniões laminadas é computada por dois critérios.

- Para ter rigidez axial igual à dos tubos. A espessura da união deve ser

$$t_u = \frac{E_x}{E_U} \times t_t$$

Onde

t_u é a espessura da união laminada

E_x é o módulo axial do tubo

E_x^U é o módulo axial da união
 t_t é a espessura do tubo.

As uniões devem ter essa espessura apenas nas linhas de emenda. Nos pontos afastados dessas linhas, essa espessura pode ser reduzida para formar a construção em degraus mostrada na figura 1.

O critério de rigidez é usado quando o módulo axial e a espessura dos tubos são conhecidos. Se a construção dos tubos não for conhecida, o projetista computa a espessura da união usando a pressão da linha e o diâmetro dos tubos. Isso nos leva ao critério de resistência.

- Para resistir aos esforços de tração axial. A espessura da união deve ser

$$t_U = \frac{N_x}{\epsilon_x \times E_x^U}$$

Onde N_x é a força axial e ϵ_x é o alongamento admissível.

A força axial N_x é computada levando em conta as cargas térmicas, os momentos fletores e a pressão interna na linha.

$$t_U = \frac{\left(\frac{M_x}{\pi R^2 t} + \alpha_x \Delta T + \frac{PD}{4} \right)}{\epsilon_x \times E_x^U}$$

Se o momento fletor e a dilatação térmica forem ignorados, a espessura da união para resistir à pressão interna P na linha é

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times \epsilon_x \times E_x^U}$$

A fórmula acima indica que as espessuras das uniões laminadas variam diretamente com a pressão e com o diâmetro das linhas. Os tubos de grandes diâmetros trabalhando com altas pressões podem ter uniões com espessuras muito grandes. Para evitar isso, elas podem ser feitas com lâminas de alto módulo, usando fibras UD ou tecidos T800.



Aplicando tira de tecido T800 na união laminada. As uniões laminadas são feitas em degraus com pares MT de tecido T800 e de manta M450. Os pares MT têm espessura padrão 1,90 mm, sendo laminados colocando as tiras mais largas por baixo.

3.3 – Espessura da união por critério de rigidez circunferencial. A rigidez circunferencial é ignorada nas publicações que tratam de uniões laminadas. Mas, essa rigidez é importante quando consideramos essas uniões como reparos estruturais de danos passantes. Para evitar descascamento na linha de emenda, os reparos estruturais de danos passantes devem ter rigidez circunferencial maior que a dos substratos, isto é, maior que a dos tubos. Vamos explicar isso.

A pequena lacuna, ou “gap”, entre as pontas justapostas dos tubos pode ser interpretada como “dano estrutural passante” na tubulação. Nas condições normais de operação esse “gap” é muito pequeno, podendo ser ignorado. Mas, se o ambiente destruir as pontas dos tubos, a pressão interna pode causar trincas do tipo I, como mostra a figura 3.

Na figura 3 vemos a pressão interna P atuando diretamente sobre um “gap” de 40 mm na união. Essa condição pode causar trincas do tipo I na linha de colagem. Vimos na seção anterior que o ambiente agressivo pode penetrar e destruir até 20 mm de cada lado nas pontas dos tubos, deixando na união um “gap” de $2 \times 20 = 40$ mm diretamente exposto à pressão interna P.

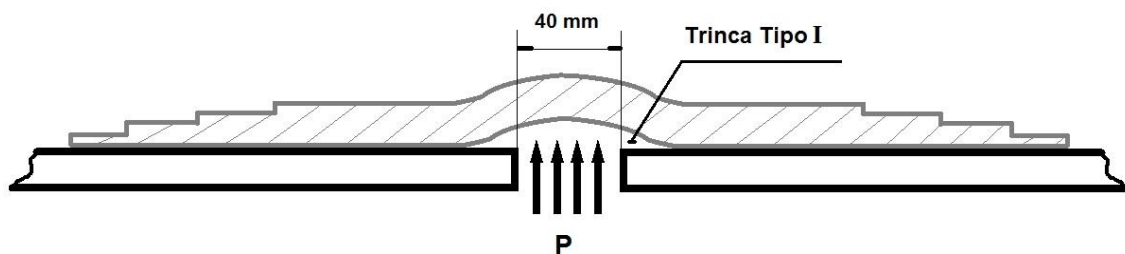


Figura 3

Se o ambiente for muito agressivo e destruir as pontas dos tubos, a pressão P atua numa faixa de grande extensão, causando trincas do tipo I na linha de colagem. Essas trincas podem ser evitadas aumentando a rigidez circunferencial da união neste local.

A pressão P expande a união laminada, crescendo trincas do tipo I na linha de colagem. Para evitar isso, a rigidez circunferencial da união deve ser aumentada nessa faixa exposta, que estamos supondo ter largura 40 mm. A rigidez deve ser aumentada apenas no local da linha de emenda, para cobrir a faixa de 40 mm, que supostamente pode ser destruída pelo ambiente agressivo.

Assim, a rigidez circunferencial da união deve ser incrementada numa faixa de largura 40 mm (4 cm), bem centrada na linha da emenda. Esse incremento local de rigidez pode ser feito laminando tiras de fibras UD90 na faixa de largura 40 mm, por fora da união, na direção circunferencial. A espessura da faixa de reforço feita com fibras UD deve ser

$$E_y^s \times t_s = E_y^U \times t_U + E_y^{UD} \times t_{UD}$$

Onde

E_y^s é o módulo do tubo na direção circunferencial

E_y^U é o módulo da união na direção circunferencial

E_y^{UD} é o módulo do laminado UD90 na direção circunferencial

t_s é a espessura do tubo

t_U é a espessura da união laminada

t_{UD} é a espessura do reforço UD90

A espessura do laminado UD90, para dar a rigidez circunferencial necessária, é

$$t_{UD} = \frac{E_y^s \times t_s - E_y^U \times t_U}{E_y^{UD}}$$

O laminado UD90 pode ser feito com fibras UD de vidro ou de carbono. Veja a figura 4. A largura da faixa de fibras UD, já dissemos, deve ser maior que 40 mm.

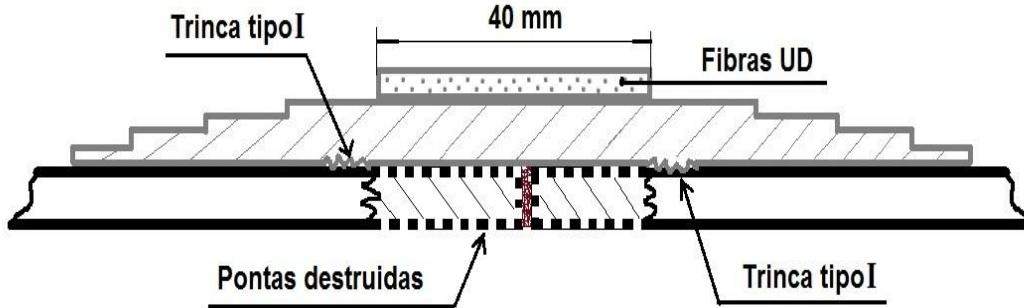


Figura 4

Se o ambiente for muito agressivo, a união laminada deve ser reforçada por fora com uma faixa de fibras UD de 40 mm de largura. Essa faixa de alta rigidez impede vazamento causado por trincas tipo I. Veja detalhes no texto

4 – Largura Δ de uniões laminadas. A largura total Δ é dimensionada para transferir por cisalhamento os esforços axiais de um tubo para o outro. A largura total Δ pode ser computada usando dois critérios:

- Para ter resistência axial igual à dos tubos

Por esse critério, a largura total Δ da união deve ser

$$\Delta = \frac{2 \times E_x \times \epsilon_x \times t \times CS}{\tau}$$

Onde

$\tau = 140 \text{ kg/cm}^2$ é a resistência ao cisalhamento secundário

$CS = 10$ é o coeficiente de segurança para cargas permanentes

Δ é a largura total da união

E_x é o módulo axial do tubo

t é a espessura do tubo

ϵ_x é o alongamento admissível.

O alongamento admissível pode ser o umbral de infiltração ou o umbral de exudação, dependendo de o produto transportado ser ou não agressivo. Para aplicar esse critério é preciso conhecer o módulo axial e a espessura dos tubos.

- Para resistir à carga axial atuante na linha

Quando a construção dos tubos não for conhecida, a largura total da união é determinada para resistir a força axial N_x atuante na linha.

$$\Delta = \frac{2 \times N_x}{\tau} \times CS$$

Onde N_x é a força axial por unidade de comprimento, computada levando em conta a dilatação térmica, as tensões de flexão e a pressão na linha.

$$N_x = \left(\frac{M_x}{\pi R^2 t} + \alpha_x \Delta T + \frac{PD}{4} \right)$$

Se a força axial resultar apenas de pressão interna, temos

$$\Delta = \frac{P \times D \times CS}{2 \times \tau}$$

A tabela 3 resume essas considerações

	Rigidez igual à do tubo	Resistência igual à do tubo	Resistir à carga axial atuante
Espessura da união	$t_U = \frac{E_x}{E_x^U} \times t_s$	-----	$t_U = \frac{P \times D}{4 \times \epsilon_x \times E_x^U}$
Largura da união	-----	$\Delta = \frac{2 \times E_x \times \epsilon_x \times t \times CS}{\tau}$	$\Delta = \frac{P \times D}{2 \times \tau} \times CS$

Tabela 3

Espessuras e larguras de uniões laminadas

Exemplo 1. Determinar os valores mínimos da espessura e da largura de uniões laminadas para tubos comerciais usados em produtos agressivos. Supor $\epsilon_x = 0,001$, $\tau = 140 \text{ kg/cm}^2$ e $CS = 10$.

Note que nenhuma informação é dada sobre a construção dos tubos. Portanto, vamos usar as equações que levam em conta os diâmetros e as pressões atuantes na linha.

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times \epsilon_x \times E_x^U}$$

Se as uniões forem feitas unicamente com fibras picadas

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times 0,001 \times 70000} = 0,0036 \times P \times D$$

Se as uniões forem feitas unicamente com tecido T800

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times 0,001 \times 190000} = 0,0013 \times P \times D$$

Se as uniões forem feitas com pares MT

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times 0,001 \times 115000} = 0,0022 \times P \times D$$

Como vemos, a espessura das uniões laminadas cai significativamente quando usamos lâminas de tecido T800.

A largura total das uniões é calculada pela expressão

$$\Delta = \frac{P \times D \times CS}{2 \times \tau}$$

Substituindo $\tau = 140 \text{ kg/cm}^2$ e $CS = 10$ na equação acima, obtemos

$$\Delta = \frac{P \times D \times 10}{140}$$

$$\Delta = 0,0714 \times P \times D$$

Como explicado no livro “Cálculo estrutural de tanques e tubos”, larguras Δ maiores que os valores eficazes são inoperantes. Portanto, a largura calculada pela expressão acima não pode exceder o valor eficaz.

A tabela 4 resume isso

<i>Construção da união</i>	<i>Espessura mínima</i>	<i>Largura mínima</i>
<i>Mantas</i>	$t_u = 0,0036 \times P \times D$	$\Delta = 0,0714 \times P \times D$ $\Delta < \text{valor eficaz}$
<i>Tecidos T800</i>	$t_u = 0,0013 \times P \times D$	
<i>Pares MT</i>	$t_u = 0,0022 \times P \times D$	

Tabela 4

Tabela válida para resistência ao cisalhamento $\tau = 140 \text{ kg/cm}^2$, alongamento admissível $\epsilon_x = 0,10\%$ e coeficiente de segurança $CS = 10$. Os módulos das lâminas foram extraídos do livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos”. Nas equações acima, a pressão P entra em kg/cm^2 , o diâmetro D em mm e a espessura em mm.

Supondo que os produtos químicos penetrem 20 mm em cada ponta, a largura da união deve ser aumentada em $2 \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$ para compensar essa penetração. Assim, as larguras Δ calculadas pelas fórmulas anteriores devem ser aumentadas em 40 mm se a tubulação trabalhar em ambientes agressivos.



Vista interna de união laminada após vários anos de uso em planta de celulose. Observe a penetração do ambiente e a destruição das pontas não envelopadas. Estamos admitindo que a destruição da ponta não exceda 20 mm. Essa destruição deve ser levada em conta no cálculo da largura Δ .

5 – Execução de uniões laminadas. Vamos mostrar como fazer uniões laminadas. O método descrito considera a construção em degraus, com as faixas mais largas aplicadas por baixo. A espessura t_u e a largura total Δ das uniões são conhecidas. O protocolo de execução é como segue:

- *As extremidades são cortadas perpendicularmente ao eixo axial “x” dos tubos.*
- *As extremidades são lixadas externamente para receber a união. A largura da faixa lixada em cada ponta deve ser ligeiramente maior que $\Delta/2$, onde Δ é largura total da união.*
- *As pontas dos tubos são cobertas com resina aplicada com pincel. Alguns especialistas recomendam o envelopamento das pontas. Sobre isso, veja o que dissemos antes.*
- *As pontas são cobertas com massa de resina e aerosil, devidamente ativada para curar na temperatura ambiente. A aplicação da massa é feita com espátula, como mostra a figura 5.*
- *As pontas são justapostas e os tubos alinhados e firmados um contra o outro. A massa expelida nessa operação é removida antes de curar. A massa retida enche a fresta na linha de corte. Essa massa descola das pontas quando o tubo é colocado em operação e não serve para retardar a penetração do ambiente agressivo. Mas ela uniformiza a transferência de cargas de compressão.*
- *Os tubos devem permanecer imobilizados com grampos durante a laminação e a cura da resina. Se a imobilização não puder ser feita por meios externos, o laminador pode aplicar pedaços de manta impregnados com resina ativada para cura rápida, aplicados em pontos equidistantes ao longo da circunferência da emenda. Ao curar, esses retalhos de manta imobilizam as peças. A figura 6 mostra isso. Os tubos de grande diâmetro podem exigir*

- vários pontos para imobilização. Alguns montadores fazem a imobilização com adesivo estrutural em lugar dessas tiras de manta.
- A laminação pode ser iniciada assim que as pontas forem imobilizadas. A primeira coisa a fazer é cobrir as áreas lixadas com resina aplicada com rolo ou pincel.
 - Em seguida é aplicada a primeira faixa da união, o liner, com largura mínima igual a 5 cm.
 - Sobre o liner é aplicada a primeira tira de manta da faixa inferior, com largura Δ , bem centrada sobre a linha de corte. Essa lâmina, como todas as outras, deve ser roletada com esmero para expelir o ar oculto.
 - A segunda tira de manta vem em seguida. A laminação segue assim, alternando lâminas de tecido e de mantas até completar a união. As lâminas mais largas são colocadas por baixo e a laminação termina com as lâminas mais estreitas.
 - O comprimento das tiras deve ser suficiente para sobrepor 5 cm na direção circunferencial.
 - A laminação deve ser escalonada na direção circunferencial para evitar calombos na superposição das tiras.
 - As tiras de mantas e de tecidos geralmente são aplicadas secas e impregnadas na emenda. Como opção, elas podem ser impregnadas antes da aplicação. Dependendo do diâmetro do tubo é possível impregnar até 3 pares MT (6 tiras) por vez.
 - Finalizando, a união deve ser coberta com véu de superfície ou com topcoat parafinado.

O protocolo acima supõe que as lâminas (tiras) sejam aplicadas uma por vez. De fato, isso não é necessário. Apenas o véu e as duas primeiras lâminas de manta devem ser aplicados assim, uma por vez. As demais tiras podem ser pre-impregnadas e aplicadas em grupos construídos com lâminas de manta M, lâminas de tecido T ou pares alternados MT. Em tubos de grande diâmetro e submetidos a grande pressão, a união pode ser feita unicamente com lâminas UD.

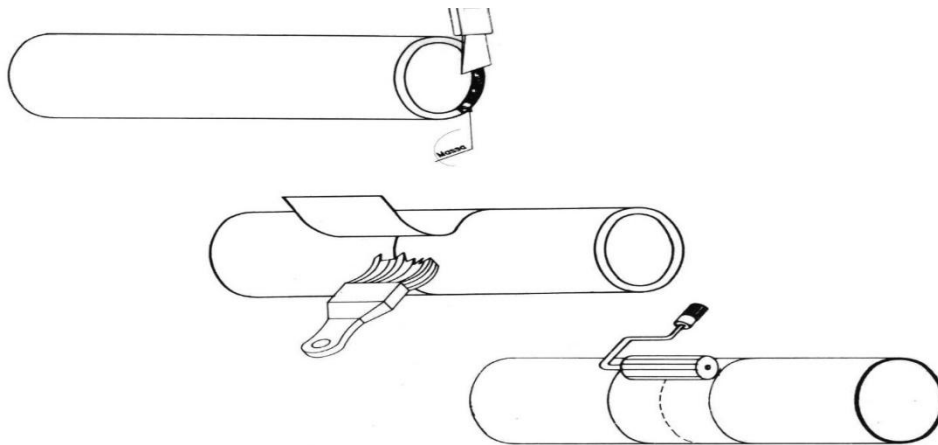


Figura 5
Mostra o emassamento das pontas dos tubos e a laminação da primeira tira de véu.

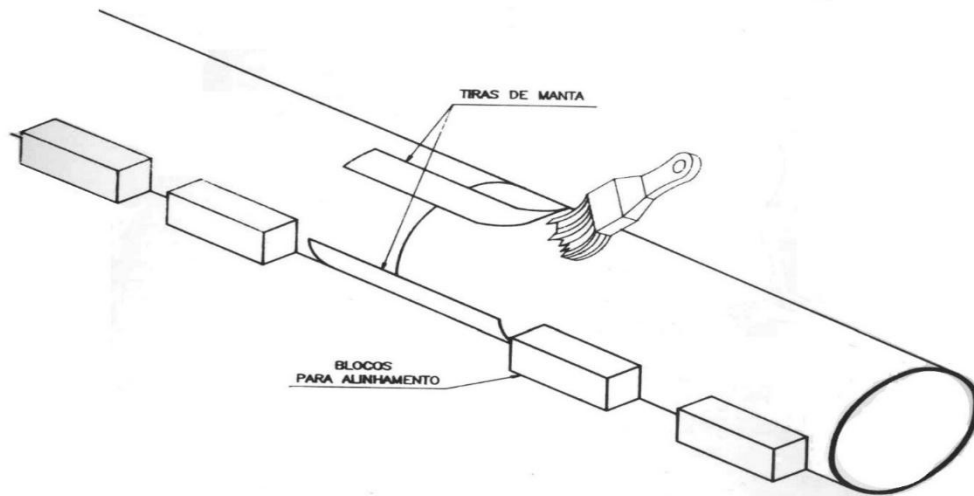


Figura 6

Os tubos devem permanecer imobilizados durante a laminação e cura da resina. A imobilização pode ser feita com tiras de mantas ativadas para cura rápida. Alguns montadores imobilizam os tubos com adesivo estrutural.

Exemplo 3. Dimensionar a união laminada de uma tubulação trabalhando nas condições seguintes.

Dados dos tubos

$D = 3\ 000\text{ mm}$ (Diâmetro do tubo)

$E_y = 160\ 000\text{ kg/cm}^2$ (Módulo circunferencial do tubo)

$E_x = 120\ 000\text{ kg/cm}^2$ (Módulo axial do tubo)

$t_t = 19,0\text{ mm}$ (Espessura do tubo)

$P = 2\text{ kg/cm}^2$ (Pressão de projeto)

$\epsilon_x = \epsilon_y = 0,001$ (Alongamento admissível)

Dimensionamento da espessura para a união ter rigidez axial igual à do tubo

$$t_U = \frac{E_x}{E_x^U} \times t_t$$

Supondo a união feita com pares MT

$$E_x^U = 115\ 000\text{ kg/cm}^2$$

$$E_y^U = 123\ 000\text{ kg/cm}^2$$

$$t_U = \frac{120\ 000}{115\ 000} \times 19 = 20,0\text{ mm}$$

Essa é a espessura mínima para a união laminada. Ela pode ser feita com 10 pares MT.

Supondo a união feita unicamente com tecido T800

$$E_x^U = 170\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_y^U = 190\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_U = \frac{120\,000}{170\,000} \times 19 = 14,0 \text{ mm}$$

Essa espessura pode ser obtida com 16 lâminas de tecido T800

Dimensionamento da espessura para a união resistir à carga axial atuante no tubo

$$t_U = \frac{P \times D}{4 \times \epsilon_x \times E_x^U}$$

Supondo a união feita com pares MT

$$E_x^U = 115\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_U = \frac{4 \times 3000}{4 \times 0,001 \times 115\,000} = 26,0 \text{ mm}$$

Essa é a espessura mínima para a união laminada. Ela pode ser feita com 14 pares MT, que tem espessura 26,6 mm.

Supondo a união feita unicamente com tecido T800

$$E_x^U = 170\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_U = \frac{4 \times 3000}{4 \times 0,001 \times 170\,000} = 17,6 \text{ mm}$$

Essa espessura pode ser obtida com 21 pares de T800

Largura da união laminada para ter resistência axial igual à da linha.

$$\Delta = \frac{2 \times E_x \times \epsilon_x \times t \times CS}{\tau}$$

Onde $\tau = 140 \text{ kg/cm}^2$ é a resistência ao cisalhamento secundário e $CS = 10$ é o coeficiente de segurança para cargas permanentes.

$$\Delta = \frac{2 \times 120\,000 \times 0,001 \times 19 \times 10}{140} = 326 \text{ mm}$$

Essa é a largura total da união para ela ter resistência axial igual à da linha, com $CS = 10$. Será que as tensões cisalhantes são constantes nela? Para responder essa pergunta, usamos a fórmula para calcular a largura eficaz, deduzida no livro “Cálculo estrutural de tanques e tubos”.

Largura da união para resistir à carga axial atuante na linha.

Se a força axial resultar apenas da pressão interna, temos

$$\Delta = \frac{P \times D \times CS}{2 \times \tau}$$

$$\Delta = \frac{4 \times 300 \times 10}{2 \times 140} = 43 \text{ cm} = 430 \text{ mm}$$

A tabela 3A resume os resultados obtidos

	Rigidez igual à do tubo	Resistência igual à do tubo	Resistir à carga axial atuante
Espessura da união	$t_U = 20 \text{ mm}$	-----	$t_U = 26 \text{ mm}$
Largura da união	-----	$\Delta = 326 \text{ mm}$	$\Delta = 430 \text{ mm}$

Tabela 3A

Espessuras e larguras da união laminada do exemplo 3, feita com pares MT

As uniões laminadas são muito usadas para ligar tubulações de compósitos. As grandes vantagens oferecidas por elas são confiabilidade e resistência. Existe, porém, uma deficiência nessas ligações, que é o fato delas não serem desmontáveis. Nos pontos onde a linha precisar ser desmontada, as uniões são feitas com flanges.

6 - Uniões com flanges. Essas uniões são usadas onde a linha precisa ser desmontada, ou para fazer ligações com peças metálicas. Os flanges de compósitos são fabricados com face plana e furação ASA 150 psi. A vedação é feita com junta de espessura 3,2 mm, de face cheia e dureza 60 - 70 shore A. Muitas vezes os flanges de compósitos são conectados a equipamentos ou tubulações metálicas de faces ressaltadas. Nesses casos, os flanges metálicos devem ser usinados para eliminar o ressalto ou então adaptados com anéis niveladores para reproduzir a condição de face plana necessária para conectar com flanges de compósitos.

O torque para apertar os parafusos dos flanges de compósitos depende da dureza da junta, do diâmetro do flange e da pressão da linha. As juntas macias deformam muito quando comprimidas e essa deformação pode forçar o pescoço do flange. Por isso, as uniões flangeadas que operam em altas pressões e exigem grande aperto nos parafusos, devem usar juntas rígidas, que absorvem torques elevados com pouca deformação. Portanto, para maior segurança, o melhor é usar junta mais dura, de dureza 70 shore A. A tabela 53 mostra os torques recomendados para apertar os parafusos em flanges de compósitos com juntas de dureza 70 shore A.

Diâmetro Polegadas	Classe de pressão (PSI)					
	25	50	75	100	125	150
2	25	25	25	25	25	25

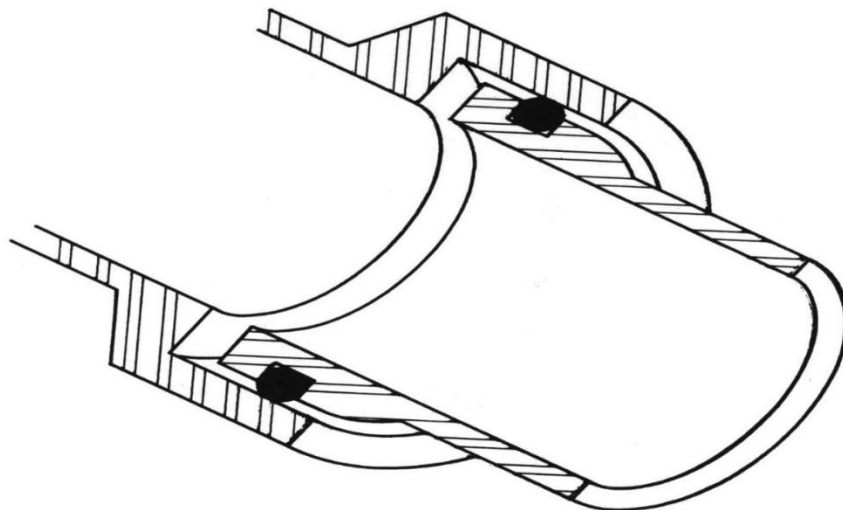
3	25	25	25	25	25	25
4	25	25	25	25	25	25
6	25	25	25	25	35	40
8	25	25	30	40	50	60
10	25	25	30	40	50	70
12	25	25	35	45	60	80
14	25	30	40	60	75	100
16	25	30	50	70	80	
18	30	35	50	80	100	
20	30	35	60	90		
24	35	40	70			

Tabela 5

Torque para aperto de flanges de compósito com junta 70 shore A (ft x lb). Torques excessivos podem trincar o pescoço dos flanges.

7 - União adesivada. Esse tipo de união é usado na indústria de óleo e gás para ligar tubos de pequeno diâmetro. As tubulações para ambientes agressivos não usam essas uniões.

8 - União ponta e bolsa com elastômero. Essas uniões são usadas em tubulações enterradas para transportar produtos não agressivos, como água ou esgoto urbano. Os tubos de compósitos são ligados usando anel de vedação labial,



As uniões ponta e bolsa com anel são usadas em tubos enterrados que transportam água ou esgoto urbano. Essas uniões não são usadas para transportar produtos químicos agressivos.

9 - Luva com elastômero. As uniões tipo luva usam tubos de ponta lisa e dois anéis de vedação. Esse tipo de ligação é uma variante das uniões ponta e bolsa com anel.

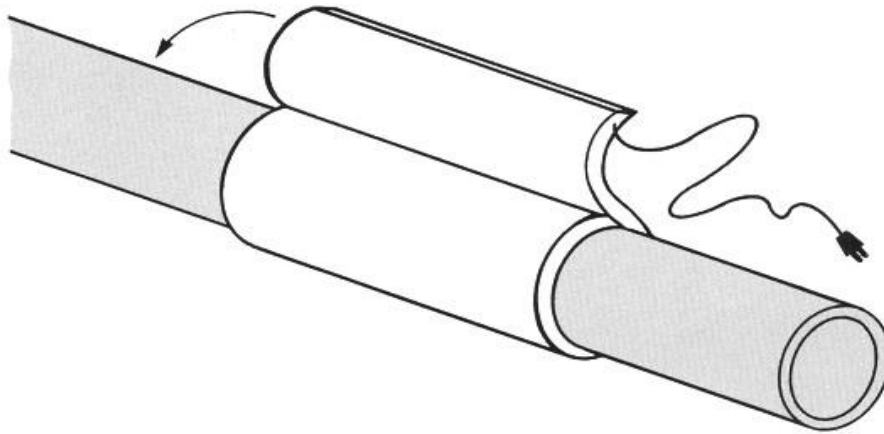
A tabela 4 compara algumas ligações usadas para unir tubos e dutos de compósitos.

<i>Tipo de ligação</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Roscada</i>	<i>Resiste esforços axiais Confiável Fácil montagem e desmontagem Resiste altas pressões</i>	<i>Alto custo Apenas pequenos diâmetros</i>
<i>Adesivada</i>	<i>Baixo custo Alta resistência Resiste esforços axiais</i>	<i>Apenas pequenos diâmetros Não desmontável Aplicação do adesivo</i>
<i>Flangeada</i>	<i>Alta resistência Desmontável Resiste esforços axiais</i>	<i>Alto custo Torque excessivo pode danificar o flange</i>
<i>Labial ou anel</i>	<i>Flexível Acomoda recalques Usada em tubulações enterradas</i>	<i>Não resiste esforços axiais</i>
<i>Laminada</i>	<i>Alta resistência Confiável Resiste esforços axiais</i>	<i>Não desmontável Exige perícia do montador</i>

*Tabela 4
Compara ligações de tubos e dutos de compósitos*

10 - Teste de linhas montadas. Depois de montadas, as linhas são testadas para verificar a qualidade do serviço. Geralmente o teste é feito submetendo a linha cheia de água, à pressão de operação, ou um pouco acima dela, durante 1 hora. O tempo de espera para iniciar o teste, após a montagem, depende da temperatura ambiente e do tipo de união. Por exemplo, nas linhas ligadas por uniões laminadas, é necessário esperar a resina curar antes de aplicar a pressão de teste.

Se a linha tiver uniões laminadas e a temperatura ambiente for muito baixa (abaixo de 15°C) o tempo de espera pode ser longo. Nesses casos, a cura da resina pode ser acelerada usando cobertor térmico. Se não for possível usar cobertor térmico, a espera deve ser suficiente para a resina alcançar a dureza Barcol adequada. As linhas com ligações flangeadas, ponta e bolsa com elastômero, ou roscadas, que não usam resina nem adesivo, podem ser testadas imediatamente após a montagem.



As uniões laminadas demoram para curar em baixas temperaturas. Para acelerar o processo, elas podem ser aquecidas com mantas térmicas.

As vibrações de pequena magnitude, geradas pela operação de bombas ou de outros equipamentos, não afetam a durabilidade dos compósitos e podem ser ignoradas. A única precaução nesse caso é a proteção dos locais de apoio para evitar desgaste por abrasão. Se as vibrações forem grandes, guias adicionais podem ser instalados, para mudar a frequência de vibração da linha. Como alternativa, a fonte de vibração pode ser isolada com ligações flexíveis.

11 - Montagem de dutos. Dutos são tubos de parede fina, geralmente usados para transportar gases sem pressão. As técnicas de montagem de dutos não diferem das usadas para tubos. As ligações são geralmente feitas com uniões laminadas ou com flanges. Os apoios são também do mesmo tipo, com atenção especial à menor rigidez dos dutos em relação à dos tubos. Os dutos são mais suscetíveis que os tubos à instabilidade e, por isso, devem ser criteriosamente analisados para suportar pressões negativas (vácuo) e compressões axiais oriundas de dilatação térmica ou de momentos fletores.

Vimos nas seções anteriores que as tubulações de compósitos acomodam expansões térmicas, sem precisar de juntas de expansão. Porém, para os dutos de parede fina isso não pode ser feito sem antes conferir a estabilidade axial deles.

CAPÍTULO 14

O ensaio de queima

1 – Introdução. O capítulo 5 tratou da inspeção e da aceitação de equipamentos recém-construídos. Nele descrevemos os ensaios, os defeitos de fabricação e os critérios de aceitação. Porém, uma importante questão ficou sem resposta....

Qual é a capacidade estrutural do equipamento recém-construído? Que cargas ele é capaz de suportar com segurança?

Para responder essa pergunta, o inspetor precisa conhecer a espessura do laminado, o módulo de elasticidade e o alongamento admissível para a aplicação. O alongamento admissível é estabelecido em norma, ou arbitrado pelo projetista. A espessura pode ser obtida com paquímetro.

O módulo de elasticidade pode ser medido de duas maneiras.

- **Ensaio de tração.** *Esse é o método tradicional. A medição é feita ensaiando em laboratório corpos de prova extraídos do equipamento. Essa determinação é demorada, complexa, cara e muitas vezes dá resultados errados.*
- **Ensaio de queima.** *Esse ensaio é executado pelo fabricante em suas instalações, sem máquinas complexas e sem a preparação de corpos de prova. O ensaio consiste em queimar pedaços do equipamento para medir os teores de materiais contidos nele. As propriedades mecânicas são determinadas a partir desses teores. Essa determinação é rápida, simples, não tem custo e sempre dá resultados exatos.*

O livro “Propriedades Mecânicas dos Compósitos” foi escrito para eliminar as intermináveis discussões e as enormes incertezas sobre as propriedades mecânicas dos compósitos. Nele, o leitor encontra métodos simples para determinar os valores corretos e confiáveis das propriedades essenciais dos compósitos. Essas propriedades servem para projetar equipamentos novos e para analisar equipamentos existentes. Essa façanha é alcançada de maneira muito simples, usando as propriedades de lâminas padrão, amplamente reconhecidas e aceitas, em lugar das especificadas ou arbitradas por outras autoridades.

O uso de propriedades padrão traz de imediato todos os benefícios citados acima, além de facilitar a vida de projetistas, analistas e fabricantes desses equipamentos. Os projetistas e os analistas trabalham com propriedades mecânicas confiáveis, praticamente exatas. O fabricante se preocupa apenas em controlar a quantidade de fibras por unidade de área dos equipamentos. A quantidade de resina e a espessura final do laminado deixam de ter importância, desde que ele use as quantidades de reforço estabelecidas no projeto.

Para conhecer a capacidade estrutural de um determinado equipamento, o inspetor faz apenas duas medições:

- *A espessura do laminado, medida com paquímetro ou régua graduada em mm.*
- *Os teores das matérias primas, medidos no ensaio de queima.*

O conhecimento dessas grandezas permite ao inspetor determinar com confiança o módulo de elasticidade real do laminado e a capacidade estrutural do equipamento. Tudo isso feito sem custo, com rapidez e sem requerer ensaios mecânicos.

2 – Benefício das propriedades padrão. O que segue é uma argumentação a favor do uso das propriedades padrão das lâminas para determinar as propriedades mecânicas de laminados.

2.1 – Benefício ao comprador. O comprador simplesmente informa as dimensões dos equipamentos, as cargas atuantes e a norma de fabricação desejada. O resto é problema do projetista, do fabricante e do inspetor.

2.2 – Benefício ao projetista. O projetista usa as propriedades padrão, amplamente conhecidas e aceitas, para determinar a espessura do laminado. Em seguida ele especifica, para a espessura calculada, a quantidade de fibras por unidade de área. Essa quantidade deve ser controlada fielmente pelo fabricante, para assegurar o sucesso estrutural do equipamento.

2.3 – Benefício ao fabricante. A única preocupação do fabricante é com o controle da quantidade de fibras especificada pelo projetista. Esse controle é feito pela quantidade de lâminas, ou pela calibração das máquinas usadas na produção. A quantidade de resina e a espessura final do laminado produzido deixam de ser preocupação para o fabricante.

O fabricante simplesmente controla as quantidades de fibras por unidade de área, de acordo com os valores especificados pelo projetista. A quantidade de resina é decidida por ele, como melhor lhe aprouver. Alguns usam excesso de resina para aumentar a velocidade do processo. Outros preferem usar pouca resina, para reduzir custo.

2.4 – Benefício ao inspetor. O inspetor mede a espessura do laminado e os teores de fibras. Com essas informações ele computa as propriedades do laminado e estabelece, de imediato e com confiança, a capacidade estrutural do equipamento. Tudo isso sem fazer um único ensaio mecânico.

A medição dos teores de fibras é feita usando um simples e rápido ensaio de queima.

3 – O ensaio de queima. O ensaio de queima é exato, simples, rápido e tem custo irrisório.

3.1 – Significado. Esse ensaio mede os teores e as quantidades de matérias primas por unidade de área de equipamentos. Com essas informações, o inspetor pode computar os módulos de elasticidade, as relações de Poisson e os coeficientes de dilatação. Medindo a espessura, ele pode computar também a capacidade estrutural dos equipamentos.

O ensaio é feito queimando corpos de prova extraídos de equipamentos. As dimensões dos corpos de prova devem ser as maiores possíveis, compatíveis com o tamanho dos cadinhos de queima. A maioria dos ensaios usa corpos de prova quadrado, de dimensões entre 50 mm e 80 mm.

Nota: Nos equipamentos de grande espessura, os corpos de prova podem ser partidos em duas ou mais partes, de espessura menor.

O número de corpos de prova não precisa ser grande. A queima de apenas um corpo de prova é suficiente para dar boa definição ao laminado. Se mais de um corpo de prova for queimado, os resultados devem ser expressos como a média aritmética das medições.

3.2 – Equipamentos para execução do ensaio de queima

- *Mufra para receber cadinho de diâmetro até 10 cm*
- *Cadinho ou prato cerâmico com diâmetro entre 8 cm e 10 cm*
- *Balança analítica com capacidade para 1000 gramas*
- *Pinça para separação das fibras*
- *Transferidor para medir o ângulo de orientação das fibras UD*
- *Paquímetro para medir a espessura do corpo de prova*
- *Régua para medir as dimensões do corpo de prova*

3.3 – Preparação para o ensaio

- *Aquecer a mufra para temperatura entre 700 C e 800 C*
- *Cortar corpos de provas retangulares com dimensões entre 50 mm e 80 mm. Uma das arestas do corpo de prova deve ser cortada paralela ao eixo longitudinal do laminado, para facilitar a medição do ângulo das fibras UD.*
- *Limpar e secar o corpo de prova*

3.4 – Procedimento

- *Medir as dimensões e computar a área superficial do corpo de prova*
- *Medir a espessura do corpo de prova*
- *Pesar o cadinho vazio*
- *Pesar o cadinho com o corpo de prova*
- *Colocar na mufra aquecida o cadinho com o corpo de prova*
- *Esperar a queima completa da resina. Isso pode demorar algumas horas, dependendo da espessura do corpo de prova e da temperatura da mufra.*

- *Pesar o cadinho contendo os resíduos de fibras de vidro*
- *Medir com transferidor os ângulos formados pelas fibras UD com o eixo longitudinal do laminado*
- *Separar com pinça, para pesagem individual, os resíduos de fibras picadas e de fibras UD.*
- *Pesar individualmente o cadinho contendo os resíduos de fibras picadas, fibras UD, etc.*

3.5 – Cálculo dos teores por peso. *O conhecimento dos teores por peso permite determinar os módulos de elasticidade do equipamento*

Peso do corpo de prova (CP)

$$CP = (\text{Peso cadinho} + CP) - (\text{Peso cadinho})$$

Teor de resina (res)

$$(\text{res}) = \frac{(\text{Peso cadinho} + CP) - (\text{Peso cadinho} + \text{resíduos})}{CP}$$

Teor de fibras picadas

$$(\text{pic}) = \frac{(\text{Peso cadinho} + \text{Fibras picadas}) - (\text{Peso cadinho})}{CP}$$

Teor de fibras UD

$$(\text{UD}) = \frac{(\text{Peso cadinho} + \text{Fibras UD}) - (\text{Peso cadinho})}{CP}$$

3.6 – Cálculo das quantidades de matérias primas por unidade de área. *As quantidades de matérias primas por unidade de área são úteis para o fabricante, que as compara com os valores especificados pelo projetista. Esse conhecimento é usado pelo fabricante para controle do processo. Os fabricantes devem informar esses dados de projeto aos compradores.*

Peso de resina por unidade de área

$$\left[\begin{array}{cc} \text{peso} & \text{resina} \\ \text{unidade} & \text{área} \end{array} \right] = \frac{(\text{res}) \times (CP)}{\text{Área do CP}}$$

Peso de fibras picadas por unidade de área

$$\left[\begin{array}{cc} \text{peso} & \text{picadas} \\ \text{unidade} & \text{área} \end{array} \right] = \frac{(\text{pic}) \times (CP)}{\text{Área do CP}}$$

Peso de fibras UD por unidade de área

$$\left[\begin{array}{cc} \text{peso} & \text{UD} \\ \text{unidade} & \text{área} \end{array} \right] = \frac{(\text{UD}) \times (CP)}{\text{Área do CP}}$$

4. Relatório. *O relatório deve conter todas as medições feitas no ensaio*

- *Teores por peso das matérias primas*
- *Pesos das matérias primas por unidade de área*

- Espessura do corpo de prova
- Área superficial do corpo de prova
- Ângulos formados pelas fibras UD com o eixo longitudinal do corpo de prova

Apêndice 1

Computação das propriedades do laminado

Os teores de fibras e de resina são usados para computar as propriedades do laminado nas direções axial “x” e circunferencial “y” do equipamento. As propriedades obtidas com os teores medidos são precisas e confiáveis.

As propriedades padrão das lâminas UD dependem do ângulo formado entre as fibras e o eixo longitudinal (eixo x) do equipamento. A tabela 1 mostra essa variação

Propriedade	UD55 (filament winding)	UD70 (filament winding)	UD90 (Hoop-chop)	UD0 (Pultrusão)
E_x (kg/cm ²)	96 300	92 800	100 000	400 000
E_y (kg/cm ²)	170 800	298 200	400 000	100 000
ν_{xy} (----)	0,39	0,18	0,08	0,30
ν_{yx} (----)	0,70	0,59	0,30	0,08
G_{xy} (kg/cm ²)	101 200	66 000	35 000	35 000
α_x (1/°C)	$32,6 \cdot 10^{-6}$	$40,6 \cdot 10^{-6}$	$45,0 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
α_y (1/°C)	$19,9 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$45,0 \cdot 10^{-6}$
α_{xy} (1/°C)	$\pm 32,5 \times 10^{-6}$	$\pm 24,0 \times 10^{-6}$	0	0
β_x	0,13	0,12	0,18	0,04
β_y	0,09	0,09	0,04	0,18
β_{xy}	$\pm 0,13$	$\pm 0,09$	0	0

Tabela 1
Propriedades das lâminas UD padrão nas direções “x” e “y”

1 – Densidade. A densidade do laminado é obtida em função do teor de resina.

$$[Densidade] = \frac{3,12}{1,20 + 1,40(res)} \text{ g/cm}^3$$

2 – Secura K. A secura do laminado mede a diferença entre a quantidade de resina real, presente no laminado, e a quantidade padrão idealizada pelo projetista. A secura indica apenas se o laminado contém mais ou menos resina que a quantidade padrão, não servindo como indicador de qualidade.

$$K = (res) - \left[\frac{3}{7}(UD) + \frac{7}{3}(pic) + \frac{2}{8}(areia) \right]$$

Se $K > 0$, o laminado tem excesso de resina. Se $K < 0$, ele é seco em relação ao padrão.

3 – Módulos nas direções “x” (longitudinal) e “y” (circunferencial). Todos os módulos do laminado, inclusive o de cisalhamento, são obtidos com grande precisão usando as fórmulas abaixo.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ G_{xy} \end{bmatrix} = [Densidade] \begin{bmatrix} 163000(pic) + 0,74E_{UD}^x(UD) + 35500(areia) + 25000 \times K \\ 163000(pic) + 0,74E_{UD}^y(UD) + 35500(areia) + 25000 \times K \\ 63000(pic) + 0,74G_{UD}(UD) + 13600(areia) + 9610 \times K \end{bmatrix} \text{ kg/cm}^2$$

4 – Relações de Poisson. As relações de Poisson nas direções “x” e “y”, são

$$v_{yx} = [Densidade][0,70 \times (pic) + 0,74 \times v_{UD}^{yx} \times (UD) + 0,18 \times (areia) + 0,25 \times K]$$

$$v_{xy} = v_{yx} \times \frac{E_x}{E_y}$$

5 – Coeficientes de dilatação térmica. Os coeficientes de dilatação térmica nas direções “x” e “y”, são

$$[\alpha_x] = [Densidade] \left[\frac{4,08 \times (pic) + 0,74 \times E_{UD}^x \times \alpha_{UD}^x \times (UD) + 0,46 \times (areia) + 1,50 \times K}{E_x} \right]$$

$$[\alpha_y] = [Densidade] \left[\frac{4,08 \times (pic) + 0,74 \times E_{UD}^y \times \alpha_{UD}^y \times (UD) + 0,46 \times (areia) + 1,50 \times K}{E_y} \right]$$

6 – Coeficientes de dilatação hídrica. Os coeficientes de dilatação hídrica nas direções “x” e “y”, são

$$[\beta_x] = [Densidade] \left[\frac{31000 \times (pic) + 0,74 \times E_{UD}^x \times \beta_{UD}^x \times (UD) + 5300 \times (areia) + 10000 \times K}{E_x} \right]$$

$$[\beta_y] = [Densidade] \left[\frac{31000 \times (pic) + 0,74 \times E_{UD}^y \times \beta_{UD}^y \times (UD) + 5300 \times (areia) + 10000 \times K}{E_y} \right]$$

Apêndice 2

Computação da capacidade estrutural de equipamentos

A capacidade estrutural de equipamentos de compósitos depende da espessura da parede, da geometria e do alongamento admissível.

Os equipamentos para uso em ambientes quimicamente agressivos devem ter alongamentos abaixo de 0,001 (ASME RTP1). Os usados em ambientes não agressivos, como água, vinhaça e esgoto urbano, podem trabalhar com alongamentos até 0,0035 (AWWA C950).

A geometria do equipamento define se o laminado trabalha sob tração ou flexão.

1 – Equipamentos cilíndricos em ambientes agressivos. A capacidade estrutural de tubos e tanques verticais cilíndricos trabalhando sob pressão em ambientes agressivos é obtida pela expressão clássica

$$P \leq \frac{2 \times \epsilon_{adm} \times (E_y \times t)_{med}}{D}$$

Onde

P é a pressão interna máxima admitida

D é o diâmetro do tanque ou tubo

$\epsilon_{adm} = 0,001$ (ASME RTP1)

$\epsilon_{adm} = 0,0025$ (Metade do umbral de infiltração)

$(E_y \times t)_{med}$ = módulo circunferencial e espessura medidos em ensaios

2 – Equipamentos cilíndricos em ambientes não agressivos. A capacidade estrutural de tubos e tanques verticais cilíndricos trabalhando sob pressão em ambientes não agressivos é obtida pela expressão clássica

$$P \leq \frac{2 \times \epsilon_{adm} \times (E_y \times t)_{med}}{D}$$

Onde

P é a máxima pressão interna admitida

D é o diâmetro do tanque ou tubo

$\epsilon_{adm} = 0,0035$ (AWWA C950)

$\epsilon_{adm} = 0,0040$ (Metade do umbral de exudação)

$(E_y \times t)_{med}$ = módulo circunferencial e espessura medidos em ensaios

Exemplo 1 – Vamos ilustrar o método computando a capacidade estrutural de um tanque vertical cilíndrico de altura $H = 7,1$ m e diâmetro $D = 12,3$ m, contendo esgoto urbano de densidade $1,05$ g/cm³.

O ensaio de queima revelou os teores

$$(res) = 0,40$$
$$(UD90) = 0,60$$

Partindo desse resultado, os módulos de elasticidade do laminado são calculados pelas expressões

$$E_y = \left[\frac{3,12}{1,20 + 1,40(res)} \right] \times [0,74E_{UD}^y(UD) + 25\ 000K]$$

$$E_x = \left[\frac{3,12}{1,20 + 1,40(res)} \right] \times [0,74E_{UD}^x(UD) + 25\ 000K]$$

Onde a secura do laminado é

$$K = (res) - \frac{3}{7}(UD) = (0,40) - \frac{3}{7} \times (0,6) = 0,143$$

O valor positivo da secura, $K = 0,143$, indica excesso de resina em relação ao padrão. Isso em nada afeta o desempenho do tanque.

Consultando a tabela de valores padrão, obtemos para as fibras UD90

$$E_{UD}^y = 400\ 000\ \text{kg/cm}^2$$
$$E_{UD}^x = 100\ 000\ \text{kg/cm}^2$$

Esses são os valores padrão para os módulos de laminados de fibras UD nas direções “x” e “y”. Esses valores são universalmente aceitos e estão corretos para lâminas com 70% de vidro e 30% de resina. Os módulos reais são obtidos entrando esses valores nas equações acima

$$E_y = \left[\frac{3,12}{1,20 + 1,40 \times (0,40)} \right] \times [0,74 \times 400\ 000 \times (0,60) + 25\ 000 \times 0,143] = 329\ 400\ \text{kg/cm}^2$$

$$E_x = \left[\frac{3,12}{1,20 + 1,40 \times (0,40)} \right] \times [0,74 \times 100\ 000 \times (0,60) + 25\ 000 \times 0,143] = 87\ 200\ \text{kg/cm}^2$$

A espessura medida na parte inferior do costado é

$$t = 3,75\ \text{cm}$$

Com essas informações podemos calcular a capacidade estrutural do tanque

Cenário 1. O tanque armazena produtos agressivos

$$P \leq \frac{2 \times \epsilon_{adm} \times (E_y \times t)_{med}}{D}$$

$$P \leq \frac{2 \times 0,001 \times (329\ 400 \times 3,75)_{med}}{1230}$$

$$P \leq 2,0\ \text{kg/cm}^2$$

Essa é a máxima pressão hidrostática suportada pelo tanque. Ela deve ser comparada com a pressão hidrostática na parte inferior do tanque, de altura $H = 7,1$ m.

$$P = 0,1 \times 7,1 \times 1,05 = 0,75 \text{ kg/cm}^2$$

A capacidade estrutural desse tanque, supondo contato com produtos químicos agressivos, excede as necessidades da aplicação pelo fator

$$\text{Fator} = \frac{2,0}{0,75} = 2,7$$

Cenário 2. O tanque armazena água ou esgoto urbano

$$P \leq \frac{2 \times \epsilon_{adm} \times (E_y \times t)_{med}}{D}$$

$$P \leq \frac{2 \times 0,0035 \times (329\,400 \times 3,75)_{med}}{1230}$$

$$P \leq 7,1 \text{ kg/cm}^2$$

A capacidade estrutural desse tanque, supondo contato com água ou esgoto, excede a necessidade da aplicação pelo fator

$$\text{Fator} = \frac{7,1}{0,75} = 9,5$$

3 – Equipamentos com placas retangulares para uso em ambientes agressivos. As placas retangulares de dimensões a e b trabalham sob flexão e a capacidade estrutural do equipamento é obtida usando expressões clássicas, disponíveis em qualquer livro sobre teoria de placas.

Vamos definir a capacidade estrutural do equipamento usando dois critérios:

- O afundamento (deflexão) das placas retangulares deve ser menor que duas vezes sua espessura. Por esse critério, a máxima pressão admissível para o equipamento deve ser

$$P \leq \frac{14 \times (E \times t^4)_{med}}{\alpha \times b^4}$$

- O alongamento de flexão nos pés das nervuras de maior dimensão (dimensão “ a ”) não deve exceder o valor admissível. Por esse critério, a pressão máxima aceitável deve ser

$$P \leq \frac{\epsilon \times (E \times (t + T)^2)_{med}}{\beta \times b^2}$$

Onde

P é a pressão máxima admitida no centro da placa retangular de dimensões a e b

E é o módulo medido em ensaio de queima ou em laboratório

t é a espessura da placa, medida no ensaio

T é a espessura do pé da nervura ao longo da dimensão $a > b$.

b é a dimensão menor da placa

$\epsilon = 0,001$ (ASME RTP1)

$\epsilon = 0,0025$ (Metade do umbral de infiltração)

α e β são parâmetros dependentes da relação a/b (V. tabela 2)

a/b	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	∞
α	0,0138	0,0188	0,0226	0,0251	0,0267	0,0277	0,0284
β	0,3078	0,3834	0,4356	0,4680	0,4872	0,4974	0,5000

Tabela 2

Valores dos parâmetros α e β

4 – Equipamentos com placas retangulares em ambientes não agressivos. A capacidade estrutural desses equipamentos é obtida exatamente como no caso anterior

Para manter o afundamento (deflexão) menor que duas vezes a espessura da placa, temos

$$P \leq \frac{14 \times (E \times t^4)_{med}}{\alpha \times b^4}$$

Para o alongamento de flexão nos pés das nervuras não exceder o valor admissível, temos

$$P \leq \frac{\epsilon \times (E \times (t + T)^2)_{med}}{\beta \times b^2}$$

Onde

P é a pressão máxima admitida no centro da placa retangular de dimensões a e b

E é o módulo medido no ensaio

t é a espessura da placa, medida no ensaio

T é a espessura da nervura nas bordas das placas retangulares

b é a dimensão menor da placa

$\epsilon = 0,0035$ (AWWA C950)

$\epsilon = 0,0040$ (Metade do umbral de exudação)

α e β são parâmetros dependentes da relação a/b (V. tabela)

Exemplo 2 – Vamos ilustrar o método computando a capacidade estrutural de um tanque horizontal feito com fibras picadas. O tanque é nervurado e dividido em painéis retangulares de dimensões

$a = 127$ cm

$b = 80$ cm

$T = 0,8$ cm (espessura das nervuras)

$t = 0,72$ cm (espessura das placas retangulares)

A pressão atuante no centro das placas é $0,25$ kg/cm².

O ensaio de queima revelou os teores

(pic) = 0,35

$$(res) = 0,65$$

O módulo do laminado é

$$E = \frac{3,12}{1,20 + 1,40(res)} \times [163\,000(pic) + 25\,000K]$$

$$K = (res) - \frac{7}{3}(pic) = (0,65) - \frac{7}{3} \times (0,35) = -0,17$$

A secura negativa indica que o fabricante optou por usar menos resina que a quantidade padrão.

$$E = \frac{3,12}{1,20 + 1,40(0,65)} \times [163\,000(0,35) - 25\,000 \times 0,17] = 78\,073 \text{ kg/cm}^2$$

Os parâmetros α e β são extraídos da tabela 2 para $a/b = 127/80 = 1,6$

$$\alpha = 0,0251$$

$$\beta = 0,4680$$

Cenário 1. Capacidade do equipamento em ambientes agressivos

A pressão máxima admissível para manter o afundamento (deflexão) menor que duas vezes a espessura da placa deve ser

$$P \leq \frac{14 \times (E \times t^4)_{med}}{\alpha \times b^4}$$

$$P \leq \frac{14 \times (78\,073 \times 0,72^4)_{med}}{0,0251 \times 80^4} = 0,29 \text{ kg/cm}^2$$

Para manter a deflexão dos painéis abaixo de 14,4 mm, a pressão na placa não pode exceder 0,29 kg/cm². Como a pressão atuante é 0,25 kg/cm², o tanque tem capacidade estrutural suficiente para atender o critério de afundamento.

A pressão máxima admissível para o alongamento de flexão nos pés das nervuras não exceder o valor admissível deve ser

$$P \leq \frac{\epsilon \times (E \times (t + T)^2)_{med}}{\beta \times b^2}$$

$$P \leq \frac{0,001 \times (78\,073 \times (0,72 + 0,8)^2)_{med}}{0,4680 \times 80^2} = 0,06 \text{ kg/cm}^2$$

Para o alongamento de flexão não exceder 0,001, a pressão no centro da placa não pode ser maior que 0,06 kg/cm². Como a pressão atuante excede esse valor, é necessário aumentar a espessura T nos pés da nervura ao longo da dimensão $a = 127$ cm.

Para o tanque trabalhar com pressão $P = 0,25$ kg/cm², a espessura nos pés das nervuras de dimensão $a = 127$ cm deve ser aumentada para

$$\frac{0,001 \times 78\,073 \times (0,72 + 0,8 + T)^2}{0,4680 \times 80^2} = 0,25$$

De onde obtemos

$$T = 1,5 \text{ cm}$$

Cenário 2. Capacidade do tanque para ambientes não agressivos

Para manter o afundamento (deflexão) menor que duas vezes a espessura da placa, a máxima pressão deve ser

$$P \leq \frac{14 \times (E \times t^4)_{med}}{\alpha \times b^4}$$

$$P \leq \frac{14 \times (78\,073 \times 0,72^4)_{med}}{0,0251 \times 80^4} = 0,29 \text{ kg/cm}^2$$

Para manter a deflexão dos painéis abaixo de 14,4 mm, a pressão P não pode exceder 0,29 kg/cm². Essa é a mesma pressão calculada para o caso anterior.

Para o alongamento de flexão nos pés das nervuras não exceder o valor admissível, a máxima pressão deve ser

$$P \leq \frac{\epsilon \times (E \times (t + T)^2)_{med}}{\beta \times b^2}$$

$$P \leq \frac{0,0040 \times (78\,073 \times (0,72 + 0,8)^2)_{med}}{0,4680 \times 80^2} = 0,24 \text{ kg/cm}^2$$

Para o alongamento de flexão não exceder 0,004, a pressão P no centro da placa deve ser inferior a 0,24 kg/cm². Para ambientes não agressivos, não é necessário reforçar os pés das nervuras na direção $a = 127 \text{ cm}$.

CAPÍTULO 15

Como comprar equipamentos de compósitos

1 - Introdução. Os equipamentos de compósitos oferecem excelentes soluções para problemas industriais envolvendo ambientes agressivos. Todavia, devido ao baixo investimento requerido para fazer esses equipamentos, esse mercado é atendido por fabricantes com habilidades e capacidades distintas.

- *Compete ao comprador entender essas diferenças antes de fazer sua encomenda.*
- *Compete ao fabricante demonstrar sua experiência e capacidade para construir o equipamento desejado.*
- *O fabricante não precisa dispor de todos recursos necessários para produzir o “estado da arte” da tecnologia dos compósitos, mas ele deve convencer o comprador que sua competência é suficiente para atender às especificações pedidas.*

Os equipamentos de compósitos combinam lâminas de diferentes espessuras, feitas por processos diferentes, usando resinas e fibras também diferentes. Essas lâminas são construídas no momento da fabricação, por fabricantes de diferentes capacidades e habilidades. Assim, os equipamentos de compósitos exigem controle atento no esmero e no processo de fabricação. A ampla liberdade na escolha da resina, das fibras, do processo de fabricação e da espessura, confunde os compradores acostumados com equipamentos de aço, feitos com chapas de composição e espessura bem definidas.

Esse é um cenário complexo. Este capítulo foi escrito para compradores leigos, que não entendem a enorme variedade de ofertas para um mesmo equipamento de compósitos. Vamos explicar a origem dessas divergências.

2 - Qualificação do fabricante. O comprador deve qualificar o fabricante e concordar com ele sobre as condições do fornecimento.

- *A qualificação do fornecedor é feita avaliando sua capacidade e habilidade para construir e entregar o produto desejado no prazo combinado.*
- *As condições de fornecimento devem explicitar com clareza o preço, o prazo de entrega e quem absorve os custos dos desenhos, dos serviços de engenharia, da inspeção, do seguro, do transporte e da montagem.*

Para qualificar o fabricante, o comprador deve observar:

- **Condição geral da fábrica** - A área de fabricação deve ser limpa e bem organizada. A disposição dos equipamentos e o fluxo dos produtos em processo devem ser bem racionalizados para facilitar a produção e aumentar a produtividade. Um layout racional para a laminação e montagem dos equipamentos indica capacidade de planejamento e preocupação com produtividade. A existência de diagramas mostrando o fluxo de produção e os pontos de inspeção também denotam preocupação com qualidade.
- **Condições gerais das áreas de fabricação e de apoio** – Nessas áreas devem ser observadas as condições de higiene e de segurança no trabalho. É importante observar as condições de trabalho na área de laminação, principalmente a limpeza do ambiente e as precauções para evitar desconforto oriundo de ruídos, solventes evaporados e poeira de lixamento. As áreas de fabricação e inspeção devem ser bem iluminadas e protegidas contra chuva e vento
- **Prevenção de acidentes.** Acidentes são onerosos e atrasam cronogramas de produção. Os equipamentos de proteção contra incêndio devem estar sempre em boas condições de uso. Deve ser observada também a capacidade do fabricante em prestar primeiros socorros a vítimas de acidentes.
- **Condições específicas das áreas de apoio** – O almoxarifado e a área de estocagem de matérias-primas e de materiais de consumo devem ser bem organizados para facilitar o acesso aos materiais e às ferramentas. A estocagem desses materiais deve ser feita de acordo com as recomendações dos fornecedores, de preferência nas embalagens originais, e obedecendo normas de segurança. Os catalisadores devem ser estocados fora do almoxarifado e da área de fabricação e montagem, em prédio isolado e dedicado a essa finalidade.
- **Identificação das matérias-primas.** As matérias-primas e os materiais de consumo devem ser bem etiquetados e identificados para evitar erros de uso e de formulação. Todos materiais devem ser bem embalados, de preferência nas embalagens originais.
- **Condição dos equipamentos e moldes.** Devem ser observados o estado de conservação dos equipamentos, das ferramentas e dos moldes.
- **Estrutura de produção.** O comprador deve avaliar se o fabricante está estruturado para fazer apenas produtos padronizados ou se tem capacidade para fazer produtos especiais, se necessário.
- **Cuidado na estocagem de produtos acabados.** Esse cuidado é necessário para evitar danos acidentais causados por impactos ou forças de vento.
- **Capacidade de movimentação de produtos acabados.** O comprador deve avaliar a capacidade do fabricante para movimentar produtos acabados ou em processo, dentro da fábrica e na expedição.
- **Embalagem de produtos acabados.** O comprador deve observar como o fabricante faz o carregamento e a embalagem dos produtos acabados.

- **Controle de qualidade** – O comprador deve observar a posição hierárquica e a independência do pessoal que faz o controle da qualidade. É importante que a autoridade e a independência dessas pessoas estejam de acordo com sua responsabilidade e posição no organograma. Algumas empresas têm descrições de cargos para seus funcionários, especificando as responsabilidades e autoridades de cada um. Essas descrições são úteis para revelar a coerência e a harmonia entre cargos e funções. Os inspetores devem ter autoridade e responsabilidades bem definidas para, ao identificar qualquer anomalia no processo, materiais ou especificações, iniciar ou recomendar soluções
- **Rotinas de inspeção.** O comprador deve verificar as rotinas de inspeção, a lista dos itens examinados, os critérios de rejeição e as providências tomadas no caso de rejeição.
- **Planos de inspeção.** A existência de planos de inspeção por produto, definindo o que, onde e como inspecionar, aceitar ou rejeitar, desde as matérias-primas até o produto acabado, indica compromisso e preocupação com qualidade. O comprador deve pedir ao fabricante a lista completa dos equipamentos de laboratório e avaliar sua adequação para analisar os materiais usados no processo.
- **Registros.** Deve ser observada a existência de registros para rastrear as matérias-primas. O comprador deve verificar como e com que frequência é feita a calibração dos aparelhos de medição.
- **Engenharia** – O fabricante deve demonstrar capacidade para projetar, analisar e resolver problemas de operação, de montagem e de instalação dos equipamentos por ele construídos. Para isso ele deve ter desenhistas, montadores e pelo menos um engenheiro ou consultor qualificado para fazer cálculo estrutural conforme exigências de normas.
- **Memória de cálculo.** A memória de cálculo deve ser clara, citando as fórmulas e os parâmetros de cálculo usados. O fabricante deve disponibilizar ao comprador amostras de memórias de cálculo feitas por ele.
- **Qualificação e experiência da mão-de-obra** – A qualificação e a experiência da mão-de-obra podem ser avaliadas examinando produtos acabados e também pelos programas de treinamento promovidos pelo fabricante. O comprador deve observar se o fabricante mantém cursos regulares de treinamento para novos funcionários e para reciclagem de funcionários antigos. Esses cursos devem ser apostilados. Para melhor julgar a qualificação da mão-de-obra, o comprador pode pedir ao fabricante que faça como demonstração algumas peças e conexões especiais.
- **Depósito de lixo** – Pode parecer estranho qualificar um fabricante inspecionando seu depósito de lixo. Entretanto, essa observação pode fornecer informações valiosas sobre o grau de controle do processo e a qualificação da mão-de-obra. Atenção especial deve ser dispensada às peças rejeitadas por impossibilidade de recuperação. Elas podem informar sobre negligência de gerenciamento e/ou falta de controle no processo, ou sobre os critérios de rejeição realmente adotados pelo fabricante.
- **Assistência técnica** – O fabricante deve ter estrutura para prestar os serviços de assistência técnica mencionados na garantia oferecida.

- **Instruções para transporte e instalação.** *O fabricante deve apresentar documentação com instruções para transporte, instalação e operação dos equipamentos produzidos por ele.*

3 - Especificação e uso do equipamento. Os fabricantes qualificados são informados sobre os detalhes do equipamento a ser fabricado. Com esses detalhes eles fazem seus orçamentos e propostas de fornecimento. O comprador deve informar todas as particularidades e prováveis condições extremas de operação a que o equipamento será ou possa ser submetido em uso. Essas informações devem incluir, no mínimo:

- **Capacidades e dimensões** – *O comprador deve estar preparado para aceitar desvios em suas especificações originais. Muitas vezes os equipamentos são oferecidos com capacidades e dimensões diferentes das especificadas, porque os fabricantes não têm os moldes adequados. Os fabricantes geralmente fazem suas propostas escolhendo, dentro de suas possibilidades, a combinação de capacidades e dimensões que mais se aproxima do desejado pelo cliente. Essa discrepância pode ser acomodada pelo comprador para evitar problemas com prazos de fornecimento e custo adicional.*
- **Localização e dimensões das conexões** – *O comprador deve fornecer desenhos mostrando a localização, tipo e dimensões das conexões desejadas.*
- **Cor e pintura** – *Os equipamentos de compósitos são naturalmente translúcidos e incolores. Porém, se o comprador desejar, eles podem ser pintados na cor desejada. O topcoat colorido, opaco, deve ser laminado ou pintado, após a inspeção feita na fábrica.*
- **Instalação de equipamentos enterrados** – *Para os equipamentos que trabalham enterrados, o comprador deve informar o tipo de solo nativo, a posição do lençol freático, a profundidade da instalação e a carga de tráfego superficial. Essas informações são necessárias para o fabricante dimensionar a rigidez do equipamento.*
- **Instalação de equipamentos aéreos** – *Para os equipamentos aéreos, o comprador deve informar se a instalação será horizontal ou vertical, qual a carga de vento esperada e outras cargas externas, oriundas de estruturas apoiadas no equipamento. Essas informações são necessárias para o fabricante especificar sapatas, apoios, cintas, fixações e reforços localizados.*
- **Descrição do ambiente** – *O comprador deve fornecer a descrição completa do produto a ser armazenado ou conduzido pelo equipamento, mencionando a temperatura de trabalho, o nome genérico dos produtos e suas concentrações máximas e mínimas. Essas informações são necessárias para o fabricante escolher a resina, o sistema de cura, a necessidade de pós-cura e a construção do liner e da barreira de corrosão.*
- **Método de limpeza** – *O fabricante deve ser informado sobre o método e a frequência de limpeza do equipamento. O comprador deve citar os produtos químicos usados e suas concentrações, bem como a temperatura e a duração da operação de limpeza. Essa informação é importante para a escolha da resina quando a limpeza é feita com solventes ou com vapor.*
- **Reações no equipamento** – *O comprador deve mencionar a possibilidade de os produtos armazenados ou conduzidos reagirem dentro do equipamento. Essas reações podem*

causar aumento de temperatura e gerar produtos agressivos ou gases que podem atacar ou produzir pressões para as quais o equipamento não foi dimensionado.

- **Vapores e respingos externos** – *O fabricante deve ser informado sobre a ocorrência de vapores, respingos ou condensações de produtos agressivos do lado de fora do equipamento. Essa informação é necessária para especificar o topcoat.*
- **Condições de operação** – *O comprador deve descrever com detalhes as condições de uso do equipamento, informando a densidade do produto armazenado ou transportado, a pressão de trabalho, a pressão máxima e sua duração e a pressão negativa (vácuo).*
- **Agitadores e aquecedores.** *Alguns tanques de processo são equipados com agitadores e aquecedores. Esses tanques devem ser dimensionados para suportar o peso desses acessórios e as eventuais solicitações cíclicas oriundas da agitação. Para isso, o comprador deve fornecer detalhes do agitador e do processo de agitação, bem como do aquecedor, mencionando também a temperatura de trabalho e a temperatura de pico com sua duração.*
- **Tubos e dutos.** *No caso de tubos ou dutos, o comprador deve informar a vazão de operação e a existência de partículas sólidas em suspensão.*

4 - Avaliação de propostas. Com essas informações, o fabricante pode fazer sua proposta de fornecimento, que incluirá os desenhos, a memória de cálculo e a especificação final do equipamento. A especificação deve conter a descrição completa dos laminados e das matérias-primas usadas. Essa proposta deve incluir também as recomendações para manuseio, transporte e instalação. Se o equipamento for construído conforme alguma norma, ela deve ser mencionada na proposta.

A avaliação de propostas não é tarefa fácil. Os fabricantes procuram acentuar seus pontos fortes, propondo equipamentos que melhor se adaptem às suas habilidades e capacidades. O comprador deve escolher entre as várias propostas aquela que melhor satisfizer suas necessidades de custo e desempenho. Para isso ele pode exigir informações detalhadas sobre os critérios e os métodos usados para escolher o processo de fabricação e fazer o dimensionamento dos equipamentos. Isso facilita a comparação das propostas. A presteza no atendimento, a correção e abrangência dos argumentos, bem como a atenção aos detalhes referentes a essa solicitação, podem ser úteis ao comprador na avaliação da confiabilidade e da capacidade do fabricante.

O comprador deve dispensar atenção especial às propostas de valor muito baixo. Para isso ele deve verificar os itens seguintes.

- *Propostas de valor baixo podem usar matérias-primas diferentes das usadas pelos demais concorrentes. Alguns fabricantes usam resinas nobres e caras apenas no liner e na barreira de corrosão, usando resinas de menor custo nas lâminas estruturais e no topcoat. Outros usam cargas inertes no laminado estrutural para reduzir custos. Outros não usam liner ou barreira de corrosão, que são substituídos por revestimentos termoplásticos (PVC, polipropileno, outros). Existem também os que constroem seus equipamentos exclusivamente com fibras de roving picado, sem usar fibras UD, mantas ou tecidos.*

- *Propostas de valor baixo muitas vezes “esquecem” de incluir algumas conexões e acessórios, como escadas. O comprador deve conferir se todas conexões e todos acessórios estão incluídos na proposta, nas posições corretas e de acordo com o pedido de compra.*
- *O comprador deve exigir que o proponente de baixo custo afirme por escrito que o produto oferecido segue as especificações de compra e/ou outras normas de fabricação. Essa afirmação é necessária, porque muitas vezes o fabricante “esquece” de cumprir algumas exigências da especificação de compra. Por exemplo, pode acontecer que a especificação de compra peça o uso de liner com a tecnologia split-liner e o fabricante “interprete” que isso não é necessário. Esse detalhe pode ser importante no custo de tubos de pequeno diâmetro. O comprador deve conferir todos itens da especificação de compra, como altura, diâmetro, comprimento, largura, tipo de juntas, tipo de tampa e fundo, condições de operação e outros. A proposta deve fazer menção a todos esses detalhes.*
- *Os processos de fabricação podem ser diferentes entre os concorrentes. Pode acontecer que a proposta de baixo custo contemple equipamento feito por enrolamento, enquanto as outras são para equipamento feito por laminação manual. Dependendo das dimensões do equipamento e das condições de operação, o processo de fabricação pode ter influência significativa no custo.*
- *Memória de cálculo. O comprador deve verificar se a memória de cálculo está correta. É importante observar se o alongamento admissível usado para fazer o cálculo estrutural da proposta de baixo custo é o mesmo adotado pelos demais concorrentes. Devem ser verificados também os módulos de elasticidade usados para fazer os cálculos. Esses parâmetros impactam diretamente as quantidades de materiais usadas na fabricação. O fabricante deve informar ao comprador as quantidades de fibras por metro quadrado de todas as partes do equipamento.*
- *Se o equipamento operar sob pressão negativa (vácuo), o comprador deve conferir a inércia e a distância entre as nervuras.*
- *Outros custos. O comprador deve verificar se existem outros custos, não explicitados na proposta, e que podem aparecer mais tarde. Por exemplo: Os serviços de engenharia são fornecidos sem custo adicional? O fabricante cobra pela inspeção e pelo teste do equipamento? Se o equipamento for pós-curado e lavado com vapor, esse custo já está incluído na proposta? O equipamento é fornecido desmontado ou parcialmente montado? Quem paga o transporte e a montagem/instalação? O fabricante fornece garantia explícita?*
- *Reajuste de preços. Todos os preços devem ser trazidos para valor presente antes de ser comparados. O comprador deve ficar atento para as fórmulas usadas para reajustar os preços. É importante que os cronogramas de pagamento, de produção e de instalação sejam vinculados na proposta, para evitar que eventuais atrasos na entrega levem a uma situação de pagamento pleno antes da entrega do equipamento.*



Estátua do Cristo Del Pacífico, em Lima, Peru. Esculturas como essa, feita por laminação manual com M450 + T800, sobre moldes esculpidos em madeira, tem custo muito alto. Foto cedida pela Construtora Norberto Odebrecht.

5 - Recebimento. Conferidos esses procedimentos, o comprador escolhe seu fornecedor e finaliza o pedido de compra. Terminada a construção do equipamento, o fabricante deve emitir o relatório de inspeção atestando que as matérias-primas e demais exigências foram cumpridas de acordo com o pedido. O formulário da tabela 1 pode ser considerado como ponto de partida para esse relatório.

A inspeção do equipamento é responsabilidade do comprador, que pode indicar um inspetor que o represente para acompanhar as várias etapas da fabricação. O inspetor deve observar a concordância entre o que está sendo feito e as especificações de compra. Alguns equipamentos não podem ser plenamente inspecionados depois de prontos. Por exemplo, os tubos de pequeno diâmetro não podem ser examinados pelo lado de dentro. Esses tubos devem ser inspecionados durante o processo de laminação. Nesses casos o comprador deve acompanhar a fabricação e inspecionar o equipamento durante a construção.

As inspeções necessárias durante o processo de fabricação são muitas vezes delegadas pelo comprador ao fabricante. O comprador aceita os relatórios do fabricante, afirmando que o produto oferecido satisfaz as especificações de compra. Assim, o comprador transfere parte da tarefa de inspeção ao fabricante, conferindo apenas o que lhe é possível conferir.

O fabricante deve facilitar a inspeção, colocando à disposição do comprador os equipamentos e o pessoal qualificado para auxiliá-lo nessa tarefa. O fabricante deve manter registros das etapas de fabricação. Esses registros fazem parte do sistema de qualidade, sendo disponibilizados ao comprador ou seu representante. Se o comprador optar por não fazer a inspeção, o fabricante deve enviar a ele cópias dos registros de fabricação, acompanhada de carta afirmando que a inspeção foi feita e que o equipamento satisfaz as especificações de compra.

A tabela 1 mostra um check-list que o comprador pode usar como ponto de partida para receber equipamentos de compósitos.

Os equipamentos são inspecionados em várias fases.

- 1. A primeira inspeção é feita na fábrica, durante e imediatamente após a fabricação. Essa inspeção segue as orientações dadas no capítulo 7 deste livro.*
- 2. A segunda inspeção é feita com o equipamento carregado, antes da autorização para o transporte. Nesta fase é examinado o estado das superfícies interna e externa, observando a presença de danos ocorridos durante o manuseio e o carregamento. São inspecionados também os apoios e as amarrações, que devem estar bem firmes para proteger o equipamento durante o transporte.*
- 3. A terceira inspeção é feita no local de entrega, antes de descarregar o equipamento, para observar a existência de danos no transporte.*
- 4. Finalmente a última inspeção, feita no equipamento em uso, para observar seu desempenho no ambiente agressivo e para programar eventuais (e raras) intervenções para manutenção.*

CHECK-LIST DE INSPEÇÃO EMITIDO PELO FABRICANTE

FABRICANTE..... COMPRADOR.....

Nº DO PEDIDO..... Nº DA ORDEM DE SERVIÇO.....

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....

Nº DO DESENHO.....

RESINA USADA

No liner e na BC.....HDT da resina..... Alongamento na ruptura.....

Na estrutura.....HDT da resina..... Alongamento na ruptura.....

LINER E BARREIRA DE CORROSÃO

Espessura do liner..... gramatura da BC.....

TAMPA E FUNDO

Gramatura das fibras picadas

Gramatura dos tecidos.....

COSTADO

Gramatura e orientação das fibras UD.....

Gramatura das fibras picadas.....

Gramatura dos tecidos.....

NERVURAS

Gramatura das fibras picadas.....

Gramatura dos tecidos.....

Distância entre nervuras.....

Inércia das nervuras.....

ALÇAS

Diâmetro.....

Excentricidade.....

Gramatura das fibras picadas nos laminados de fixação e na almofada.....

Gramatura dos tecidos nos laminados de fixação e na almofada.....

Largura da faixa de fixação.....

OLHAIS

Largura.....

Altura.....

Excentricidade.....

Gramatura das fibras picadas nos laminados de fixação e na almofada.....

Gramatura dos tecidos nos laminados de fixação e na almofada.....

Largura da faixa de fixação.....

BOCA DE VISITA

Espessura do laminado de fixação interno.

Espessura do laminado de fixação externo.

Largura da faixa de fixação interna

Largura da faixa de fixação externa

Gramatura das fibras picadas na almofada....

Gramatura dos tecidos na almofada.....

Largura da almofada....

QUINA

Gramatura das fibras picadas na quina.....

Gramatura dos tecidos na quina.....

Gramatura das fibras UD na quina.....

Altura da quina.....

EMENDAS

Largura das emendas.....

Gramatura dos tecidos nas emendas.....

Gramatura das fibras picadas nas emendas.....

Largura das emendas.....

INFORMAÇÕES GERAIS

Sistema de cura.....Esquema de pós-cura.....

Sensibilidade à acetona.....Dureza Barcol.....

Dimensões.....

Posição dos bocais..... Outros acessórios.....

Inspeção visual interna

Inspeção visual externa.....

Este check-list deve ser preenchido pelo fabricante. Observe que ele nada diz sobre as espessuras do equipamento. Apenas as gramaturas das fibras (gramas/metro quadrado) são exigidas.

Capítulo 16

Vida química de equipamentos de compósitos

1 - Introdução. Promessa de vida longa e baixo custo de manutenção. Esses são os argumentos que sustentam a popularidade dos compósitos em aplicações industriais. Mas, apesar de confirmados, reconhecidos e aceitos, esses argumentos ainda não foram quantificados. Quando questionados sobre a durabilidade dos compósitos, os especialistas alegam que esse tema é muito complexo e difícil, que a deterioração depende de muitos fatores, etc. E a pergunta fica sem resposta.

Os protocolos para computação da durabilidade de compósitos foram propostos recentemente, em 2018, na primeira edição do livro “Durability of Industrial Composites”. Esses protocolos foram revisados e ampliados na segunda edição do livro, lançada em 2025. A discussão que segue é um resumo das considerações detalhadas nesse livro.

Os equipamentos de compósitos podem falhar de cinco maneiras.

- *Infiltração*
- *Exudação*
- *Perda de rigidez*
- *Ruptura*
- *Falha anômala*

Esses modos de falha têm como causas

- *Ataque químico*
- *Strain-corrosion*
- *Abrasão*
- *Cargas mecânicas*

O presente capítulo trata apenas da durabilidade de equipamentos em presença de produtos químicos. Os leitores interessados nas soluções detalhadas e quantitativas dos demais modos de falha devem consultar o livro “Durability of Industrial Composites”.

A vida química dos equipamentos de compósitos é definida como o tempo até o laminado sofrer deterioração suficiente para atingir o umbral de infiltração. Ao atingir o umbral de infiltração, dizemos que o equipamento completou seu ciclo de vida, devendo ser substituído ou reabilitado. Essa é a verdadeira durabilidade química dos equipamentos de compósitos.

Os engenheiros de manutenção necessitam de um modelo confiável para prever o tempo correto para fazer a reabilitação ou a eventual substituição dos equipamentos. Esse modelo é fundamental para a aceitação plena dos compósitos em aplicações industriais. A explicação anterior deixou claro que o final da vida química dos equipamentos de compósitos é controlado pelo umbral de infiltração. Abaixo desse umbral, a penetração de moléculas ou íons agressivos nos laminados ocorre pelo lento processo de difusão, causando baixa taxa de deterioração. Acima desse umbral a penetração é rápida e a vida residual é curta. Para um ambiente agressivo qualquer, a vida química dos compósitos é controlada pela resina, pelas fibras e pela construção do laminado. Ela resulta de ataque à resina e às fibras, independente de forças mecânicas.

A vida estrutural dos equipamentos de compósitos é determinada unicamente por forças mecânicas, sem interferência do ataque químico. A vida estrutural é longa, mais longa que a vida química. Enquanto a vida química é medida em anos, a mecânica é medida em décadas.

A tabela 1 compara as vidas mecânica e química.

<i>Vida química</i>	<i>Vida estrutural</i>
<i>Determinada pelo ataque químico</i>	<i>Determinada pelas cargas mecânicas</i>
<i>Independente das forças mecânicas</i>	<i>Independente do ataque químico</i>
<i>Medida em anos</i>	<i>Medida em décadas</i>

Tabela 1
Compara as vidas química e estrutural dos compósitos

Neste capítulo vamos discutir os modelos propostos no livro “Durability of Industrial Composites” para prever a vida química.

2 – Três ambientes químicos. Para estudar a durabilidade química dos compósitos, os ambientes agressivos são classificados em três grupos:

1 - Os muito agressivos reagem rapidamente com a resina, avançando lentamente nos laminados, geralmente com frentes de penetração planas e bem definidas. Sendo muito agressivos, esses ambientes degradam com grande intensidade o material penetrado, em especial o módulo de elasticidade. As lâminas não alcançadas por esses ambientes mantêm suas propriedades intactas.

2 – Os pouco agressivos reagem lentamente com a resina, avançando rapidamente nos laminados, com frentes de penetração difusas e sem definição. Sendo pouco reativos, esses ambientes demoram para degradar o módulo de elasticidade do material penetrado. Os ambientes pouco reativos geralmente penetram e saturam completamente a parede dos equipamentos. Apesar dessa saturação plena, a pouca agressividade permite que os equipamentos permaneçam em serviço por muitos anos.

3 – Os **solventes** inertes não reagem com a resina, penetrando e saturando rapidamente os laminados. A água é o único solvente conhecido capaz de penetrar laminados e atacar as fibras de vidro.

A durabilidade dos compósitos em ambientes químicos é estudada com base nessa classificação. Pelo exposto podemos concluir que:

- *Os produtos químicos muito ou pouco reativos difundem nos laminados, atacando as lâminas penetradas por eles. Ao fazer isso, eles reduzem o módulo de elasticidade dos equipamentos. Ao perder módulo, os equipamentos deformam lentamente até atingir o umbral de infiltração. Acima do umbral de infiltração, a penetração dos produtos agressivos é rápida, a deterioração é intensa e a falha é imediata. A vida química se cumpre quando o equipamento atinge o umbral de infiltração.*
- *A água é um solvente que penetra nos laminados com rapidez, atacando as fibras de vidro. Ela é o único solvente conhecido que afeta a vida estrutural dos compósitos.*

A tabela 2 resume o efeito dos ambientes químicos nas vidas estrutural e química dos compósitos.

<i>Ambientes</i>	<i>Efeito</i>
<i>Muito reativos</i>	<i>Esses ambientes causam danos intensos e pouco profundos. A perda de módulo resulta do ataque químico ao material penetrado.</i>
<i>Pouco reativos</i>	<i>Esses ambientes causam danos leves e profundos. Muitas vezes os laminados são totalmente penetrados e saturados por esses ambientes. A perda de módulo resulta do ataque químico ao material penetrado</i>
<i>Solventes</i>	<i>A água ataca as fibras de vidro, sendo o único solvente capaz de afetar a vida estrutural dos compósitos. A água e os solventes não têm efeito na vida química.</i>

Tabela 2

Mostra o efeito dos ambientes químicos na durabilidade dos compósitos.

Este capítulo e o que segue computa a durabilidade dos compósitos com base em dois postulados:

- *Postulado 1. A vida estrutural é determinada pela deterioração resultante de cargas mecânicas, independente do produto químico armazenado ou transportado.*
- *Postulado 2. A vida química é determinada pelo ataque de produtos químicos, independente da carga mecânica. A vida química não tem efeito na vida estrutural e vice-versa.*

Na maioria das vezes, as intervenções para manutenção são definidas pelo dono do equipamento, com base na aparência interna da barreira de corrosão. O proprietário fica assustado com essa aparência, muitas vezes iniciando intervenção imediata. De fato, a aparência interna do equipamento tem pouca importância. Minha recomendação é deixar o equipamento em uso, sem substituir a barreira de corrosão.

Após atravessar a barreira de corrosão, o produto agressivo continua seu avanço nas lâminas estruturais, gradualmente reduzindo suas propriedades mecânicas, em especial o módulo de tração. A degradação do módulo aumenta o alongamento no laminado, que eventualmente atinge o umbral de infiltração. Nesse momento, a penetração de produtos agressivos passa a ser intensa e o equipamento deve ser reabilitado ou retirado de uso. Essa é a definição da vida química.

A figura 1 mostra isso.

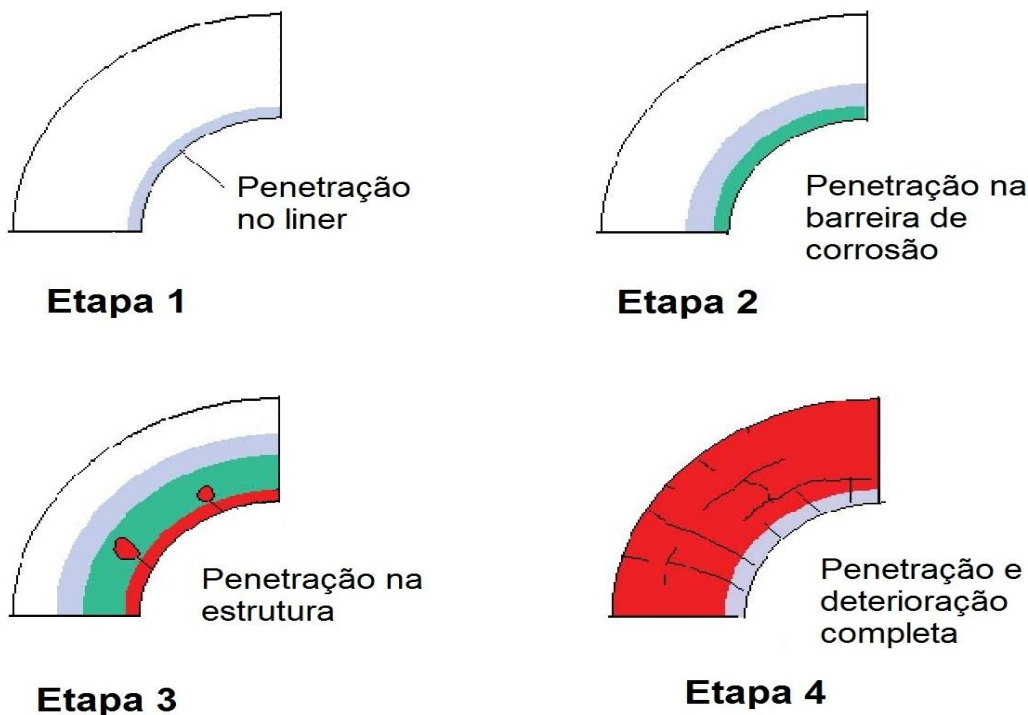


Figura 1

A figura mostra os estágios de penetração de produtos químicos na barreira de corrosão e na estrutura de equipamentos. A reabilitação estrutural deve ser executada por fora, do lado externo, para restaurar a vida química.

3 - Vida química e vida residual. A velocidade de penetração de produtos químicos nos compósitos depende da resina, da construção do laminado, da natureza e da concentração das espécies agressivas. Por exemplo, o ácido clorídrico tem maior poder de penetração que o ácido sulfúrico. Isso quer dizer que, para iguais tempos de exposição, o ácido clorídrico ataca “mais fundo”, causando mais danos que o ácido sulfúrico. As resinas de alta reatividade – DK470 – são mais eficientes para retardar a penetração de produtos agressivos e dão vidas químicas mais longas que as de menor reatividade, como a DK411. Da mesma maneira, as resinas pós-curadas têm desempenho superior ao daquelas que não são pós-curadas. Nos dois casos, a maior interligação molecular, seja ela resultante de melhor cura ou da natureza da resina, retarda a penetração do ambiente agressivo e alonga a vida química.

O grau de agressividade é avaliado medindo o módulo residual dos laminados após longo tempo de exposição. Nos casos em que a frente de penetração é nítida e facilmente mensurável, como acontece com alguns produtos muito agressivos, a medição do módulo pode ser substituída pela determinação da espessura penetrada “ Δe ”. A espessura penetrada, quando claramente identificável, é então usada em lugar do módulo residual. Essa prática de fácil execução não é muito usada, porque as frentes de penetração geralmente são difusas e sem nitidez.

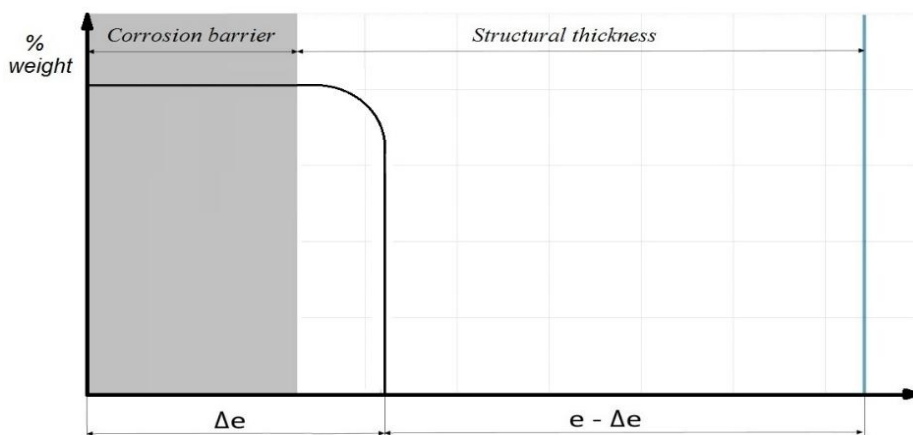


Figura 2
 Mostra a concentração do ambiente agressivo na profundidade penetrada. A figura mostra a frente de penetração plana e bem definida. Na figura observamos que a penetração passou a barreira de corrosão e adentrou nas lâminas estruturais. Observe que o material penetrado não é removido, formando um escudo protetor que abate a concentração do produto agressivo no laminado. Esse “efeito escudo” é fundamental na definição da vida química.

A figura 2 mostra o perfil de concentração de produtos químicos em laminados. Observe a queda repentina da concentração na frente de avanço. Esse padrão é observável em ambientes de alta reatividade, onde as moléculas agressivas formam frentes de ataque uniformes e bem definidas. Se a espessura penetrada “ Δe ” for bem visível e mensurável, o módulo residual pode ser estimado pela relação aproximada

$$E_r \cong \frac{E \times (e - \Delta e)}{e}$$

Onde

- E é o modulo original*
- e é a espessura original*
- Δe é a profundidade penetrada*
- E_r é o módulo residual*

A figura 3 mostra a queda no módulo e o incremento na profundidade penetrada em função do tempo. Se a espessura penetrada não for diretamente mensurável, o módulo residual deve ser medido em corpos de prova extraídos do laminado.

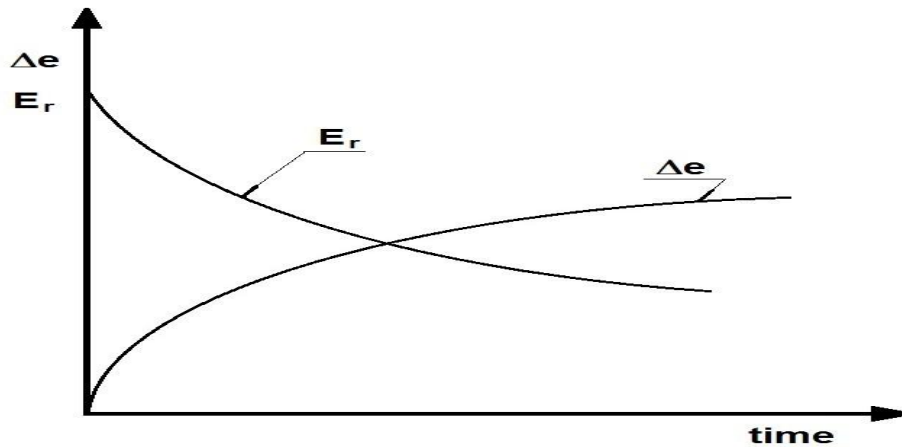


Figura 3
Mostra a queda do módulo residual e o incremento da profundidade penetrada em função do tempo de exposição.

Estamos propondo, portanto, que a deterioração química seja avaliada medindo o módulo residual do laminado. A perda de módulo $\Delta E = E - E_{res}$ em função do tempo pode ser estimada pela equação

$$\log(\Delta E) = \log(E - E_r) = K + C \times \log(t)$$

Onde “t” é o tempo de exposição e os parâmetros K e C são medidos experimentalmente.

Se a espessura penetrada “ Δe ” for mensurável, a equação acima pode ser substituída pela expressão equivalente

$$\log(\Delta e) = K + C \times \log(t)$$

Observe que na equação acima usamos a profundidade penetrada em lugar do módulo perdido.

Os parâmetros K e C são determinados experimentalmente em cada caso, medindo a profundidade penetrada ou o módulo de tração perdido pelo equipamento em duas ocasiões diferentes. Isso nos dá duas equações para calcular os valores de K e C.

O parâmetro K é determinado pela resina, pela temperatura de trabalho e pela natureza e concentração do ambiente agressivo. O parâmetro C mede o efeito escudo do material penetrado que permanece no laminado. Nas aplicações em que esse efeito é perdido, como aqueles que envolvem abrasão, o parâmetro $C = 1$.

Conhecidos os parâmetros K e C, a vida química do equipamento pode ser computada pelas equações.

$$\log(e - e_{cri}) = K + C \times \log(\text{vida química})$$

Ou

$$\log(E - E_{cri}) = K + C \times \log(\text{vida química})$$

Onde

e = espessura inicial, ou original, do equipamento

e_{cri} = espessura residual crítica

E = módulo inicial, ou original, do equipamento

E_{cri} = módulo residual crítico

A vida residual dos equipamentos envelhecidos é

$$(\text{vida residual}) = (\text{vida química}) - (\text{tempo em serviço})$$

Na computação da vida química é necessário conhecer o módulo residual crítico, ou a espessura residual crítica, que correspondem à falha do equipamento. Esses valores críticos são determinados pela força atuante e pelo umbral de infiltração do equipamento envelhecido em uso.

O umbral de infiltração de equipamentos envelhecidos em uso é calculado supondo que sua deterioração seja igual à sofrida pelo módulo de tração do equipamento.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Umbral de infiltração} \\ \text{residual} \end{array} \right] = T_i \times \frac{E_r}{E_i}$$

Onde

T_i é o umbral de infiltração inicial, antes da exposição

E_r é o módulo de tração residual

E_i é o módulo de tração inicial, antes da exposição

Essas considerações nos levam a

$$E_{cri} = \frac{N}{e \times T_i} \times \frac{E_i}{E_r}$$

Onde

N é a força por unidade de comprimento

e é a espessura original do equipamento

T_i é o umbral de infiltração inicial, antes da exposição

E_r é o módulo de tração residual

E_i é o módulo de tração inicial, antes da exposição

A força N é conhecida em todas situações. Por exemplo, em tubos ou tanques cilíndricos de diâmetro D sob pressão interna P , o valor de N é

$$N = \frac{P \times D}{2}$$

Exemplo 1. Computar a vida residual de um tanque em serviço contínuo há 10 anos em ambiente não-abrasivo.

São dados:

$E = 150\,000 \text{ kg/cm}^2$ é o módulo de tração original

$e = 9,6 \text{ mm}$ é a espessura do tanque

$D = 3\,000 \text{ mm}$ é o diâmetro do tanque

$T_i = 0,005$ é o umbral de exudação para resina DK 411

$P = 0,96 \text{ kg/cm}^2$ é a pressão de trabalho no tanque

Se o ambiente não é abrasivo, o efeito escudo e a espessura original do equipamento são mantidos.

Os módulos residuais, medidos em tempos diferentes, são

Tempo de inspeção

Módulo residual

60 meses (5 anos)

130 000 kg/cm²

120 meses (10 anos)

115 000 kg/cm²

O módulo crítico após 10 anos de uso é

$$E_{cri} = \frac{N}{e \times T_i} \times \frac{E_i}{E_r}$$

$$E_{cri} = \frac{P \times D}{2 \times e \times T_i} \times \frac{E_i}{E_r}$$

$$E_{cri} = \frac{0,96 \times 3\,000}{2 \times 9,6 \times 0,005} \times \frac{150\,000}{115\,000} = 39\,000 \text{ kg/cm}^2$$

A equação para computar os valores de K e C é

$$\log(\Delta E) = K + C \times \log(t)$$

Entrando os valores medidos nessa equação, obtemos

$$\log(150\,000 - 130\,000) = K + C \times \log(60)$$

$$\log(150\,000 - 115\,000) = K + C \times \log(120)$$

Resolvendo esse sistema, obtemos

$$K = 2,88 \text{ e } C = 0,80$$

Conhecidos os parâmetros K e C , a vida química é

$$\log(E - E_{cri}) = K + C \times \log(\text{vida química})$$

$$\log(150\,000 - 39\,000) = 2,88 + 0,80 \times \log(\text{vida química})$$

De onde obtemos

$$\text{Vida química} = 509 \text{ meses, ou } 42 \text{ anos}$$

A vida residual é

$$(\text{vida residual}) = (\text{vida química}) - (\text{tempo em serviço})$$

$$(\text{vida residual}) = 42 \text{ anos} - 10 \text{ anos} = 32 \text{ anos}$$

Essa é a maneira correta de computar a vida química residual de equipamentos de compósitos em ambientes agressivos. A previsão requer duas medições do módulo residual em tempos diferentes.

4 – Vida residual em casos terminais. Na maioria das vezes, a validação de equipamentos é solicitada quando eles atingem estados deploráveis de deterioração e risco iminente de falha. A validação preventiva de tanques sadios, em pleno vigor, raramente é feita. Nos casos extremos, de falha iminente, o dono do equipamento precisa de resposta imediata para a questão:

Será que o tanque aguenta mais um tempinho, até a próxima parada para manutenção?

Nesses casos, o inspetor não tem tempo para fazer duas medições do módulo residual. Ele assume o pior caso, ausência do efeito escudo, e usa $C = 1$. Assim, ele faz apenas uma medição para determinar o parâmetro K . A perda de módulo nesses casos é computada pela equação

$$\Delta E = Kt$$

Exemplo 2. Estimar a vida residual do equipamento analisado no exemplo 1, supondo uma única medição do módulo residual após 5 anos em serviço.

O módulo residual após 5 anos em serviço é $130\,000 \text{ kg/cm}^2$.

$$K = \frac{150\,000 - 130\,000}{5} = 4\,000 \frac{\text{kg/cm}^2}{\text{ano}}$$

O módulo crítico após 5 anos de uso é

$$E_{cri} = \frac{P \times D}{2 \times e \times T_i} \times \frac{E_i}{E_r}$$

$$E_{cri} = \frac{0,96 \times 3\,000}{2 \times 9,6 \times 0,005} \times \frac{150\,000}{130\,000} = 34\,600 \text{ kg/cm}^2$$

A vida química estimada na inspeção de 5 anos é

$$(\text{vida química}) = \frac{150\,000 - 34\,600}{4\,000} = 28 \text{ anos}$$

A vida residual após 5 anos é

$$(\text{Vida residual}) = 28 - 5 = 23 \text{ anos}$$

Portanto, o dono do equipamento pode esperar uma vida residual de 23 anos. De acordo com o resultado exato, calculado no exemplo 1, a vida química correta é 42 anos e a vida residual é 37 anos.

Exemplo 3. Estimar a vida residual do equipamento analisado no exemplo 1, supondo uma única medição do módulo após 10 anos em serviço.

O módulo residual medido após 10 anos de serviço é $115\,000 \text{ kg/cm}^2$

A taxa de perda de módulo é

$$K = \frac{150\,000 - 115\,000}{10} = 3\,500 \frac{\text{kg/cm}^2}{\text{ano}}$$

O módulo crítico após 10 anos de serviço é

$$E_{\text{cri}} = \frac{P \times D}{2 \times e \times T_i} \times \frac{E_i}{E_r}$$
$$E_{\text{cri}} = \frac{0,96 \times 3\,000}{2 \times 9,6 \times 0,005} \times \frac{150\,000}{115\,000} = 39\,000 \text{ kg/cm}^2$$

A vida química estimada na inspeção de 10 anos é

$$(\text{vida química}) = \frac{150\,000 - 39\,000}{3\,500} = 31 \text{ anos}$$

A vida residual após 10 anos é

$$(\text{Vida residual}) = 31 - 10 = 21 \text{ anos}$$

Assim, após 10 anos em uso, a vida residual do tanque é 21 anos. De acordo com o resultado exato, calculado no exemplo 1, a vida química é 42 anos e a vida residual é $42 - 10 = 32$ anos.

5 – Vida residual de revestimentos. A pequena espessura dos revestimentos em substratos de aço ou de concreto, tem algumas implicações na sua vida química. São elas:

- Os produtos químicos pouco agressivos penetram com rapidez nos laminados e possivelmente saturam os revestimentos. Porém, graças ao já citado efeito escudo, a concentração desses produtos na interface revestimento-substrato é pequena. Isso, aliado à

pouca agressividade do produto, pode ser suficiente para preservar o substrato, que nesse caso tem vida muito longa.

- *Os produtos químicos muito agressivos penetram devagar com frentes de penetração plana e bem definida. Esses produtos podem atacar o substrato, indicando necessidade de trocar o revestimento quando ocorrer penetração plena.*

O alongamento de revestimentos é controlado pelo substrato, tendo valor constante e muito inferior ao umbral de infiltração. Sendo assim não faz sentido medir o módulo residual para inferir a durabilidade de revestimentos.

O tempo de penetração do produto agressivo pode ser estimado medindo a profundidade penetrada em função do tempo. A equação usada é a mesma que vimos antes para o caso de equipamentos

$$\log(\Delta e) = K + C \times \log(\text{durabilidade})$$

Onde

Δe é a espessura do revestimento

K e C são os parâmetros de corrosão

A profundidade penetrada deve ser medida em duas ocasiões diferentes, para dar duas equações independentes que permitam medir os parâmetros K e C. A medição é feita removendo o material penetrado e fazendo o teste de aderência. O teste de aderência verifica se o material penetrado foi de fato removido.

Essas medições são muito complicadas, imprecisas e na maioria das vezes impossíveis de executar. Talvez o melhor a fazer nos casos de revestimentos seja confiar no efeito escudo e só fazer a restauração após confirmar o ataque ao substrato.

Exemplo 4. *Descrever o protocolo para estimar a vida residual de revestimentos de compósitos.*

Se o ambiente for pouco agressivo, a profundidade penetrada não pode ser medida e vamos supor penetração plena. A combinação do efeito escudo com a baixa agressividade do ambiente talvez sejam suficientes para proteger o substrato, que nesse caso terá vida longa, mesmo após a penetração plena do revestimento. A única coisa a fazer é monitorar a ocorrência de ataque no substrato.

Se o ambiente for muito agressivo, permitindo medir a profundidade penetrada, talvez seja possível determinar os parâmetros de corrosão K e C para estimar o tempo para o substrato ser atingido. Quando isso acontece, não temos certeza se vai ou não haver ataque ao substrato. O melhor a fazer, mais uma vez, é monitorar a ocorrência de ataque.

O revestimento deve ser substituído apenas em caso de ataque ao substrato.



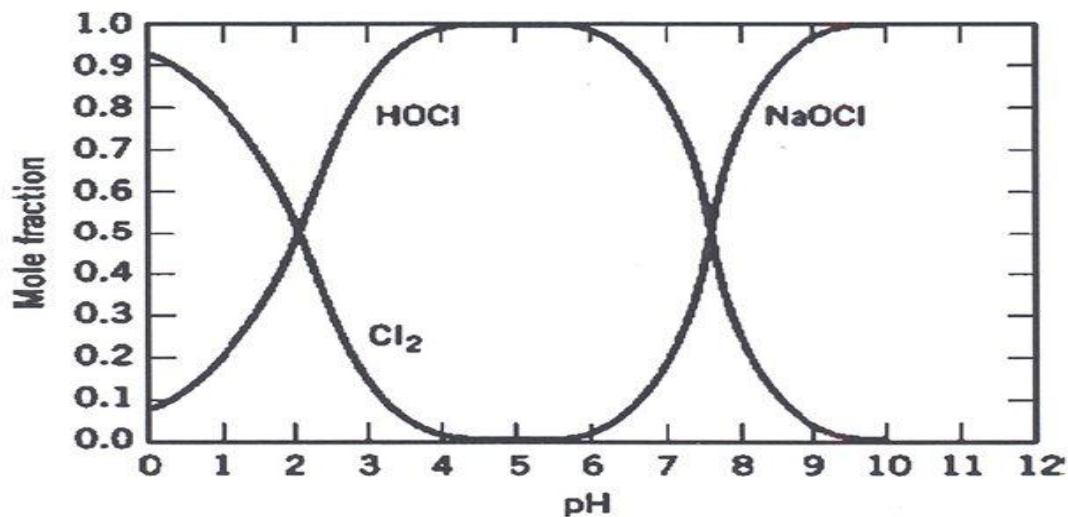
A morte do guerreiro. Este tubo trabalhou durante décadas transportando produtos agressivos em planta de celulose. A barreira de corrosão foi consumida e a estrutura foi penetrada pelo ambiente. Os sinais de vazamento são visíveis e a falha estrutural é iminente. Esse tubo poderia ser revestido por fora, para aumentar sua vida química. Mas, muitas vezes a deterioração é muito grande e os vazamentos impedem essa operação. Nesses casos os equipamentos morrem por falha estrutural causada pelo ataque de produtos químicos. Foto cedida pela Suzano.

Exemplo 6. Gunnar Bergman relata um caso interessante observado na indústria de cloro-soda.

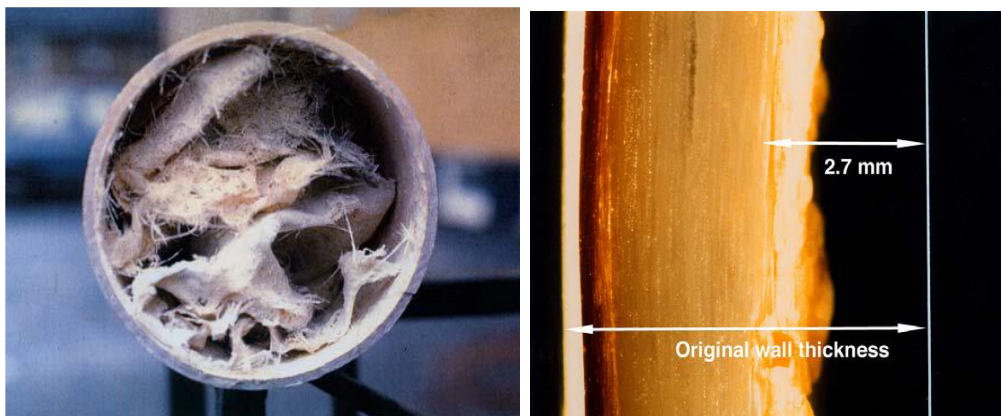
A experiência com tubulação de compósitos na condução do efluente de uma fábrica antiga, que fazia eletrólise usando células de mercúrio, foi muito boa. A barreira de corrosão feita com resina vinil éster, com espessura 2,6 mm, durou 14 anos. Essa boa experiência foi usada como base para recomendar o mesmo sistema para o efluente de uma fábrica nova, que faz a eletrólise usando tecnologia mais moderna, de células de membrana. A tubulação nessa nova fábrica durou menos de um ano. Nos dois casos, a concentração de cloro residual era 0,5 g/l e a temperatura do efluente 80°C. Os tubos foram feitos com a mesma resina, com o mesmo processo de fabricação e com a mesma construção. Como explicar essa diferença de desempenho?

A explicação está na diferença do pH dos efluentes. A eletrólise feita com células de mercúrio produz efluente com pH ácido, entre 2,0 e 2,5. O processo que usa células de membrana, produz efluente com pH neutro, entre 5,0 e 6,0. Se o pH da solução aquosa for ácido – menor que 2,5 – o cloro permanece em solução como cloro molecular de concentração baixa (0,5 g/l) que não causa dano acelerado nos compósitos. Isso explica a longa vida de 14 anos da barreira de corrosão na temperatura de 80°C. Mas, se o pH da solução for neutro – entre 5,0 e 6,0 – o cloro molecular se transforma em ácido hipocloroso, que é muito agressivo e ataca resinas com grande voracidade.

E foi exatamente isso o que aconteceu.



As fotos abaixo mostram os tubos nos dois casos. Na esquerda vemos a seção do tubo que transportou a solução com pH 6,0. Podemos observar que o ácido hipocloroso destruiu a resina, removendo o escudo protetor. A ausência desse escudo implica que a penetração do ácido é linear com o tempo, sendo expressa em mm/ano. Segundo Gunnar Bergman, a taxa de penetração nesse caso foi estimada em 5,0 mm/ano. A foto da direita mostra um corte da parede do tubo que transportou a solução com pH 2,0. Podemos observar que apenas a barreira de corrosão, com espessura 2,6 mm, foi destruída após 14 anos de uso.



A foto da esquerda mostra que o pH neutro da solução produzida na célula de membrana permitiu a formação de ácido hipocloroso e o ataque foi rápido. A foto na direita mostra que o pH ácido da solução produzida na célula de mercúrio manteve o cloro na forma molecular e a tubulação foi pouco atacada.

Exemplo 7. O exemplo anterior mostrou que o ácido hipocloroso consome resinas sem deixar resíduo na superfície interna da tubulação. Isso acontece porque a alta velocidade do efluente carrega a resina destruída e mantém limpa a superfície interna do tubo. Esse tipo de coisa não deve acontecer em tanques ou em tubulações onde a velocidade do efluente é baixa. Mas, vamos ser conservadores e supor que a resina penetrada seja removida da superfície de tanques. Quando esse resíduo é removido, o “efeito escudo” é perdido e a taxa de penetração do ácido hipocloroso é linear e

proporcional ao tempo. No caso relatado no exemplo anterior, a velocidade de penetração foi estimada em 5,0 mm/ano.

Vamos usar essas informações para resolver o problema de um fabricante de clorato de sódio. O processo de produção de clorato de sódio é semelhante ao usado para fazer cloro e soda. Ambos usam células eletrolíticas para fazer eletrólise de salmoura. A solução que sai dos reatores a 80°C tem 600 g/l de clorato de sódio e os inevitáveis resíduos de cloro. O pH da solução depende das células eletrolíticas usadas.

No caso que vamos analisar, a eletrólise é feita em células de membrana, o pH da solução é neutro e o resíduo de cloro é transformado em ácido hipocloroso. Como vimos no exemplo anterior, o ataque do ácido hipocloroso é intenso e a vida química dos equipamentos de compósitos é curta. Para evitar o ataque aos tanques de estocagem, a solução de clorato passa por tanques de maturação onde a concentração do cloro é abatida com água oxigenada. Depois de abater o cloro residual, a solução de clorato de sódio pode ser estocada sem problemas.

Acontece, porém, que de vez em quando ocorre alguma emergência que obriga a interrupção do processo de eletrólise. Nessas ocasiões a solução do reator é transferida diretamente para os tanques de estocagem, sem fazer o abatimento do cloro. Nessa situação, o tanque de estocagem sofre ataque intenso ao ser colocado em contato direto com a solução contendo ácido hipocloroso a 95°C. Esse evento é muito raro e tem curta duração. Nosso problema é determinar a sobre espessura da barreira de corrosão para que o tanque de estocagem tenha vida longa quando submetido a essas situações emergenciais.

São dados:

- A solução de clorato de sódio pode ser armazenada em tanques feitos com a barreira de corrosão padrão, de espessura 2,6 mm. Portanto, para a situação normal de trabalho, a espessura da barreira de corrosão deve ser 2,6 mm.
- O tempo de permanência da solução de ácido hipocloroso nos tanques de estocagem é muito curto, apenas 10 dias por ano.
- A taxa de ataque da solução de ácido hipocloroso é 5,0 mm/ano.

A sobre espessura de sacrifício, para a barreira de corrosão acomodar o ataque do ácido hipocloroso durante 20 anos, é

$$\Delta e = \left(5 \frac{\text{mm}}{\text{ano}}\right) \times \left(10 \frac{\text{dias}}{\text{ano}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ano}}{365 \text{dias}}\right) \times (20 \text{anos})$$

$$\Delta e = 2,75 \text{mm}$$

Essa é a sobre espessura de sacrifício. A espessura total da barreira de corrosão deve ser

$$\left[\begin{array}{l} \text{Espessura total} \\ \text{da barreira de corrosão} \end{array} \right] = 2,75 + 2,60 = 5,35 \text{ mm}$$

A barreira de corrosão deve ser feita com 5 mantas M450 e de preferência usando a tecnologia dual split liner, discutida no capítulo 3.

Apêndice 1

Erros encontrados na literatura

Vamos agora chamar a atenção para alguns erros frequentes encontrados na literatura.

- *É comum encontrar relatórios de inspeção de equipamentos envelhecidos em uso mencionando o uso de ensaios de emissão acústica para prever a vida química residual. Os ensaios de emissão acústica captam defeitos estruturais do equipamento, mas não medem módulos residuais ou profundidades penetradas. Por isso eles NÃO podem estimar a vida química residual.*
- *Os ensaios de termografia, de percussão e os feitos com a vareta de varredura tampouco são capazes de medir o módulo residual ou a profundidade penetrada. Nenhum desses ensaios serve de base para decidir sobre a vida química residual, e por isso são inúteis para programar paradas para manutenção.*
- *Da mesma maneira, os indicadores tradicionais usados para avaliar o grau de cura da resina, como dureza Barcol, sensibilidade à acetona e o ensaio de DSC são irrelevantes para prever a vida química residual. Esses ensaios servem para avaliar equipamentos recém-fabricados, ou para avaliar revestimentos recém-restauradas, mas são inúteis para decidir sobre a vida química residual de equipamentos.*

A vida química de equipamentos de compósitos deve ser avaliada medindo o módulo de tração residual.

Capítulo 17

Vida estrutural dos compósitos

1 - Introdução. O presente capítulo trata da durabilidade estrutural dos equipamentos de compósitos. Essa durabilidade depende unicamente das forças atuantes, sem influência dos produtos armazenados ou transportados. De fato, os produtos químicos afetam a vida estrutural, como podemos facilmente inferir. Porém, como a vida química é muito mais curta que a estrutural, podemos ignorar essa interação. Explicando melhor, todo equipamento que trabalha abaixo do umbral de infiltração em ambiente agressivo deve ser analisado para vida química, sem levar em conta as cargas mecânicas. Porém, sem contato com produtos agressivos, ele deve ser analisado para vida estrutural. Assim, na prática, essas duas vidas são independentes e não interagem.

Portanto, vamos estudar a durabilidade estrutural dos compósitos levando em conta unicamente a deterioração de suas propriedades mecânicas em decorrência da ação de forças externas. A falha do equipamento é determinada pelos umbrais de falha da lâmina crítica.

Os leitores interessados nos modelos completos para computar as durabilidades estrutural e química devem consultar o livro “Durability of Industrial Composites”.

2 - Vida estrutural. A vida estrutural dos compósitos é definida como o tempo de atuação das cargas mecânicas até a deterioração da lâmina crítica atingir as densidades de trincas correspondentes a um dos quatro umbrais de falha. Os umbrais de falha, como sabemos, medem as densidades de trincas correspondentes a falhas por ruptura, por perda de rigidez, por infiltração ou por exudação.

- *O acúmulo de quebras nas fibras enfraquece o laminado, eventualmente causando sua ruptura. As falhas por ruptura são controladas pelas fibras.*
- *O aumento na densidade de trincas produz falhas por perda de rigidez, por infiltração ou por exudação. Essas falhas são controladas principalmente pela tenacidade da resina e sua capacidade de aderir às fibras.*

A ruptura é definitiva e implica em falha catastrófica do equipamento. O aumento da densidade de trincas reduz a rigidez, permite a infiltração e até o vazamento de fluidos, mas não quebra o equipamento.

Os compósitos têm quatro modos de falha estrutural.

- *A falha por ruptura é definitiva*
- *A falha por infiltração ocorre quando a densidade de trincas na resina da lâmina crítica atinge o umbral de infiltração, permitindo a rápida penetração de produtos agressivos. Quando isso acontece, a vida residual do laminado é muito curta, e dizemos que o equipamento falha por infiltração. A falha por infiltração define o tempo máximo que o equipamento pode manter contato com produtos agressivos.*
- *A falha por vazamento – os eruditos preferem o termo exudação – ocorre quando a densidade de trincas na resina da lâmina crítica atinge o umbral de exudação, permitindo o vazamento de fluidos. A falha por vazamento é muito importante no estudo da durabilidade de tubos que transportam produtos não agressivos, como água, vinhaça e esgoto urbano. Sua importância é tão grande que as normas ISO 14692, API 15HR e AWWA C950 a reconhecem como o único modo de falha de tubos pressurizados.*
- *A falha por perda de rigidez ocorre quando a densidade de trincas atinge o umbral de rigidez, tornando o laminado muito flexível.*

Como dito na introdução deste capítulo, a durabilidade estrutural dos laminados não depende do ambiente em contato com eles. Os tempos para falha estrutural são determinados exclusivamente pelas forças mecânicas atuantes, ignorando a natureza dos produtos agressivos em contato com eles. Essa simplificação resulta de a durabilidade química ser muito inferior à estrutural. Se o produto for agressivo, a vida química sempre tem o controle. Se ele não for agressivo, a vida química deixa de existir e a vida estrutural é a única que resta.

Exemplo 1. *Explique, mais uma vez, a independência entre a vida estrutural e a vida química dos compósitos.*

Em ambientes agressivos, os equipamentos de compósitos trabalham sempre abaixo do umbral de infiltração, de modo que as cargas mecânicas não têm efeito na vida química. Por outro lado, a durabilidade dos compósitos é sempre controlada pela vida química, que é muito mais curta que a estrutural. Dessa maneira, nunca temos interesse na vida estrutural dos compósitos em ambientes agressivos. A vida estrutural só tem importância quando os equipamentos não trabalham com produtos químicos.

Portanto, essas vidas são computadas de maneira independente.

3 – Equação unificada. No capítulo anterior vimos que a vida química dos equipamentos de compósitos é estimada pela perda do módulo de tração dos laminados, computada pela equação

$$\log(E - E_{cri}) = K + C \times \log(\text{Durabilidade})$$

Onde

K e C são os parâmetros de corrosão

Durabilidade é a vida química do equipamento

E é o módulo de tração original

Ecri é o módulo de tração crítico, no ponto de falha

A computação da vida química só é possível, porque o ataque dos produtos agressivos causa queda acentuada no módulo de elasticidade do equipamento exposto. Como explicado no livro “Durability of Industrial Composites”, os laminados sujeitos a cargas mecânicas falham por “morte súbita”, sem perda de módulo. Portanto, ao contrário da vida química, não é possível calcular a vida estrutural medindo os módulos residuais dos laminados.

Porém, essa complicação pode ser eliminada lembrando que as vidas estruturais são controladas por uma lâmina crítica, cuja falha implica na perda de função dos laminados. Portanto, a durabilidade estrutural de qualquer laminado é computada partindo da durabilidade de sua lâmina crítica. Como veremos em seguida, essa consideração permite a computação da vida estrutural de qualquer laminado, submetido a qualquer carregamento, sem a necessidade de ensaios.

A partir deste ponto, passamos a discutir a vida estrutural das lâminas. A vida estrutural dos laminados é determinada por elas. Nosso estudo será feito para o caso geral, supondo a ação de carregamentos complexos, consistido de componentes estáticos e cíclicos. A figura 1 mostra os alongamentos máximos, mínimos e médios de carregamentos complexos que incluem componentes de carga estáticos e cíclicos.

O parâmetro de carga, R , é definido como

$$R = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}}$$

Com essa definição, os componentes estáticos e cíclicos dos alongamentos são

$$(\text{componente cíclico}) = R \times \epsilon_{max}$$

$$(\text{componente estático}) = (1 - R) \times \epsilon_{max}$$

Considerando, para simplificar, a notação $\epsilon_{max} = \epsilon$, as igualdades acima podem ser escritas como

$$(\text{componente cíclico}) = R \times \epsilon$$

$$(\text{componente estático}) = (1 - R) \times \epsilon$$

Onde fica entendido que $\epsilon_{max} = \epsilon$

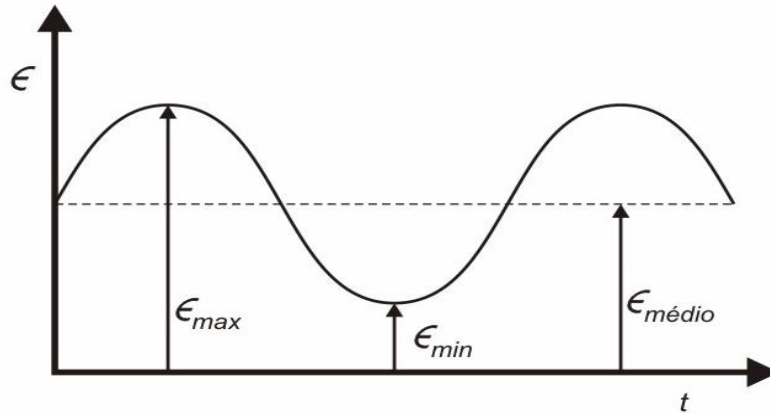


Figura 1

O alongamento mecânico é composto por um componente estático $(1 - R) \times \epsilon_{max}$ e um componente cíclico $R \times \epsilon_{max}$.

A vida estrutural de lâminas sob ação simultânea de cargas estáticas e cíclicas, é computada pela equação unificada, introduzida no livro “Durability of Industrial Composites”

$$\left(\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s}\right)^{\frac{1}{G_s}} + \left(\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1 - R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

Onde

$$R = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}}$$

$$\epsilon = \epsilon_{max}$$

S_s é a resistência estática pura de longo prazo.

S_c é a resistência cíclica pura de longo prazo.

G_s é a declividade da equação estática pura

G_c é a declividade da equação cíclica pura

G_{sc} é o parâmetro de interação entre os componentes estáticos e cíclicos

CS é o coeficiente de segurança para falha em longo prazo.

A equação unificada calcula o coeficiente de segurança CS para falha de lâminas submetidas simultaneamente a cargas estáticas e cíclicas por um tempo X e um número de ciclos N, definidos pelo dono do projeto. A equação unificada não computa os tempos ou o número de ciclos até a falha. Ao contrário, ela calcula o coeficiente de segurança CS quando os tempos de falha e o número de ciclos são conhecidos.

A versão completa da equação unificada, mostrada acima, computa a durabilidade de qualquer lâmina para falhas estruturais por ruptura, levando em conta o ataque de água às fibras. Se a falha estrutural for por infiltração, exudação ou perda de rigidez, a equação unificada completa deve ser simplificada para levar em conta que as resinas não são atacadas pela água. Essa simplificação consiste em simplesmente abandonar o termo correspondente à deterioração estática das fibras.

A equação unificada simplificada, para calcular falhas de lâminas por infiltração, exudação ou perda de rigidez é

$$\left(\frac{(1-R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1-R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

Exemplo 2. Explique a diferença entre a equação unificada completa e sua versão simplificada.

A equação unificada completa calcula o coeficiente de segurança CS para falha de lâminas por ruptura.

A equação unificada simplificada calcula o coeficiente de segurança CS para falha de lâminas por infiltração, exudação e perda de rigidez.

Todos parâmetros que entram nessas equações são conhecidos, exceto o coeficiente de segurança CS. Apesar de deduzida para lâminas, equação unificada computa facilmente a durabilidade estrutural de laminados submetido a qualquer combinação de cargas estáticas e cíclicas. A dedução e o uso dessa equação envolvem detalhes que fogem do escopo deste capítulo. O leitor interessado deve procurar o livro “Durability of Industrial Composites”.

A equação unificada foi deduzida para lâminas e usa parâmetros extraídos de lâminas. Os parâmetros S_s , S_c , G_s e G_c são todos extraídos de retas de regressão puras, estáticas ou cíclicas, de lâminas. Essas retas de regressão são todas conhecidas. O parâmetro G_{sc} , conhecido como “parâmetro de interação”, leva em conta a interação entre os componentes estáticos e cíclicos da carga externa. Esse parâmetro é o calcanhar de Aquiles da equação unificada. Ele é conhecido apenas em alguns casos especiais.

Para facilitar a leitura, as duas versões da equação unificada são repetidas na tabela 1.

<i>Equação</i>	<i>Comentários</i>
$\left(\frac{(1-R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1-R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$	<i>Equação unificada simplificada, para infiltração, exudação e perda de rigidez sob cargas estáticas e cíclicas.</i>
$\left(\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s}\right)^{\frac{1}{G_s}} + \left(\frac{(1-R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1-R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$	<i>Equação unificada completa, para ruptura sob ação simultânea de cargas estáticas e cíclicas.</i>

Tabela 1

Mostra as duas versões da equação unificada para estimar a vida estrutural de lâminas sob cargas com componentes estáticos e cíclicos.

Resumindo, para usar a equação unificada é necessário conhecer duas retas de regressão puras para a lâmina crítica – uma reta estática e outra cíclica – e um parâmetro de interação. As duas retas de regressão são conhecidas para todas lâminas de interesse prático. O parâmetro de interação é conhecido apenas em alguns casos

4 – Retas de regressão puras. A equação abaixo mostra a reta de regressão pura para uma lâmina sob carga estática. Ela relaciona o tempo de ruptura (horas) com o alongamento estático de tração (ϵ) na lâmina.

$$\log(\epsilon) = C_s - G_s \times \log(\text{horas})$$

Uma vez conhecidos os parâmetros “Cs” e “Gs”, podemos calcular o tempo de ruptura (horas) da lâmina em função do alongamento estático de tração (ϵ). A falha por ruptura sob cargas estáticas acontece quando as fibras são atacadas por água. Como a água ataca apenas as fibras de vidro, a equação estática vale apenas para lâminas de fibras de vidro. As falhas por infiltração, exudação e perda de rigidez, controladas pela resina, não são afetadas por cargas estáticas.

A reta de regressão estática é tradicional e nada existe de novo nela. A novidade que estamos introduzindo está no postulado que afirma ser a água o único ambiente capaz de envelhecer estruturalmente lâminas de fibras de vidro. A água é o único produto conhecido que causa ruptura de compósitos de fibras de vidro em longo prazo sob cargas estáticas. Essa afirmação simplifica e viabiliza o estudo prático da vida estrutural dos compósitos.

O parâmetro “Gs” depende da orientação das fibras, tendo valores diferentes para fibras unidirecionais ou picadas. Esse parâmetro mede a resistência das fibras ao ataque da água. Ele é uma propriedade das fibras, independente da resina. Os valores de “Gs” devem ser medidos e informados pelo fabricante das fibras.

O parâmetro “Cs” depende da resina e do arranjo das fibras.

A resistência de longo prazo de lâminas sob cargas estáticas é computada pela equação acima. Seja “X” o tempo de falha. A resistência estática de longo prazo, S_s , é

$$\log(S_s) = C_s - G_s \times \log(X)$$

As retas de regressão puras para cargas cíclicas são semelhantes às estáticas, substituindo o tempo de falha (hora) pelo número de ciclos (N) e o alongamento estático ϵ pela amplitude do alongamento cíclico ϵ_{max} .

$$\log(\epsilon_{max}) = C_c - G_c \times \log(N)$$

Os parâmetros “Cc” e “Gc” da equação cíclica pura são semelhantes aos estáticos puros discutidos antes. Como no caso estático, a resistência cíclica de lâminas no longo prazo é determinada por essa equação. Seja “N” o número de ciclos até a falha. A resistência cíclica de longo prazo, S_c , é

$$\log(S_c) = C_c - G_c \times \log(N)$$

A falha em longo prazo de lâminas sob cargas cíclicas puras é controlada pelo número de ciclos. Ao contrário das cargas estáticas, que afetam apenas a falha por ruptura, as cíclicas afetam todos modos de falha, infiltração, exudação, rigidez e ruptura.

Os parâmetros C_s e C_c correspondem às resistências das lâminas críticas em curto prazo, sendo, portanto, determinados pelos umbrais de falha.

$$C_s = C_c = \log(\text{umbral de falha})$$

No caso de falha por ruptura

$$C_s = C_c = \log(T_r) \quad (\text{Falha por ruptura})$$

As falhas por infiltração, exudação e perda de rigidez são controladas por densidades de trincas na resina, que não é atacada por água. Nesses casos, as retas estáticas deixam de ter significado e as falhas são controladas unicamente por cargas cíclicas.

$$C_c = \log(T_i) \quad (\text{Falha por infiltração})$$

$$C_c = \log(T_w) \quad (\text{Falha por exudação})$$

$$C_c = \log(T_s) \quad (\text{Falha por perda de rigidez})$$

Os parâmetros G_s e G_c medem a deterioração das fibras sob cargas respectivamente estáticas ou cíclicas. A declividade estática G_s é aplicável apenas a falhas por ruptura, porque cargas estáticas não crescem trincas em resinas. Essa declividade é amplamente divulgada e muito conhecida. A declividade cíclica, G_c , assume diferentes valores dependendo do modo de falha, que pode ser infiltração, exudação, etc. Esses valores também são conhecidos.

Os parâmetros C_s , C_c , G_s e G_c , são conhecidos para todas lâminas comerciais. As retas de regressão pura (estáticas ou cíclicas) são conhecidas para todas lâminas, feitas com qualquer resina.

A tabela 2 mostra algumas retas de regressão puras, estáticas e cíclicas, para lâminas comerciais. O leitor interessado na dedução dessas equações deve consultar o livro “Durability of Industrial Composites”.

<i>Retas cíclicas para falha por infiltração</i>	
$\log(\epsilon) = \log(T_i) - G_c \times \log(N)$	
<i>Lâmina UD. Direção das fibras</i>	-----
<i>Lâmina UD. Direção transversal, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,40) - 0,045 \times \log(N)$
<i>Lâmina UD. Direção transversal, DK 411</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,50) - 0,050 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,40) - 0,045 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, DK411</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,50) - 0,050 \times \log(N)$

<i>Retas cíclicas para falha por exudação</i>	
$\log(\epsilon) = \log(T_w) - G_c \times \log(N)$	
<i>Lâmina UD. Direção das fibras</i>	-----
<i>Lâmina UD. Direção transversal, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,45) - 0,048 \times \log(N)$
<i>Lâmina UD. Direção transversal, DK 411</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,55) - 0,052 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,80) - 0,060 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, DK411</i>	$\log(\epsilon) = \log(1,10) - 0,067 \times \log(N)$

<i>Retas cíclicas para falha por ruptura</i>	
$\log(\epsilon) = \log(T_r) - G_c \times \log(N)$	
<i>Lâmina UD. Direção das fibras</i>	$\log(\epsilon) = \log(3,00) - 0,089 \times \log(N)$
<i>Lâmina UD. Direção transversal, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(0,70) - 0,057 \times \log(N)$
<i>Lâmina UD. Direção transversal, DK 411</i>	$\log(\epsilon) = \log(1,00) - 0,065 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(1,50) - 0,074 \times \log(N)$
<i>Lâmina de fibras picadas, DK411</i>	$\log(\epsilon) = \log(2,50) - 0,085 \times \log(N)$

<i>Retas estáticas para falha por ruptura</i>	
$\log(\epsilon) = \log(T_r) - G_s \times \log(hour)$	
<i>Lâmina UD. Direção das fibras</i>	$\log(\epsilon) = \log(3,00) - 0,077 \times \log(hora)$
<i>Lâmina UD. Direção transversal, poliéster</i>	-----
<i>Lâmina UD. Direção transversal, DK 411</i>	-----
<i>Lâmina de fibras picadas, poliéster</i>	$\log(\epsilon) = \log(1,50) - 0,045 \times \log(hora)$
<i>Lâmina de fibras picadas, DK411</i>	$\log(\epsilon) = \log(2,50) - 0,045 \times \log(hora)$

Tabela 2

Mostra as equações puras, estáticas e cíclicas, para algumas lâminas. As equações puras fornecem os parâmetros S_c , S_s , G_c e G_s que entram na equação unificada. A equação unificada usa as equações puras da lâmina crítica para computar a vida estrutural de qualquer laminado submetido a carregamentos complexos, com componentes estáticos e cíclicos atuando simultaneamente.

Exemplo 1. Computar os alongamentos estáticas e cíclicas que falham lâminas de fibras picadas feitas com resina poliéster, após $X = 50$ anos e $N = 10^7$ ciclos em serviço.

O problema será resolvido para todos modos de falha. as retas de regressão foram extraídas da tabela 2.

Ruptura estática

$$\log(\epsilon) = \log(1,50) - 0,045 \times \log(hour)$$

$$\log(S_s) = \log(1,50) - 0,045 \times \log(50 \times 365 \times 24)$$

$$S_s = 0,83\%$$

Ruptura cíclica

$$\log(\epsilon) = \log(1,50) - 0,074 \times \log(N)$$

$$\log(S_c) = \log(1,50) - 0,074 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,45\%$$

Infiltração

$$\log(\epsilon) = \log(0,40) - 0,045 \times \log(N)$$

$$\log(S_c) = \log(0,40) - 0,045 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,20\%$$

Exudação

$$\log(\epsilon) = \log(0,80) - 0,060 \times \log(N)$$

$$\log(S_c) = \log(0,80) - 0,060 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,30\%$$

Esses são os alongamentos que falham lâminas de poliéster com fibras picadas após $X = 50$ anos e $N = 10^7$ ciclos de uso contínuo. Eles representam as resistências de longo prazo da lâmina, sendo usadas diretamente na equação unificada para computar a vida estrutural.

O leitor deve observar que nada dissemos sobre a resistência residual da lâmina em longo prazo. Não estamos tratando aqui de resistência residual, mas de alongamentos que causam falha, isto é, de resistências em longo prazo.

5 – Intervalo para o coeficiente de segurança CS. As equações puras, estáticas e cíclicas, da lâmina crítica não são suficientes para computar a vida estrutural de laminados sob cargas complexas. As equações puras nos dão as resistências das lâminas em longo prazo, S_c e S_s , bem como os parâmetros G_s e G_c , mas sem dar o parâmetro de interação G_{sc} . A determinação desse parâmetro de interação é feita por interpolação entre várias retas de regressão pré-determinadas para diferentes relações de carga R e frequências de carregamento. Essas retas são muito caras para determinar e no momento não são conhecidas. Isso significa que, infelizmente, a poderosa equação unificada não pode ser usada para resolver casos práticos de durabilidade de laminados sob cargas complexas.

Porém, na falta do parâmetro de interação G_{sc} , a equação unificada pode ser usada para determinar os valores máximos e mínimos dos coeficientes de segurança de longo prazo CS. O valor exato do coeficiente de segurança CS cai dentro desse intervalo.

O limite inferior do coeficiente de segurança CS é dado por

$$CS = \frac{R \times S_s}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

A equação acima dá o valor mínimo do coeficiente de segurança CS em função da relação de carga R, do alongamento e das resistências da lâmina crítica nos prazos arbitrados pelo dono do equipamento. Esses valores são conhecidos para todas as lâminas. Nenhum valor de CS pode ser menor que esse limite.

O limite superior do coeficiente CS é dado por

$$\left[\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s} \right]^{\frac{1}{G_s}} + \left[\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c} \right]^{\frac{1}{G_c}} = 1.00$$

Essa equação nos dá o máximo valor possível para o coeficiente de segurança CS em função da relação de carga R, do alongamento e das resistências da lâmina crítica nos prazos arbitrados. Nenhum valor de CS excede esse limite.

Assim calculamos os valores máximos e mínimos para os coeficientes de segurança CS de longo prazo. O valor real de CS cai dentro desse intervalo. A figura 2 mostra a variação do CS em função de R.

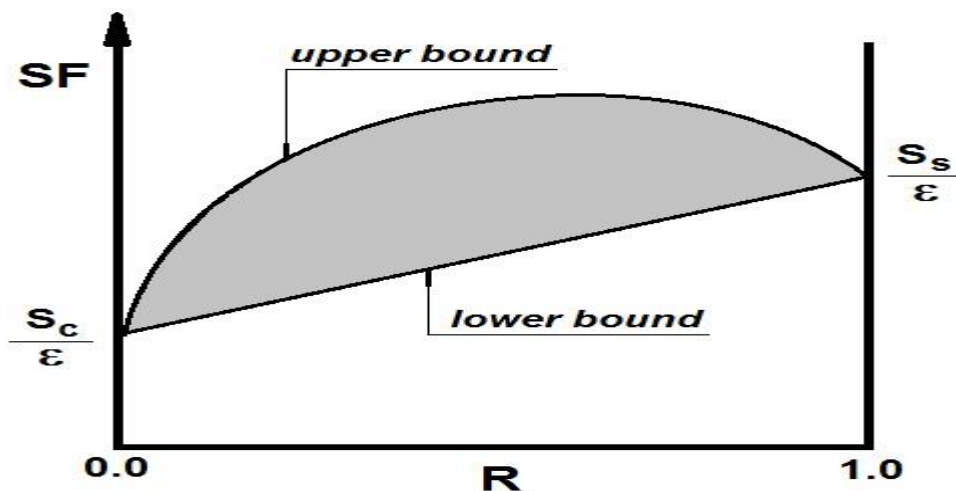


Figura 2
Limites superior e inferior, para o coeficiente de segurança de longo prazo, CS, em função de R. A máxima interação, correspondente ao limite superior máximo, ocorre com R = 0.5.

Nas equações usadas para computar o intervalo para CS, as resistências de longo prazo da lâmina crítica, S_s e S_c, bem como os parâmetros G_s e G_c, são obtidos das retas de regressão puras, que são conhecidas. A relação de carga R e o alongamento de pico ε, são obtidos fazendo a análise estrutural do laminado, como discutido no livro “Cálculo estrutural de

tanques e tubos”. O desenvolvimento de um intervalo para o coeficiente de segurança de longo prazo, CS, independente do parâmetro de interação Gsc, resolve o problema da durabilidade estrutural dos compósitos para qualquer carregamento.

O leitor vai notar que estamos admitindo falhas simultâneas para o laminado e a lâmina crítica. Isso é válido para falhas por infiltração, ruptura e perda de rigidez. Mas não vale para exudação.

6. Intervalo para falhas independentes do tempo. As equações mostradas acima são gerais e valem para qualquer modo de falha. Elas podem ser simplificadas para falhas dependentes apenas do número de ciclos, como infiltração e exudação.

Para falhas dependentes apenas do número de ciclos, a resistência estática de longo prazo é igual ao umbral de falha, e a declividade da reta de regressão estática é igual a zero.

$S_s = \text{umbral de falha.}$

$G_s = 0.0$

Entrando essas condições nas equações anteriores, temos

Para o limite inferior

$$CS = \frac{R \times S_s}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

$$CS = \frac{R \times (\text{umbral de falha})}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

Para o limite superior

Entrando $G_s = 0$ na equação completa, temos

$$\left[\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s} \right]^{\frac{1}{G_s}} + \left[\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c} \right]^{\frac{1}{G_c}} = 1.00$$

$$\left[\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c} \right]^{\frac{1}{G_c}} = 1.00$$

Que reduz a

$$CS = \frac{S_c}{(1 - R) \times \epsilon}$$

Exemplo 2 – Determinar o coeficiente de segurança residual para falha por ruptura de uma tubulação hoop-chop operando nas condições seguintes.

Alongamento máximo

$\epsilon = 0,45\%$

Relação de carga

$R = 0,65$

Tempo de vida desejado

$$X = 50 \text{ anos}$$

Número de ciclos esperado em 50 anos

$$N = 10^7 \text{ ciclos}$$

Tubulação feita com resina DK411

Para falha laminados hoop-chop e falha por ruptura, a lâmina UD90 é crítica. As retas de regressão puras, estáticas e cíclicas, para lâminas UD90 tracionadas na direção das fibras são:

$$\log(\epsilon) = \log(3,00) - 0,077 \times \log(\text{hora})$$

$$\log(\epsilon) = \log(3,00) - 0,089 \times \log(N)$$

As equações acima são controladas pelas fibras e não dependem da resina. Os parâmetros de regressão para ruptura são obtidos diretamente dessas equações

$$G_s = 0,077$$

$$G_c = 0,089$$

As resistências à ruptura em longo prazo, estática e cíclica, são

$$\log(S_s) = \log(3,00) - 0,077 \times \log(50 \times 365 \times 24)$$

$$S_s = 1,10\%$$

$$\log(S_c) = \log(3,00) - 0,089 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,72\%$$

A versão completa da equação unificada é

$$\left(\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s}\right)^{\frac{1}{G_s}} + \left(\frac{(1-R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1-R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

Entrando os valores acima nessa equação, obtemos

$$\left(\frac{0,65 \times 0,45 \times CS}{1,10}\right)^{\frac{1}{0,077}} + \left(\frac{(1-0,65) \times 0,45 \times CS}{0,72}\right)^{\frac{1}{0,089}} + \left(\frac{0,65 \times (1-0,65) \times 0,45^2 \times CS^2}{1,10 \times 0,72}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

$$(0,27 \times CS)^{\frac{1}{0,077}} + (0,22 \times CS)^{\frac{1}{0,089}} + (0,06 \times CS^2)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

Essa equação não pode ser resolvida, porque o parâmetro de interação G_{sc} não é conhecido. Porém, para ilustrar o método, vamos supor $G_{sc} = 8$. Esse valor arbitrado não tem relação com o real, que é desconhecido.

Com esse valor arbitrado, $G_{sc} = 8$, a equação unificada fica

$$(0,27 \times CS)^{\frac{1}{0,077}} + (0,22 \times CS)^{\frac{1}{0,089}} + (0,06 \times CS^2)^{\frac{1}{8}} = 1,00$$

Resolvendo essa equação, obtemos

$$CS = 3,00$$

Exemplo 3 – Determinar o intervalo do coeficiente de segurança CS para falha por ruptura da tubulação discutida no exemplo 2

O limite inferior para o coeficiente de segurança para ruptura CS é

$$CS = \frac{R \times S_s}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

$$CS = \frac{0,65 \times 1,10}{0,45} + \frac{(1 - 0,65) \times 0,72}{0,45} = 2,15$$

O limite superior é

$$\left[\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s} \right]^{\frac{1}{G_s}} + \left[\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c} \right]^{\frac{1}{G_c}} = 1,00$$

$$\left[\frac{0,65 \times 0,45 \times CS}{1,10} \right]^{\frac{1}{0,077}} + \left[\frac{(1 - 0,65) \times 0,45 \times CS}{0,72} \right]^{\frac{1}{0,089}} = 1,00$$

De onde obtemos

$$CS = 3,73$$

O intervalo para o coeficiente de segurança é, portanto, $[2,15 < CS < 3,73]$

O valor $CS = 3,00$, encontrado para $G_{sc} = 8$, está dentro desse intervalo.

A análise precedente nos dá confiança que a tubulação não falha por ruptura nas condições especificadas.

Exemplo 4 – Determinar o intervalo do coeficiente de segurança CS para falha por infiltração da tubulação discutida no exemplo numérico 2. Supor a tubulação feita com resina vinil éster DK 411.

Para falhas por infiltração, a lâmina de fibras picadas é crítica. A reta de regressão pura para falha por infiltração de lâminas de fibras picadas com resina DK 411 é

$$\log(\epsilon) = \log(0,50) - 0,050 \times \log(N)$$

A resistência cíclica à infiltração em longo prazo é

$$\log(S_c) = \log(0,50) - 0,050 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,22\%$$

A falha por infiltração é controlada pela densidade de micro trincas na resina, sendo independente do tempo e da deterioração das fibras. As equações para os limites superior e inferior do coeficiente CS nesse caso, são

Para o limite inferior

$$CS = \frac{R \times (\text{umbral de falha})}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

O umbral de infiltração para barreiras de corrosão feitas com lâminas de fibras picadas com resina DK 411 é $T_i = 0,50\%$

$$CS = \frac{0,65 \times 0,50}{0,45} + \frac{(1 - 0,65) \times 0,22}{0,45} = 0,89$$

Para o limite superior

$$CS = \frac{S_c}{(1 - R) \times \epsilon}$$

$$CS = \frac{0,22}{(1 - 0,65) \times 0,45} = 1,39$$

O intervalo para o coeficiente de segurança contra infiltração é $[0,89 < CS < 1,39]$

Nossa análise indica que a tubulação pode falhar por infiltração nas condições especificadas.

Exemplo 5 – Determinar o intervalo do coeficiente de segurança CS para falha por exudação da tubulação discutida no exemplo numérico 2. Supor a tubulação feita com resina vinil éster DK 411.

Para falhas por exudação, a lâmina de fibras picadas é crítica. A reta de regressão pura para falha por exudação de lâminas de fibras picadas com resina DK 411 é

$$\log(\epsilon) = \log(1,10) - 0,067 \times \log(N)$$

A resistência cíclica à exudação em longo prazo é

$$\log(S_c) = \log(1,10) - 0,067 \times \log(10^7)$$

$$S_c = 0,37\%$$

A falha por exudação é controlada pela densidade de micro trincas na resina, sendo independente do tempo e da deterioração das fibras. As equações para os limites superior e inferior do coeficiente CS nesse caso, são

Para o limite inferior

$$CS = \frac{R \times (\text{umbral de falha})}{\epsilon} + \frac{(1 - R) \times S_c}{\epsilon}$$

O umbral de exudação para barreiras de corrosão feitas com lâminas de fibras picadas com resina DK 411 é $T_i = 1,10\%$

$$CS = \frac{0,65 \times 1,10}{0,45} + \frac{(1 - 0,65) \times 0,37}{0,45} = 1,87$$

Para o limite superior

$$CS = \frac{S_c}{(1 - R) \times \epsilon}$$

$$CS = \frac{0,37}{(1 - 0,65) \times 0,45} = 2,34$$

O intervalo para o coeficiente de segurança contra exudação é $[1,87 < CS < 2,34]$

Nossa análise indica que a tubulação não falha por exudação nas condições especificadas.

Exemplo 6 – Estimar a vida estrutural e a vida química de piscinas de compósitos.

Vida estrutural: As piscinas trabalham enterradas, com o peso da água transferido integralmente para o solo. Não existem cargas mecânicas atuante nos laminados e a vida estrutural é ilimitada.

Vida química: A água não ataca resinas, e as piscinas têm vida química ilimitada. Porém, o gelcoat de piscinas pode desenvolver bolhas osmóticas e amarelar nas bordas, por ação de radiação UV. O intervalo entre intervenções para renovação, depende da tolerância dos proprietários a esses danos cosméticos.

Exemplo 7 – Estimar a vida química e a vida estrutural de caixas d'água de compósitos.

Vida química: A água não ataca resinas e a vida química de caixas d'água é ilimitada. As caixas expostas ao sol sofrem ataque dos raios UV e podem exigir pintura externa periódica. O intervalo para renovação depende da tinta usada e da tolerância do proprietário.

Vida estrutural: As caixas de grande capacidade são dimensionadas para limitar o alongamento estático a 0,2%. O alongamento cíclico é nulo. Como as caixas são feitas com fibras picadas, é óbvio que a lâmina crítica nelas é a de fibras picadas. O valor do "Ss" estático para 50 anos é calculado pela expressão (9.6) usando valores de Cs e de Gs apropriados para laminados feitos com fibras de vidro picadas.

$$\log(\epsilon) = C_s - G_s \log(t) \quad (9.6)$$

Considerando $t = 50 \text{ anos} = 438\,000 \text{ horas}$ e usando os valores dos parâmetros citados na tabela 2, obtemos

$$\log(S_s) = \log(1,50) - 0,045 \times \log(438000)$$

$$S_s = 0,84\% \text{ (para vida estrutural de 50 anos)}$$

O coeficiente de segurança CS para vida estrutural de 50 anos, é calculado pela equação unificada completa.

$$\left(\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_s}\right)^{\frac{1}{G_s}} + \left(\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{R \times (1 - R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

Como a carga é estática, $R = 1,0$. O alongamento máximo em serviço é $\epsilon = 0,20\%$. Para lâminas de fibras picadas, $G_s = 0,045$. Entrando esses valores na equação acima, obtemos

$$\left(\frac{1 \times 0,20 \times CS}{0,84}\right)^{\frac{1}{0,045}} + \left(\frac{(1-1) \times \epsilon \times CS}{S_c}\right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{1 \times (1-1) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_s \times S_c}\right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$

$$\left(\frac{1 \times 0,20 \times CS}{0,84}\right)^{\frac{1}{0,045}} = 1,00$$

Resolvendo essa equação obtemos o coeficiente de segurança $CS = 4,18$ após 50 anos de uso ininterrupto. A vida estrutural de caixas d'água é praticamente ilimitada.

Exemplo 8 – Estimar a vida estrutural e a vida química de tetos de ônibus.

Vida estrutural: As cargas mecânicas atuantes nesse caso são muito pequenas e podem ser ignoradas. Sendo assim, a vida estrutural é praticamente ilimitada.

Vida química: A radiação solar é o único ambiente agressivo nesse caso. Os raios UV não penetram em laminados e causam danos superficiais que podem ser reparados com pintura periódica.