

Modelos quantitativos para prever as vidas estrutural e funcional de compósitos

Antonio Carvalho (Reichhold do Brasil)

Carlos Marques (Polyplaster)

Introdução. Promessa de vida longa e baixo custo de manutenção. Esses são os dois principais argumentos que sustentam o uso de compósitos em aplicações industriais. Mas, apesar desses argumentos serem reconhecidos e aceitos, ninguém conseguiu até hoje quantificar a durabilidade dos compósitos. Quando confrontados com questões sobre a vida estrutural ou sobre o intervalo entre manutenções, os especialistas geralmente alegam que a durabilidade é difícil de ser quantificada, que a taxa de deterioração depende de muitos fatores, etc, e as perguntas ficam sem respostas. A durabilidade é um tópico de importância fundamental para ampliar a aceitação dos compósitos em aplicações industriais e de infraestrutura. A quantificação da vida útil é o principal problema a ser resolvido pela indústria dos plásticos reforçados. Este trabalho apresenta dois modelos quantitativos e inéditos para fazer isso. Um modelo prevê a vida estrutural e o outro a vida funcional.

Vida estrutural e vida funcional. A vida útil dos compósitos deve ser avaliada dos pontos de vista estrutural e funcional. A vida estrutural é definida como o tempo que a estrutura leva até romper quando submetida a cargas conhecidas. O tempo de ruptura é determinado levando em conta a queda do módulo de elasticidade em função do tempo e da carga atuante. A vida funcional ignora a deterioração do módulo e avalia as estruturas pela aparência e outras propriedades subjetivas. A abordagem funcional não leva em conta a ruptura dos laminados.

A vida estrutural é definida pela ruptura da estrutura e por isso sua determinação é objetiva e definitiva. A vida funcional, ao contrário, depende da interpretação do analista e sua determinação é subjetiva e discutível. A falha funcional não coloca em risco a capacidade estrutural dos laminados.

Três tipos de ambiente. Os ambientes agressivos aos compósitos normalmente são classificados pela deterioração que eles podem causar. Para quantificar a vida dos compósitos, os ambientes devem ser classificados não pela agressividade, mas pelo poder de penetração nos laminados. O grau de agressividade é importante, mas tem relevância secundária na classificação dos ambientes agressivos aos compósitos.

1 - Os ambientes não-penetrantes afetam apenas a superfície dos laminados. Exemplos de ambientes assim são encontrados na deterioração por abrasão, por raios UV, por queima, etc. Para alcançar as camadas interiores esses ambientes devem primeiro destruir as camadas que as antecedem no laminado. Esse modo de ataque é progressivo do tipo “tudo ou nada”, isto é, as camadas atacadas são totalmente destruídas e eliminadas, e as que ficam mantêm suas propriedades intactas.

2 – Os ambientes semipenetrantes atacam apenas as camadas próximas da superfície sem alcançar as profundas, que permanecem intactas. Esses ambientes diferem dos anteriores por não terem uma superfície de separação nítida entre as camadas afetadas e as não

afetadas. Exemplos desses ambientes são os íons e as moléculas encontrados em praticamente todas as aplicações industriais.

3 – Os ambientes penetrantes têm capacidade de atingir com rapidez e facilidade todas as camadas dos laminados. Exemplos de ambientes assim são as tensões mecânicas estáticas ou cíclicas, a temperatura e os solventes, especialmente a água. A água ocupa uma posição de destaque, porque além de estar presente em praticamente todos os ambientes industriais, ela é capaz de atacar as fibras de vidro.

Dois postulados. As falhas estruturais são causadas pelos ambientes penetrantes, que invadem os laminados e danificam todas as lâminas da estrutura. As falhas funcionais, ao contrário, são causadas pelos ambientes não penetrantes e semipenetrantes, que atacam apenas as lâminas próximas da superfície. Portanto, os ambientes penetrantes são os únicos que causam danos estruturais. Essa distinção é fundamental para facilitar o estudo e o entendimento do envelhecimento dos compósitos.

Este trabalho introduz um modelo simples e quantitativo para prever a durabilidade dos compósitos. O novo modelo está baseado em dois postulados:

Postulado 1. A água é a única substância que penetra e causa dano estrutural nos compósitos. Se a água é o único ambiente penetrante, o tempo para ocorrência da falha estrutural não depende da natureza do ambiente agressivo.

Postulado 2. As substâncias agressivas têm pequeno poder de penetração e causam apenas danos superficiais. Isso implica que os ambientes agressivos afetam apenas a vida funcional, isto é, os intervalos entre as manutenções.

Nota: Algumas substâncias, principalmente solventes, destroem os laminados em prazos muito curtos. A vida funcional nesses casos é tão curta que o uso de compósitos não é recomendado.

O postulado 2 deixa claro que – se forem feitas manutenções periódicas - a vida estrutural dos compósitos não é afetada pela natureza do ambiente agressivo.

A vida funcional. As moléculas e os íons têm pequeno poder de penetração e seus efeitos ficam restritos às lâminas próximas à superfície. É claro que esse poder de penetração depende da resina, da construção do laminado e das espécies penetrantes. Por exemplo, os íons de ácido clorídrico têm maior poder de penetração que os de ácido sulfúrico. Isso quer dizer que nas mesmas condições, o ácido clorídrico ataca “mais fundo” que o ácido sulfúrico. O dióxido de cloro tem pequeno poder de penetração e seu efeito fica restrito apenas às lâminas próximas da superfície.

Pelo postulado 2 os ambientes não-penetrantes e os semipenetrantes atacam e destroem uma camada superficial de espessura “ Δe ”, deixando intacto o resto da estrutura. O efeito deles deve ser interpretado como *redução de espessura*, e não como *redução de propriedades mecânicas*. O grau de agressividade deve ser avaliado medindo a espessura da camada destruída “ Δe ”. No caso dos ambientes não-penetrantes a camada “ Δe ” é bem

definida e pode ser medida sem dificuldade. Mas, para os ambientes semi-penetrantes, “ Δe ” não é nítida e muitas vezes nem representa uma redução real de espessura. A espessura dos laminados imersos em ambientes semipenetrantes pode aumentar ou diminuir. Por exemplo, a absorção de água que ocorre nas soluções aquosas pode aumentar a espessura dos laminados. Mas esse aumento de espessura é acompanhado da destruição das propriedades mecânicas da camada superficial “ Δe ”. Nosso problema é como medir a espessura dessa camada.

A figura 1 mostra a profundidade de penetração dos ambientes semipenetrantes. Observe que a concentração das espécies agressivas diminui rapidamente com a profundidade. Esse padrão é típico dos ambientes que têm pequeno poder de penetração. As espécies agressivas avançam lentamente, formando uma frente de ataque cuja nitidez depende do ambiente e do laminado. Se o poder de penetração for grande, como acontece com o ácido clorídrico, a frente é difusa e pouco nítida. Se ele for pequeno, como no caso do dióxido de cloro, a frente é bem nítida e definida. Os laminados ficam divididos em três regiões, uma que é totalmente deteriorada, uma intermediária e outra não deteriorada. A região de transição não pode ser visualizada e é por isso que a espessura “ Δe ” não pode ser medida por meios óticos.

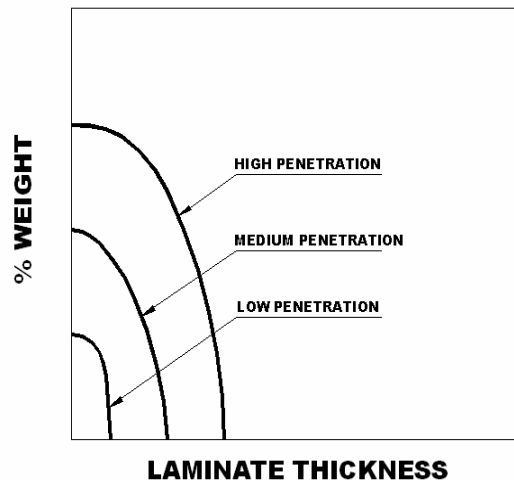


Figura 1

Mostra a profundidade de penetração de moléculas e de íons agressivos em laminado de espessura “e”. O pequeno poder de penetração produz frentes de ataque bem definidas.

A figura 2 mostra uma frente de ataque típica. A camada escura representa a profundidade penetrada e destruída. A espessura dela é visível e pode ser medida por métodos tradicionais, geralmente usando soluções corantes para facilitar a visualização. A camada seguinte, um pouco mais clara, mostra a região de transição, parcialmente penetrada e ainda não destruída pelo ambiente. A espessura dessa região não é visível com a ajuda de corantes e por isso não pode ser medida pelos métodos convencionais. A camada clara que vem em seguida mostra o laminado não penetrado e que mantém suas propriedades originais intactas.

A espessura da zona de transição depende do poder de penetração do ambiente. O grau de agressividade deve ser avaliado pelas espessuras tanto da região atacada como da zona de transição. Essas espessuras não podem ser medidas diretamente e devem ser estimadas a partir da resistência residual do laminado. Vamos fazer isso considerando a perda de espessura aparente “ Δe ” mostrada na figura 2.

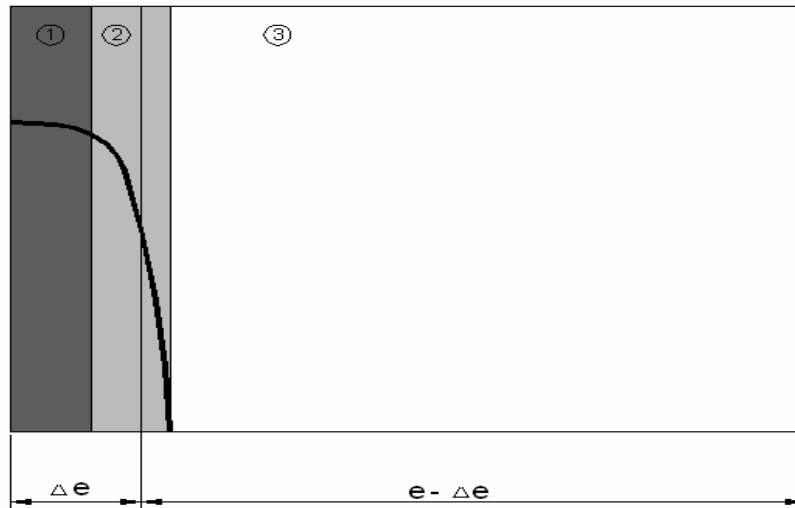
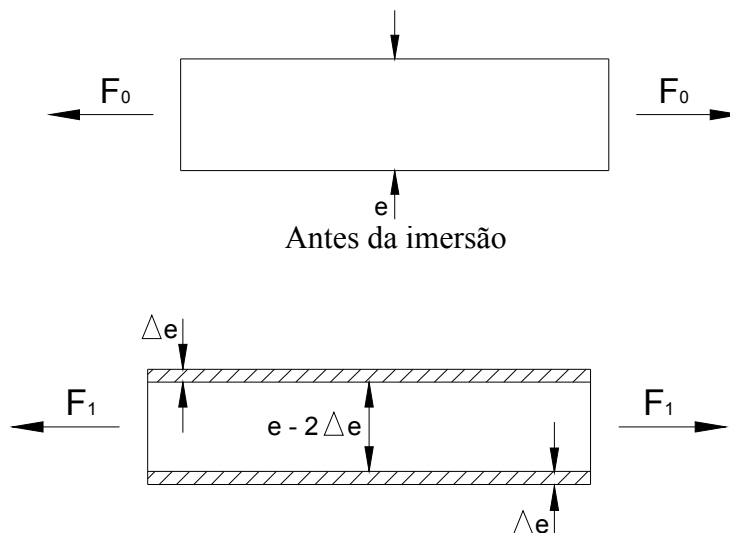


Figura 2

Mostra as espessuras atacadas pelo ambiente. Observe que “ Δe ” é uma espessura fictícia, aparente, maior que a espessura totalmente destruída e menor que a profundidade total de penetração do ambiente.

A figura 3 mostra um laminado de espessura “ e ” antes da imersão no ambiente agressivo. Depois da imersão, a espessura cai do valor original “ e ” para o valor final “ $e - 2\Delta e$ ”, onde “ Δe ” é a perda aparente de espessura. Na grande maioria das vezes o material destruído não é removido da superfície e “ Δe ” não pode ser medida por instrumentos tradicionais, como paquímetros ou micrômetros. O valor de “ Δe ” deve ser medido comparando as resistências do laminado antes e depois da imersão.



Depois da imersão

Figura 3

Mostra a perda aparente de espessura “ Δe ” causada pelo ambiente agressivo. A camada de espessura “ Δe ” geralmente permanece no laminado e por isso a perda de espessura é aparente.

Vamos mostrar como medir “ Δe ” por ensaio de tração. As forças de tração que rompem o laminado são F_0 e F_1 respectivamente antes e depois da imersão. F_0 é maior que F_1 , porque durante a imersão o ambiente ataca e destrói parte da espessura original. Deve ser notado que, de acordo com o postulado 2, essa redução de espessura ocorre sem afetar a resistência do laminado residual.

Nota: A interpretação clássica desses ensaios de imersão afirma exatamente o oposto, isto é, que a espessura é mantida e a resistência é reduzida. O postulado 2 está correto e a interpretação clássica está errada.

Levando em conta que durante a imersão a espessura cai de “ e ” para “ $e - 2\Delta e$ ”, as resistências à tração são

$$\sigma = \frac{F_0}{e} \quad (\text{antes da imersão})$$

$$\sigma = \frac{F_1}{e - 2\Delta e} \quad (\text{depois da imersão})$$

Pelo postulado 2 a resistência “ σ ” é a mesma nos dois casos. Assim,

$$\frac{F_0}{e} = \frac{F_1}{e - 2\Delta e}$$

$$\Delta e = \frac{e}{2} \times \left[1 - \frac{F_1}{F_0} \right] \quad (1)$$

A expressão (1) calcula a perda de espessura “ Δe ” a partir da espessura original “ e ” e das forças que rompem o laminado antes e depois da imersão. Como os ambientes agressivos geralmente são soluções aquosas, o efeito da água absorvida deve ser compensado saturando os corpos de prova antes de fazer o ensaio. Para reduzir o tempo de saturação os corpos de prova devem ter espessura pequena. Além disso, as pequenas espessuras acentuam as diferenças entre as forças de ruptura F_1 e F_0 e aumentam a sensibilidade do ensaio.

Este novo método de avaliação do efeito do ambiente é radicalmente diferente do tradicional descrito na ASTM C 581. O método ASTM C 581 ignora a perda de espessura e interpreta o efeito do ambiente como *perda de propriedades mecânicas*. O novo método, ao contrário, afirma que as propriedades mecânicas são mantidas e que *o efeito do ambiente*

deve ser interpretado como perda de espessura. O novo método é quantitativo e consistente. As perdas de espessura permitem determinar os intervalos entre as paradas para manutenção. O método antigo, ao contrário, é qualitativo e não faz essas previsões. No máximo ele permite fazer recomendações do tipo “aceitável” ou “não aceitável” para os compósitos em contato com ambientes agressivos.

Estamos propondo, portanto, que os efeitos dos ambientes não-penetrantes e semi-penetrantes sejam medidos por um novo método e que o procedimento da ASTM C 581 seja abandonado. O método proposto é quantitativo e estima a perda de espessura “ Δe ” em função do tempo “ t ” pela expressão (2).

$$\log(\Delta e) = C + K \log(t) \quad (2)$$

Os coeficientes “C” e “K” da expressão (2) devem ser determinados experimentalmente para cada ambiente e para cada resina, medindo as perdas aparentes de espessura de corpos de prova em função dos tempos de imersão. As perdas de espessura “ Δe ” devem ser determinadas por ensaios de tração para cada tempo de imersão “ t ”, como indicado na equação (1).

A expressão (2) calcula as perdas de espessura “ Δe ” para qualquer tempo de exposição e pode ser usada para prever os intervalos entre as paradas para manutenção.

A vida estrutural. A seção anterior mostrou que a vida funcional dos compósitos é determinada pela velocidade de penetração dos ambientes semi-penetrantes. A vida estrutural, ao contrário, é determinada pelos ambientes penetrantes, que têm o poder de penetrar, atacar e destruir as fibras localizadas no interior dos laminados. Os principais ambientes penetrantes são os solventes, entre eles a água. Em geral os solventes não atacam as fibras ou a resina e seus efeitos são puramente mecânicos. Além disso, eles penetram com rapidez e seus efeitos podem ser quantificados em curto prazo. Sendo assim, os solventes não entram nas considerações sobre vida útil e envelhecimento. A água, porém, é um solvente especial. A água ataca as fibras de vidro e tem efeito marcante no envelhecimento estrutural dos compósitos.

O ataque da água às fibras de vidro é citado na literatura como “strain corrosion” ou “stress corrosion”, porque para ele acontecer as fibras devem estar submetidas a algum tipo de tensão ou de deformação. O ataque ocorre nas trincas das fibras, onde é intensa a concentração de tensões. Essas trincas crescem com o tempo e a ruptura ocorre quando elas atingem o tamanho crítico. O tempo para a ocorrência da ruptura depende do tamanho original da trinca e do alongamento inicial da fibra. Problemas como esse são tratados pela teoria da mecânica das fraturas. A expressão (3) deriva diretamente dessa teoria e relaciona os tempos de falha (t_r) com os alongamentos iniciais (ϵ_r) das fibras.

$$C = \log(\epsilon_r) + K_s \log(t_r) \quad (3)$$

A expressão (3) é muito conhecida e é amplamente aceita pela comunidade acadêmica. Ela foi deduzida para materiais homogêneos, como as fibras, mas vale também para os

compósitos, que não são homogêneos. Uma vez conhecidos os coeficientes C e K , a expressão (3) calcula os tempos de ruptura (t_r) de qualquer compósito em função dos alongamentos iniciais de tração (ϵ_r).

A equação (3) é de uso tradicional e nada existe de novo nela. A novidade que estamos introduzindo está no postulado 1, que afirma ser a água o único ambiente penetrante capaz de envelhecer estruturalmente os compósitos de fibras de vidro. O postulado 1 afirma que as rupturas são causadas por um único ambiente e simplifica sobremaneira o estudo da vida estrutural dos compósitos. Esta simplificação nos leva à conclusão revolucionária que os tempos de ruptura não dependem da natureza do ambiente agressivo. Se a barreira de corrosão for restaurada nos tempos certos, antes do ambiente penetrar na estrutura, o tempo de ruptura depende apenas do ataque da água. Em outras palavras, se a barreira de corrosão for restaurada, os laminados que trabalham em contato permanente com soluções de soda, de ácido clorídrico, de dióxido de cloro, ou quaisquer outras, falham todos nos mesmos tempos que falhariam se estivessem imersos em água. Essa conclusão pode parecer absurda para os especialistas em compósitos, mas é suportada por fatos e observações experimentais.

A deterioração dos laminados em ambientes não-penetrantes ou semi-penetrantes acontece de fora para dentro e resulta em perda de espessura, sem afetar as propriedades mecânicas do laminado estrutural. O reconhecimento desse fato simplifica de maneira extraordinária o problema de previsão da vida estrutural.

Nosso modelo reconhece que o coeficiente K_s da equação (3) depende do ataque da água às fibras e da aderência entre as fibras e a resina. Portanto, o modelo reconhece o esforço dos fabricantes de fibras para desenvolver tratamentos superficiais diferenciados para aumentar a aderência das fibras às resinas. Esse esforço é justificável, principalmente se as estruturas moleculares das resinas forem muito diferentes. Por exemplo, o tratamento superficial das fibras usadas para reforçar epóxi deve ser diferente do das fibras usadas para reforçar poliamidas. Não é esse o caso das aplicações industriais ou em obras de infra-estrutura, onde as resinas poliéster são dominantes. Supondo que os poliésteres tenham estrutura molecular semelhante, e que o tratamento superficial das fibras tenha sido otimizado para eles, podemos concluir que os diferentes tratamentos pouco afetam o valor de K_s . A resina não é atacada pela água e os diferentes tipos de poliéster também não afetam o valor de K_s . Portanto, para os compósitos de poliéster, podemos supor que o coeficiente K_s da equação (3) depende apenas da composição do vidro e por isso deve ser determinado e informado pelo fabricante das fibras.

O coeficiente C da equação (3) varia com a posição e a orientação das lâminas no laminado. Em menor escala, ele depende também do processo de fabricação das fibras de vidro e da aderência delas com a resina. O valor de C deve ser determinado e informado pelo fabricante do laminado.

Outra inovação do novo modelo é o método de quantificação do incremento de temperatura e do efeito da água que é absorvida pela resina. Os modelos atualmente em uso são incapazes de quantificar esses efeitos na determinação dos tempos de ruptura. Alguns autores sugerem que as perdas de propriedades oriundas da absorção de água e da elevação

da temperatura sejam descontadas das propriedades originais, mas nada dizem sobre o que fazer para determinar os tempos de falha depois desse desconto. Em outras palavras, eles sugerem que esses efeitos sejam pagos à vista, logo de saída, mas nada dizem sobre os tempos de falha. Em nosso modelo os efeitos higrotérmicos são levados em conta de maneira quantitativa pela expressão (4).

$$C = \log(\varepsilon_r + \bar{\varepsilon}) + K_s \log(t_r) \quad (4)$$

onde os alongamentos de origem térmica e hídrica, $\bar{\varepsilon}$, são simplesmente adicionados aos de origem mecânica. A expressão (4) reconhece que os alongamentos térmicos e hídricos têm a mesma natureza dos de origem mecânica. Os modelos tradicionais erram ao considerar esses alongamentos separadamente. E, além disso, a expressão (4) leva em conta os alongamentos higro-térmicos na previsão dos tempos de falha, o que não ocorre com os modelos tradicionais.

Até aqui nosso esforço para estimar a vida estrutural dos compósitos levou em conta o efeito da água e das solicitações estáticas (térmicas, hídricas e mecânicas). A expressão (4) é usada para prever os tempos de ruptura de laminados submetidos a cargas estáticas. Falta incluir as solicitações cíclicas de fadiga. Os tempos de ruptura de laminados submetidos a solicitações cíclicas podem ser determinados pelo modelo de Mandell.

$$\varepsilon_r = UTS \times [1 - K_c \times \log(N_r)] \quad (5)$$

Onde

ε_r é o alongamento de ruptura

N_r é o número de ciclos que causa ruptura.

UTS é o alongamento de ruptura inicial, medido em curto prazo.

$K_c = 0,10$ é o coeficiente de perda de propriedades por década de ciclos.

A previsão de falha por fadiga é baseada no modelo de Mandell, com uma modificação, que é a seguinte:

O valor de UTS é determinado pela reta de regressão (2) usando para tempo de ruptura a metade do período da onda cíclica.

$$C = \log(UTS = \varepsilon_i) + K_c \times \log\left(\frac{T}{2}\right) \quad (6)$$

Onde T é o período da onda cíclica e, para evitar ambigüidade, o UTS é representado em nosso modelo pelo símbolo ε_i .

Estamos prontos para deduzir a equação que estima a vida estrutural dos compósitos. As equações (3) e (4) prevêm os tempos de falha quando as solicitações estáticas atuam isoladamente. A equação (5) faz a mesma coisa quando a solicitação é cíclica. Quando

essas solicitações atuam simultaneamente, a previsão de vida estrutural deve ser feita pela equação (7).

$$\left(\frac{\epsilon_s}{S_s}\right)^{\frac{1}{K_s}} + \left(\frac{\epsilon_c}{S_c}\right)^{\frac{1}{K_c}} = 1,00 \quad (7)$$

Onde

ϵ_s é a solicitação estática atuante no laminado.

ϵ_c é a solicitação cíclica atuante no laminado.

S_s é a solicitação estática de ruptura de longo prazo, calculada pela expressão (3).

S_c é a solicitação cíclica de ruptura de longo prazo, calculada pela equação (5).

A equação (7) calcula o tempo de ruptura de laminados submetidos simultaneamente a solicitações estáticas e cíclicas. A estrutura não falha se a soma das parcelas correspondentes às solicitações estáticas e cíclicas for menor que 1,00.

As equações. Para facilitar a leitura do texto, as equações usadas para fazer a previsão das vidas estrutural e funcional são repetidas na tabela 1.

Equação	Comentários
$\Delta e = \frac{e}{2} \times \left[1 - \frac{F_1}{F_0} \right] \quad (1)$	Calcula a perda aparente de espessura “ Δe ” de laminados imersos em ambientes agressivos.
$\log(\Delta e) = C + K \log(t) \quad (2)$	Calcula a perda aparente de espessura “ Δe ” em função do tempo. Esta equação permite calcular a vida funcional dos laminados.
$C = \log(\epsilon_r) + K_s \log(t_r) \quad (3)$	Calcula os tempos de ruptura em função dos alongamentos estáticos iniciais atuantes no laminado. A constante K_s depende apenas da composição do vidro.
$C = \log(\epsilon_r + \bar{\epsilon}) + C - K_s \log(t_r) \quad (4)$	Esta equação leva em conta o efeito das tensões térmicas e hídricas na vida estrutural.
$\epsilon_r = UTS \times [1 - K_c \times \log(N_r)] \quad (5)$	Calcula a vida estrutural de laminados submetidos a cargas cíclicas. Em nosso modelo o valor de UTS é calculado pela expressão (6).
$\log(UTS = \epsilon_i) = C - K_s \times \log\left(\frac{T}{2}\right) \quad (6)$	Calcula o valor de $UTS = \epsilon_i$ pela reta de regressão (3), para tempo de ruptura igual à metade do período da onda cíclica.

$\left(\frac{\varepsilon_s}{S_s}\right)^{\frac{1}{K_s}} + \left(\frac{\varepsilon_c}{S_c}\right)^{\frac{1}{K_c}} = 1,00 \quad (7)$	<p>Critério de falha que avalia a vida estrutural de laminados submetidos simultaneamente a cargas estáticas e cíclicas.</p>
--	--

Tabela 1

Mostra as 7 equações usadas para prever as vidas estrutural e funcional de laminados.

Exemplo de cálculo. Nesta seção vamos mostrar como calcular a vida estrutural e o intervalo entre as paradas para manutenção e restauração da barreira de corrosão.

Vamos supor que a estrutura trabalhe nas condições seguintes:

- Alongamento estático atuante $\epsilon_s = 0,25\%$
- Alongamento cíclico atuante $\epsilon_c = 0,15\%$
- A onda cíclica tem período $T = 0,002$ horas, que equivale a 500 ciclos/hora. O número de ciclos em 50 anos é $N = 500 \times 24 \times 365 = 219\,000\,000$ ciclos.

Vida funcional. O intervalo entre as paradas para manutenção é calculado pela expressão (1). Vamos admitir que a barreira de corrosão foi feita com uma resina que, para o ambiente do exemplo, tenha coeficientes C e K iguais a

$$C = 0,23 \text{ e } K = 0,05 \quad (\text{para "t" em horas e "}\Delta e\text{" em mm})$$

Nota: Estes valores de C e de K são inteiramente hipotéticos. O modelo que estamos propondo é muito recente (2006) e ainda não dispõe de resultados de laboratório para estimar os parâmetros de corrosão C e K .

A barreira de corrosão tem espessura original igual a 5,0 mm e deve ser restaurada quando atingir 2,0 mm. Portanto, a perda de espessura admissível entre as paradas para manutenção é

$$\Delta e = 5,0 - 2,0 = 3,0 \text{ mm.}$$

O intervalo entre as paradas para manutenção é dado pela equação (1) com $\Delta e = 3,0$ mm, $C = 0,23$ e $K = 0,05$.

$$\log(3,0) = 0,23 + 0,05 \times \log(t)$$

Podemos concluir que $t = 87584$ horas = 10 anos e, portanto, a barreira de corrosão deve ser restaurada a cada 10 anos.

Vida estrutural. A vida estrutural será avaliada pela expressão (7), supondo que a barreira de corrosão seja trocada a cada 10 anos. Se isso for feito, a água é o único agente capaz de deteriorar a estrutura. Os alongamentos atuantes foram dados e valem $\epsilon_s = 0,25\%$ e $\epsilon_c = 0,15\%$. Para aplicar a equação (7) é preciso conhecer os alongamentos de ruptura para longo prazo. Vamos supor que longo prazo seja 50 anos.

O alongamento estático de ruptura para 50 anos é calculado pela expressão (3), com os valores de C e de K_s medidos experimentalmente para laminados em contato com água. A Flowtite fez essas medições e encontrou $C = 0,124$ e $K_s = 0,055$ para os tempos de ruptura expressos em horas e os alongamentos expressos em %.

Portanto, aplicando a expressão (3) para $t_r = 50 \text{ anos} = 438\,000 \text{ horas}$, $C = 0,124$ e $K_s = 0,055$

$$\log(S_s) = 0,124 - 0,055 \log(438000)$$

$$S_s = 0,65\%$$

Onde S_s é o alongamento estático inicial que rompe a estrutura se atuar ininterruptamente durante 50 anos. O alongamento cíclico inicial que causa ruptura em 50 anos ($N_r = 219\,000\,000$ ciclos) é calculado pela expressão de Mandell modificada para $UTS = \epsilon_i = 1,87\%$.

$$S_c = 1,87 \times [(1 - 0,10 \times \log(219000000))]$$

$$S_c = 0,31\%$$

S_c é o alongamento cíclico inicial que falha a estrutura após 50 anos de uso ininterrupto. O valor de ϵ_i foi calculado pela equação (3) com $t = T/2 = 0,001 \text{ hora}$

$$\log(\epsilon_i) = 0,124 - 0,055 \times \log(0,001)$$

$$\epsilon_i = 1,87\%.$$

Aplicando a equação (7)

$$\left(\frac{0,25 \times CS}{0,65} \right)^{\frac{1}{0,055}} + \left(\frac{0,15 \times CS}{0,31} \right)^{\frac{1}{0,10}} = 1,00$$

Onde CS é o coeficiente de segurança para vida estrutural de 50 anos. A equação acima pode ser resolvida para CS

$$2,85 \times 10^{-8} \times (CS)^{18,18} + 7,04 \times 10^{-4} \times (CS)^{10} = 1,00$$

O que nos dá $CS = 2,06$.

Nosso critério de falha mostra que a estrutura retém um coeficiente de segurança $CS = 2,06$ após 50 anos de uso contínuo nas condições citadas no enunciado do problema.

As demonstrações das equações e os resultados de laboratório que suportam a teoria serão publicados brevemente em livro.

Referências

O trabalho do professor Mandell foi publicado no capítulo 4 do livro "Developments in Reinforced Plastics - Vol 2", edited by G. Prichard, Applied Science Publishers. O título do trabalho de Mandell é "Fatigue Behavior of Fiber-Resin Composites".

Um pouco de história.

As primeiras iniciativas que levaram ao desenvolvimento deste modelo para prever a vida útil de compósitos aconteceram em Março de 2003, quando a Polyplaster recebeu a visita de uma equipe de engenheiros da Petrobrás. A Petrobrás estava interessada em comprar no mercado local uma tubulação de compósitos para água de refrigeração. A Polyplaster não tinha na ocasião a comprovação do HDB cíclico que era exigido pela norma ASTM F 1173 – 01 para tubulações de água em refinarias. O Carlos Marques e eu tivemos uma longa reunião na noite anterior ao encontro, em Belo Horizonte, e concluímos que não havia como comprovar esse HDB cíclico.

Mas por essa ocasião o Carlos Marques e eu estávamos bem familiarizados com os trabalhos sobre fadiga de compósitos desenvolvidos no MIT pelo Professor Mandell. Para minha surpresa, na reunião com a Petrobrás, ao ser questionado sobre o HDB cíclico, o Carlos inesperadamente afirmou que:

“O HDB cíclico pode ser determinado pelo trabalho do professor Mandell”.

Na hora eu entendi o alcance dessa proposta. É claro. O trabalho do professor Mandell resolve o problema de fadiga cíclica. Imediatamente eu fiz uma apresentação do trabalho de Mandell à equipe da Petrobrás e depois o apliquei ao caso específico da tubulação em estudo.

Mas o HDB cíclico não é determinado pelo modelo de Mandell. Ele é determinado pelo procedimento A da Norma ASTM D 2992, que é complicado, caro e demorado. Ai entrou em cena a coragem e a competência do engenheiro João Bosco Santini Pereira, da Petrobrás, que entendeu nossos argumentos e aceitou nossa proposta para deduzir o HDB cíclico segundo o trabalho do professor Mandell.

Foi assim que tudo começou. Depois disso eu estendi o modelo para abranger o caso de fadiga estática, desenvolvi o conceito de ambientes penetrantes, semi-penetrantes e não-penetrantes e trabalhei longamente na maneira correta de quantificar os efeitos higrotérmicos na vida útil dos compósitos. O Carlos sempre me acompanhou nesse trabalho e muitas vezes corrigiu minha rota.

Hoje temos esse modelo quantitativo e simples para determinar a vida útil de compósitos. E tudo começou em Março de 2003, com a confiança do engenheiro Santini e a frase surpreendente do Carlos Marques.