



DURABILIDADE DE COMPOSITES

Rio de Janeiro, 20 de Março 2012.

Antonio Carvalho Filho
Reichhold do Brasil

REICHHOLD

Everywhere Performance Matters



OS COMPOSITES TÊM DUAS VIDAS

Vida funcional:

- Mede o tempo entre as paradas para manutenção.

Vida estrutural:

- Mede o tempo até a falha estrutural:
 - ... por ruptura
 - ... por exudação
 - ... por perda de rigidez



DOIS AMBIENTES

Ambientes não-penetrantes

- Produtos químicos (ácidos, alcalinos, oxidantes, etc).
- Não penetram no laminado e atacam apenas a superfície dos composites. Os produtos químicos determinam a vida funcional.

Ambientes penetrantes

- Água e solventes.
- Penetram em todas as lâminas. A água ataca as fibras e afetam a vida estrutural por ruptura.
- Apesar de penetrar em todas as lâminas, a água não afeta a vida estrutural por exudação ou por perda de rigidez.



DEFININDO O TEMA

Vida funcional

- A vida funcional não é afetada pelas solicitações mecânicas.
- A vida funcional é afetada apenas pelos produtos químicos.

Vida estrutural

- A vida estrutural não é afetada pelos produtos químicos
- A vida estrutural é afetada pelas solicitações mecânicas e pela água.
- A água é a única espécie química capaz de penetrar nos laminados, deteriorar as fibras e afetar a vida estrutural.

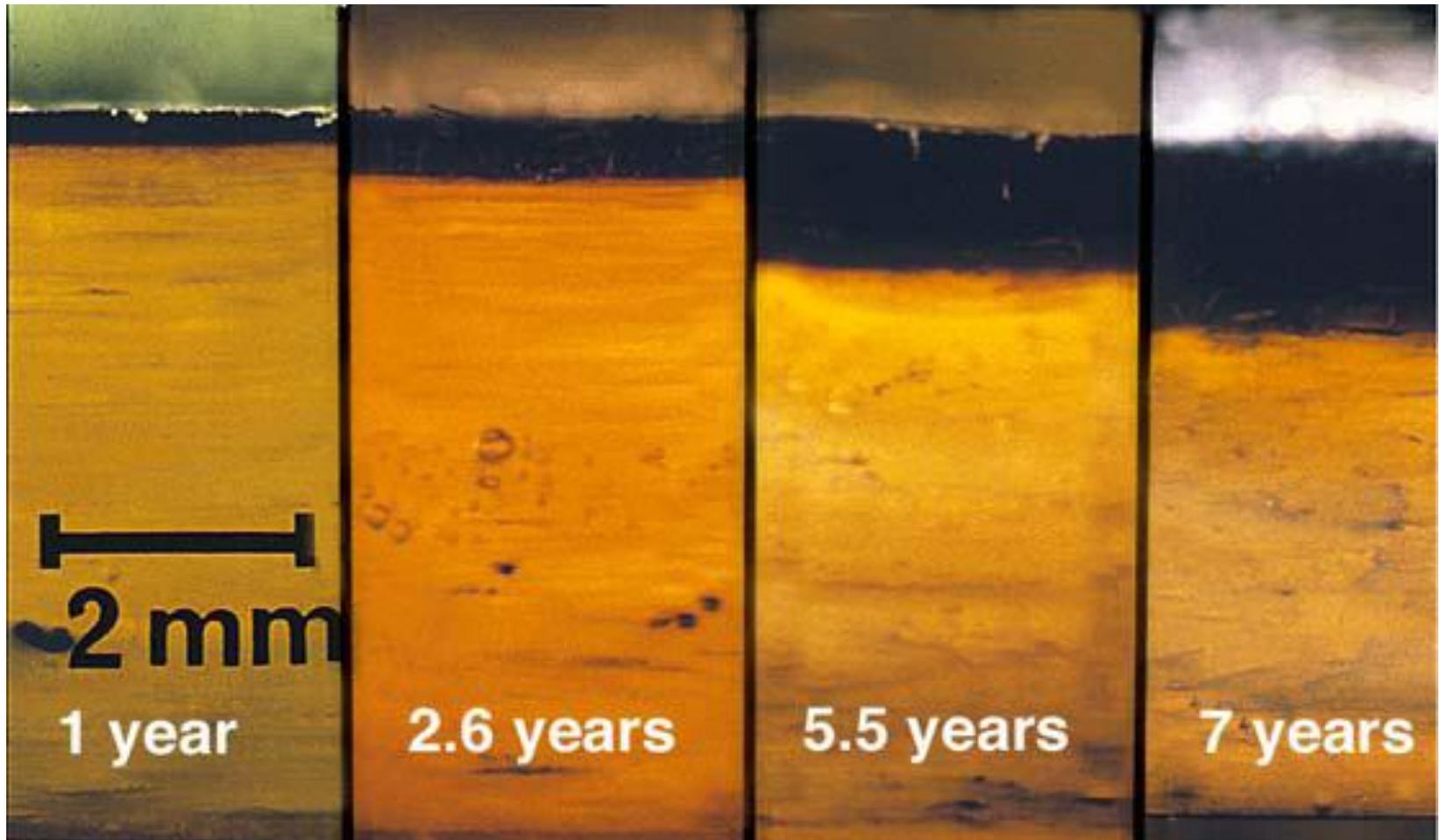


FATORES QUE AFETAM A VIDA FUNCIONAL

- **Radiação UV**
- **Ataque químico**
- **Abrasão**
- **Etc...**
- **A vida funcional é definida por critérios estéticos e de segurança, e nada tem a ver com a vida estrutural**



PENETRAÇÃO DO AMBIENTE AGRESSIVO





MODELO PARA ESTIMAR A VIDA FUNCIONAL

$$\log(\Delta e) = A + B \log(c) + C \log(t) + \frac{D}{T}$$

Δe : Espessura penetrada
c: Concentração do ambiente
t: Tempo de exposição
T: Temperatura absoluta

A, B, C, e D são os parâmetros de corrosão



TRÊS VIDAS ESTRUTURAIS

Perda de rigidez

- Importante para todas estruturas de composites
- A perda de rigidez é controlada pela ruptura da interfase vidro-resina.

Exudação

- Importante para tubos que transportam fluidos sob pressão.
- A exudação é controlada pela ruptura da interfase vidro-resina.

Ruptura

- Importante para todas estruturas de composites
- A ruptura é controlada pela quebra das fibras e implica em falha catastrófica



FALHA POR RUPTURA

- Esta apresentação trata de ruptura em longo prazo. Em nenhum momento falaremos de falha em curto prazo.
- A ruptura das fibras causa falha catastrófica.
- A ruptura da resina tem pouca importância
- A ruptura da interfase causa perda de rigidez ou exudação, mas não rompe os composites.



CARGAS ESTÁTICAS

- A interfase não sofre “strain corrosion” em presença de água e por isso não cresce trincas sob cargas estáticas.
- As fibras sofrem “strain corrosion” em presença de água e crescem trincas sob cargas estáticas.
- As fibras rompem em longo prazo quando tracionadas por carga estática.
- A água está sempre presente. A hidrólise das fibras é inevitável.

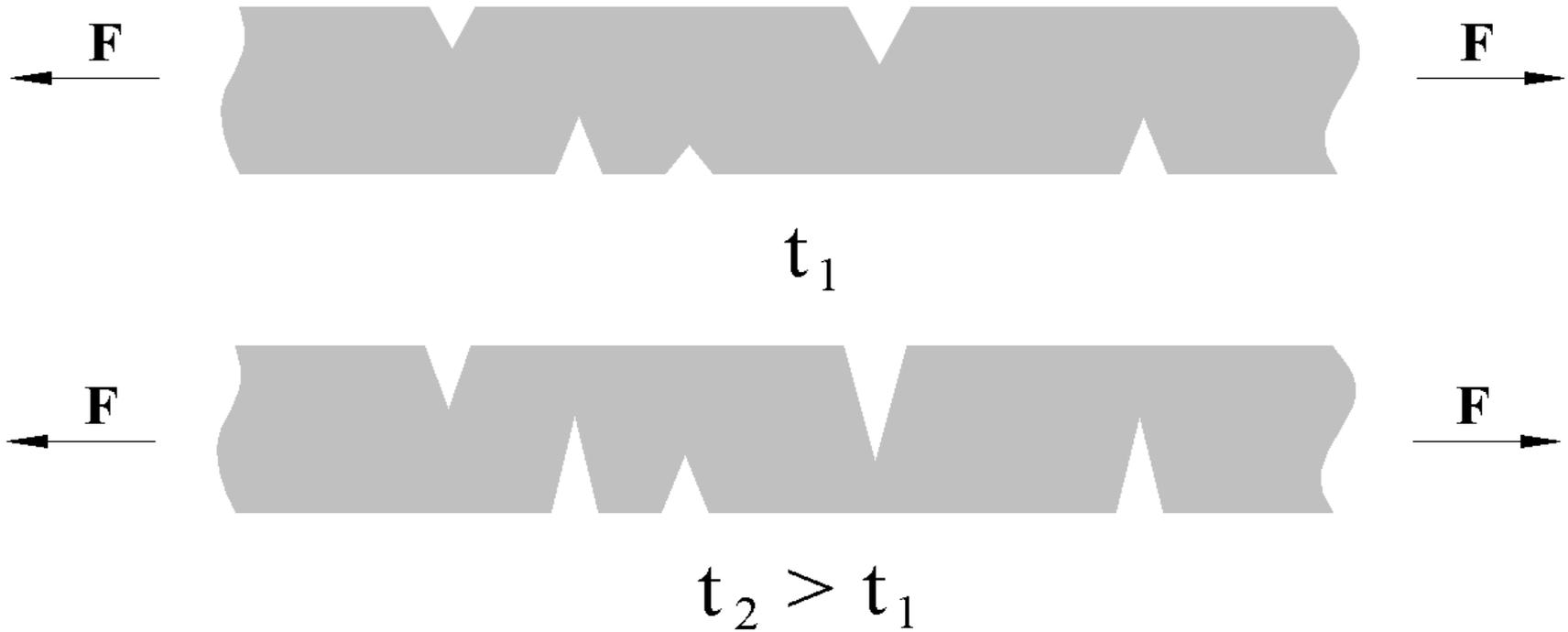


CARGAS CÍCLICAS

- Sob cargas cíclicas as trincas crescem nas fibras e na interfase, independente da presença de água.
- O crescimento das trincas é gradual, um pouquinho por ciclo.
- A interfase e as fibras rompem em longo prazo sob cargas cíclicas.
- Lembre-se:
 - **As fibras rompem no longo prazo sob cargas de tração estáticas (strain corrosion) ou cíclicas (fadiga)**
 - **A interfase rompe no longo prazo sob cargas de tração cíclicas (fadiga)**

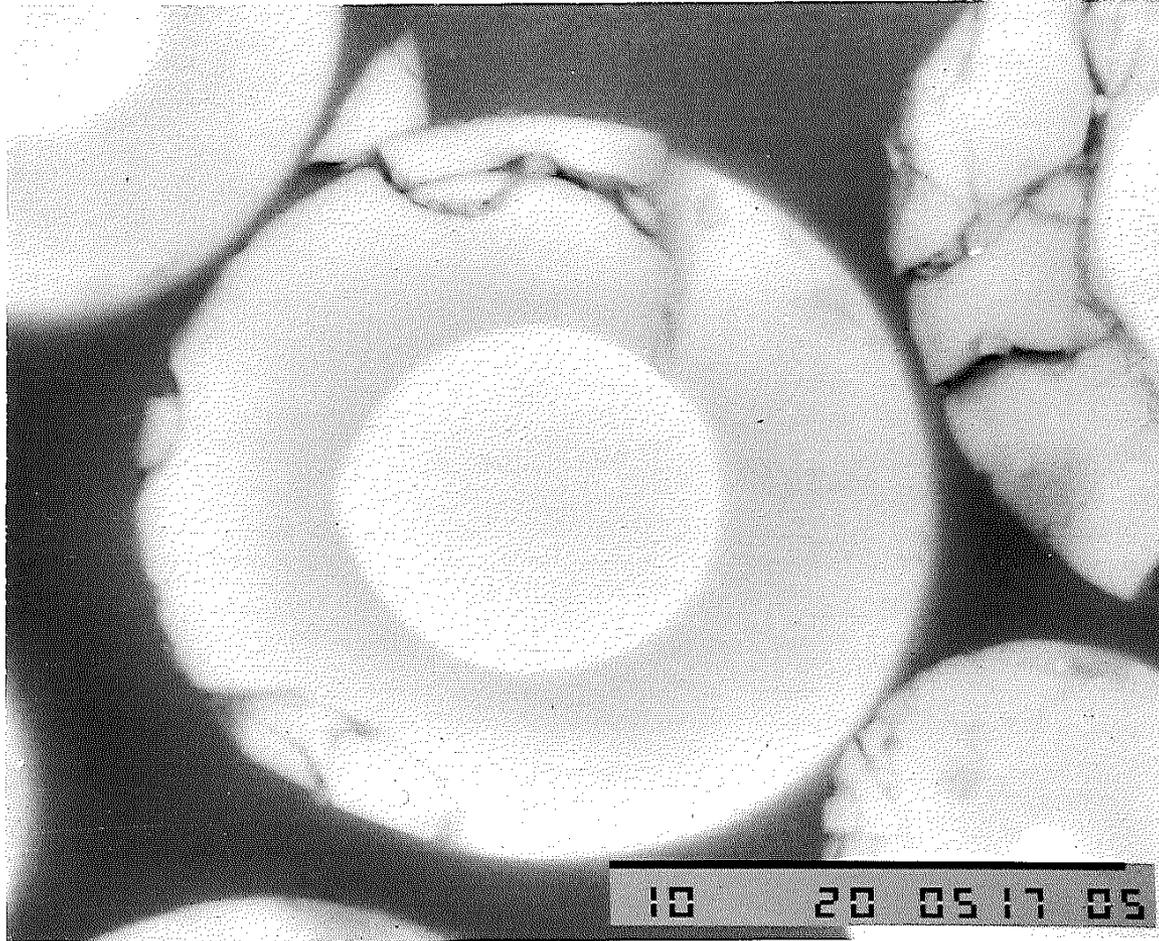


CRESCIMENTO DE TRINCAS ESTÁTICAS NAS FIBRAS STRAIN CORROSION



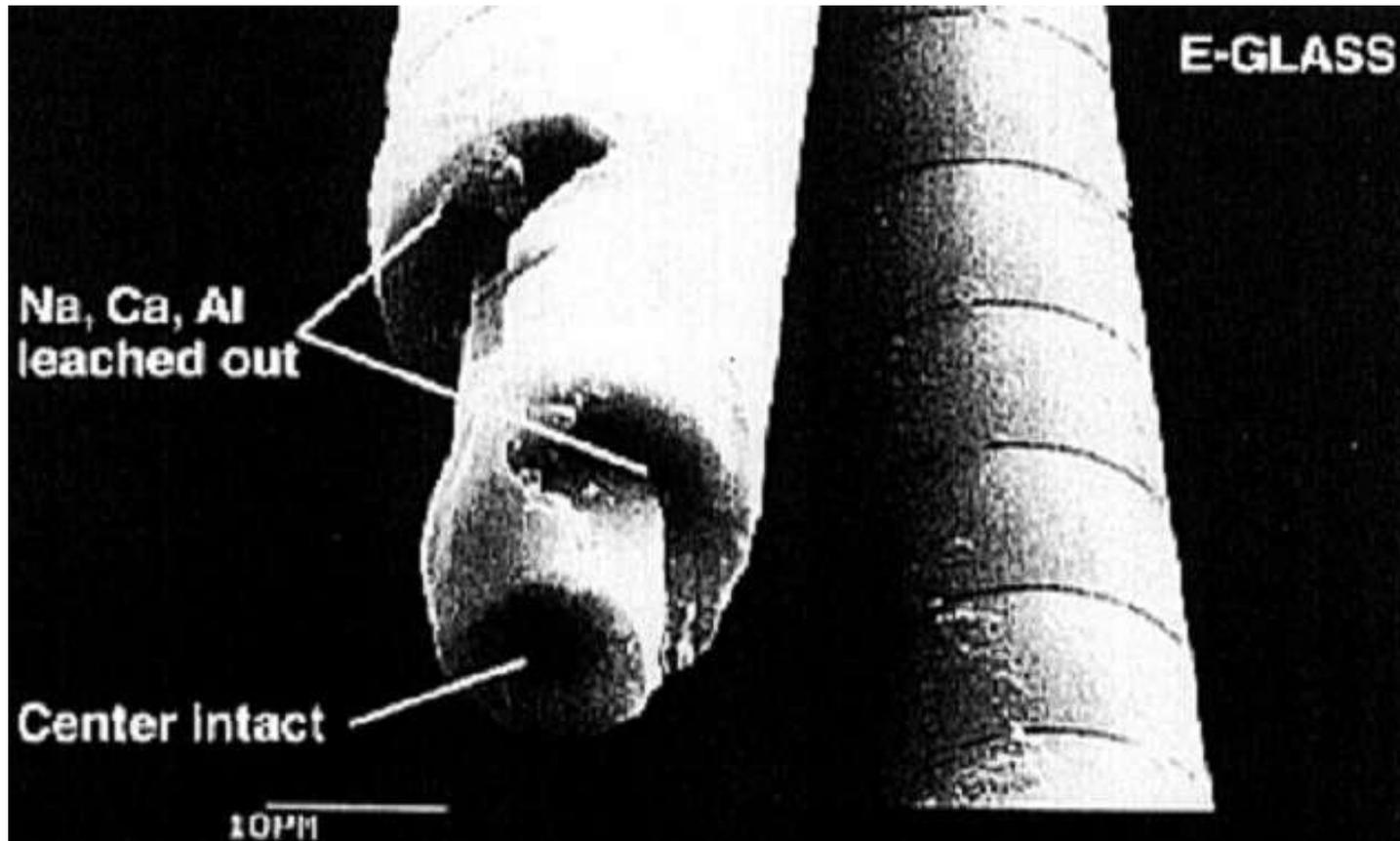


STRAIN CORROSION DAS FIBRAS



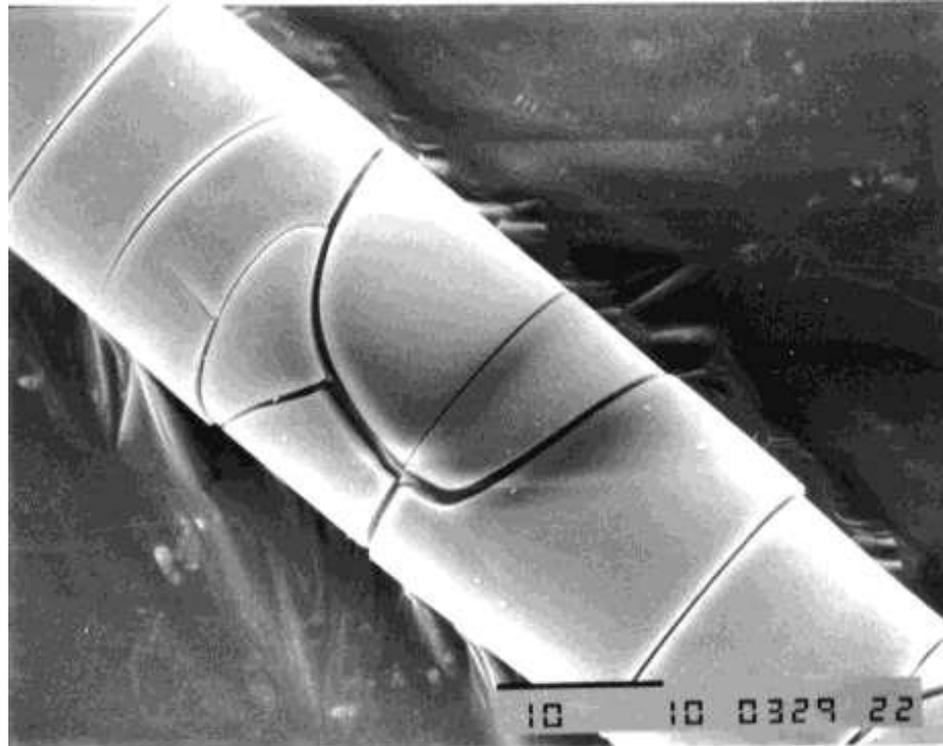


STRAIN CORROSION DAS FIBRAS





STRAIN CORROSION DAS FIBRAS



5460E, 5min .1%HF, 2hr 5%HCl @ 80C, dry 2hr @ 60C



A LEI DE PARIS E OS COMPOSITES

- As trincas crescem em materiais homogêneos como as fibras, os plásticos e os metais. A taxa de crescimento é descrita pela “lei de Paris”.

$$\frac{da}{dt} = Y \left(\varepsilon \sqrt{\pi \times a} \right)^Z$$

$$\frac{da}{dN} = Y \left(\Delta \varepsilon \sqrt{\pi \times a} \right)^Z$$

- Nas fibras as trincas crescem sob carga estática (strain corrosion) ou sob cargas cíclicas (fadiga). Na resina as trincas crescem apenas por fadiga.
- A lei de Paris vale apenas para materiais homogêneos. A ruptura dos composites é descrita por retas de regressão no espaço log x log.

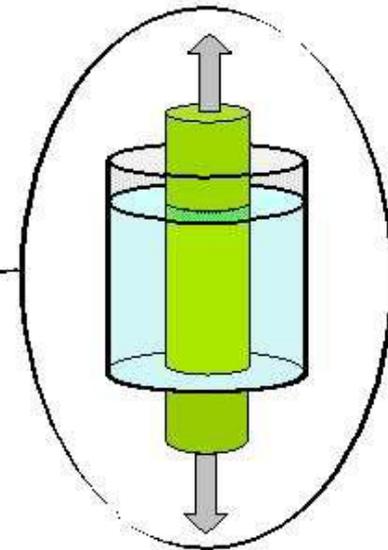
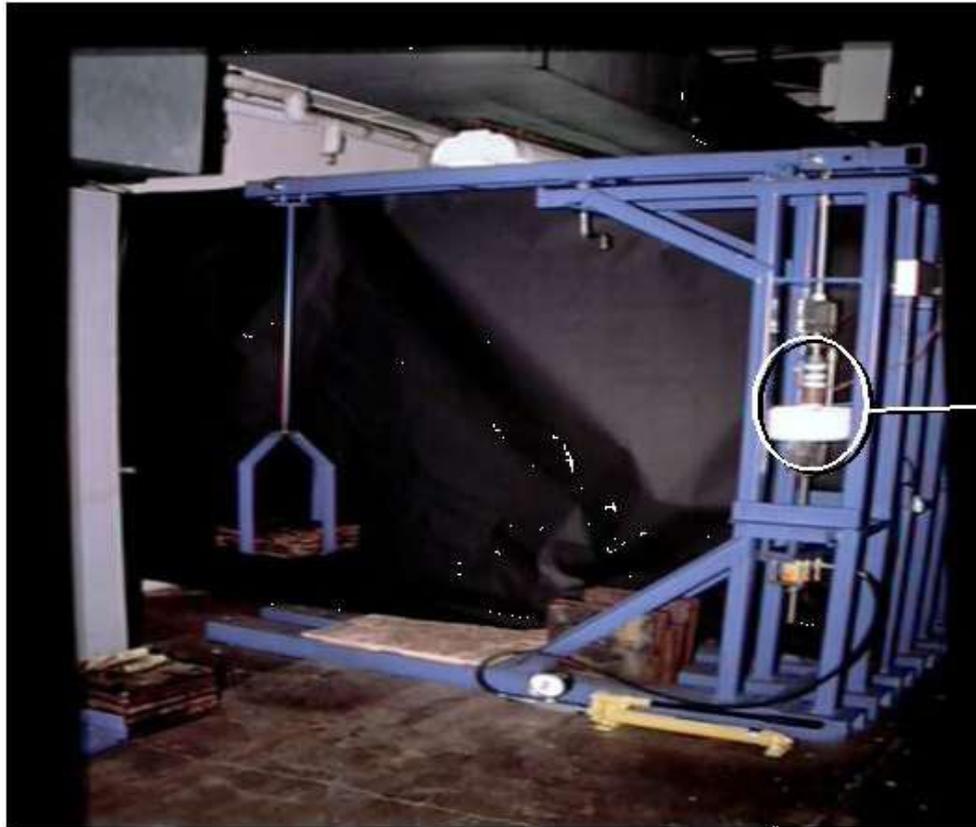
$$\log(\varepsilon) = A_s - G_s \log(t)$$

$$\log(\Delta \varepsilon) = A_c - G_c \log(N)$$



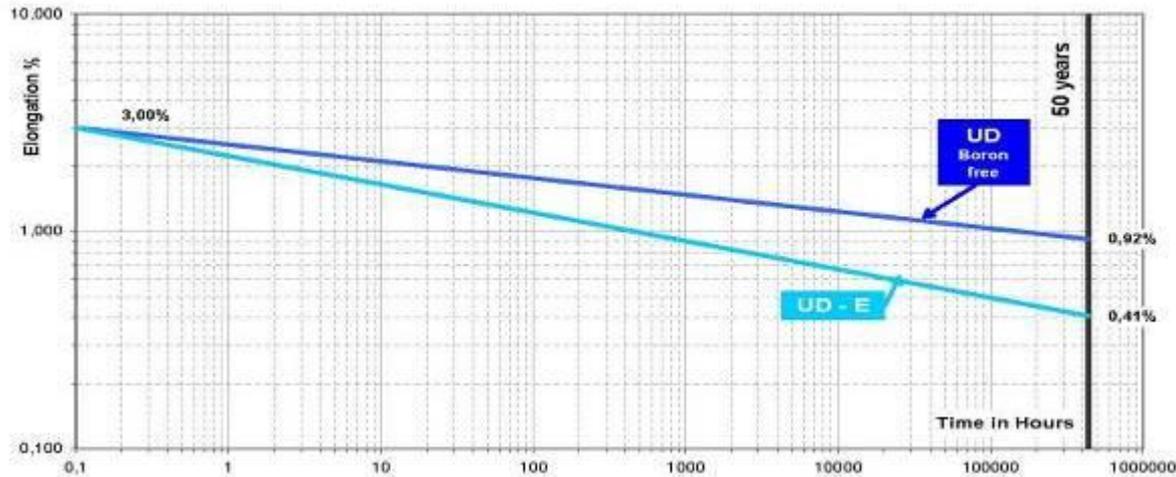
ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA NA DIREÇÃO 1

Determina a reta de regressão estática para a direção 1 das fibras





RETAS DE REGRESSÃO ESTÁTICA PARA TRACÇÃO NA DIREÇÃO 1 (MARK GREENWOOD)



$$\log(\varepsilon\%) = 0,400 - 0,0771\log(hours)$$

$$\log(\varepsilon\%) = 0,347 - 0,130\log(hours)$$

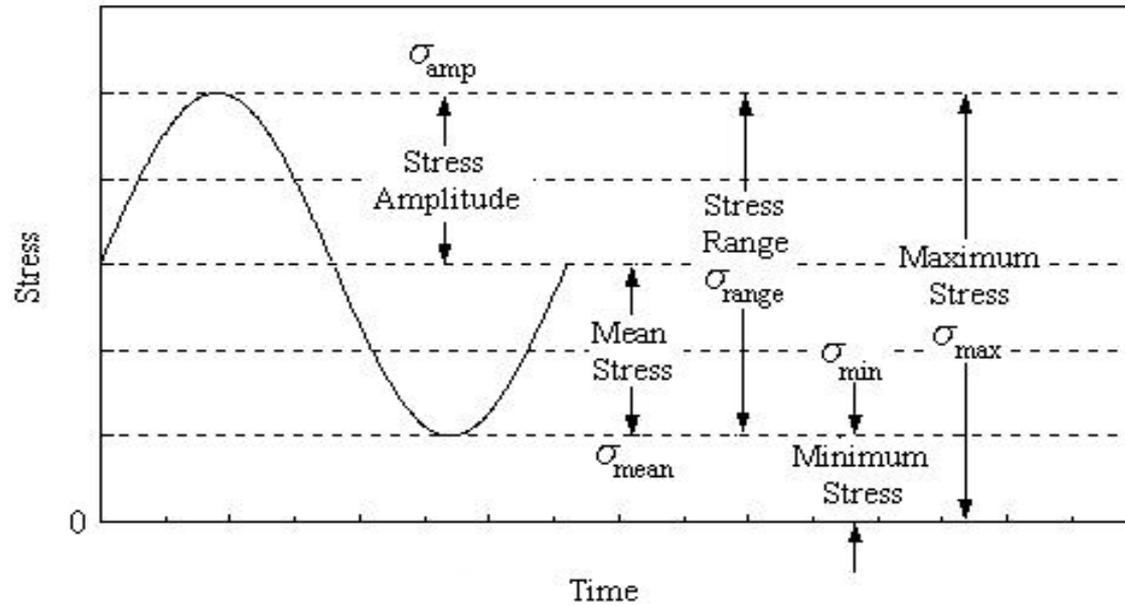


SIGNIFICADO DAS RETAS DE REGRESSÃO

- **A reta de regressão estática mede a deterioração por strain-corrosion das fibras tracionadas na direção 1**
- **As retas de regressão cíclica medem a deterioração**
 - **Das fibras tracionadas na direção 1**
 - **Da interfase solicitada na direção 2**
 - **Da interfase solicitada por cisalhamento**



DEFINIÇÃO DAS CARGAS COMBINADAS



$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{2}$$

$$R = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$$



SUPERPOSIÇÃO E UNIFICAÇÃO

- Os mecanismos de deterioração estática e cíclica são distintos e independentes.
- Por serem distintos e independentes, eles são descritos por retas de regressão distintas e independentes
- Essas retas de regressão podem ser combinadas em uma equação.
- A equação unificada combina os efeitos estáticos e cíclicos da mesma maneira que o diagrama de Goodman.



FORMA GERAL DA EQUAÇÃO UNIFICADA

$$\left(\frac{\varepsilon \times SF}{S_s} \right)^{\frac{1}{G_s}} + \left(\frac{\Delta\varepsilon \times SF}{S_c} \right)^{\frac{1}{G_c}} + \left(\frac{\varepsilon \times \Delta\varepsilon \times SF^2}{S_s \times S_c} \right)^{\frac{1}{G_{sc}}} = 1,00$$



PARÂMETROS PARA LÂMINA UD TRACIONADA NA DIREÇÃO 1

Parâmetro	Valor	Fonte
G _s	0,077 0,130	Mark Greenwood (vidro Advantex) Mark Greenwood (vidro E)
G _c	0,088 0,089	Guangxu Wei (ensaio em lâminas) John Mandell (ensaio em laminados)
G _{sc}	V. tabela	Depende de “N” e de “R”
S _s	Calculado	Determinado pela reta de regressão para carga estática. $\log S_s = 0,400 - 0,077 \log(\text{hours})$
S _c	Calculado	Determinado pela reta de regressão para carga cíclica. $\log S_c = \log 3,30 - 0,089 \log N$

Gsc PARA TRAÇÃO NA DIREÇÃO 1

VALORES OBTIDOS APLICANDO A EQUAÇÃO UNIFICADA AO DIAGRAMA DE GOODMAN

N	R				
	0,0	0,1	0,5	0,9	1,0
10^3	0,0	37	12933	889	0,0
10^4	0,0	73	11678	7012	0,0
10^5	0,0	142	9700	372	0,0
10^6	0,0	258	8114	199	0,0
10^7	0,0	505	6843	108	0,0
10^{10}	0,0	3268	3888	15	0,0



CONCLUSÃO

- A vida funcional da barreira de corrosão é estimada pelos parâmetros de corrosão.
- A vida estrutural por ruptura e perda de rigidez é estimada pela equação unificada.
- A exudação é um modo de falha estrutural, mas não existe “vida para exudação”.



OBRIGADO!

Antonio Carvalho Filho
(+55 11 4795 8205)

antonio.carvalho@reichhold.com