

# DURABILIDADE DE COMPÓSITOS

ANTONIO CARVALHO  
20 SETEMBRO 2021





**IBCom - Instituto Brasileiro dos Compósitos**

# UM TEMA COMPLEXO

VÁRIOS TIPOS DE RESINA

VÁRIOS TIPOS DE FIBRAS

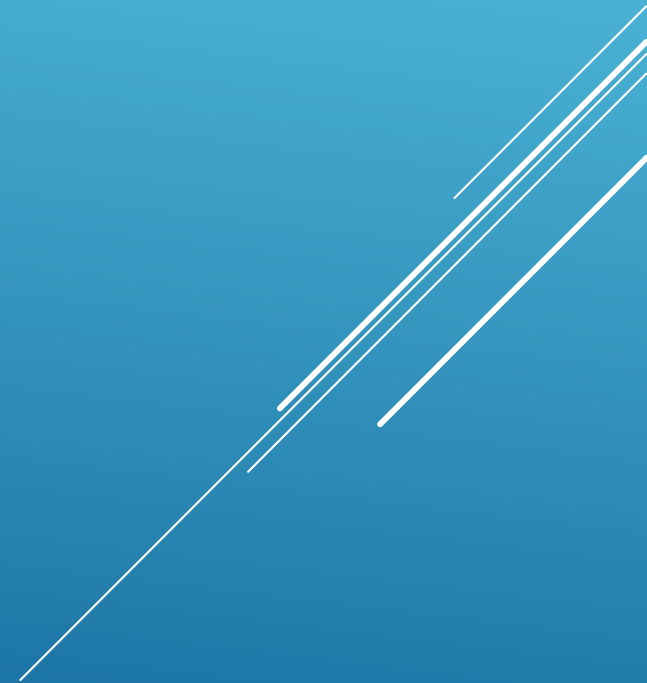
VÁRIAS CONSTRUÇÕES DE LAMINADOS

VÁRIOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

VÁRIOS AMBIENTES

VÁRIOS CARREGAMENTOS

VÁRIOS MODOS DE FALHA



**ABORDAGENS CLÁSSICAS SÃO INADEQUADAS**

**IGNORAM MECANISMOS FUNDAMENTAIS**

**RESULTADOS CONTRADITÓRIOS**

**INCAPAZES DE PREVER DURABILIDADE**



# NOVO MODELO

## OITO MODOS DE FALHA

STRAIN-CORROSION

ABRASÃO

FALHA ANÔMALA

INFILTRAÇÃO

EXUDAÇÃO

PERDA DE RIGIDEZ

RUPTURA

ATAQUE QUÍMICO

# Os compósitos têm oito vidas

Vamos focar apenas duas vidas

Vida química

Não é afetada por solicitações mecânicas.  
Determinada unicamente por ataque químico.

Vida estrutural

Não é afetada por ataque químico  
Determinada unicamente por solicitações mecânicas

# Vida química

• A vida química pode ser prevista pelas equações

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

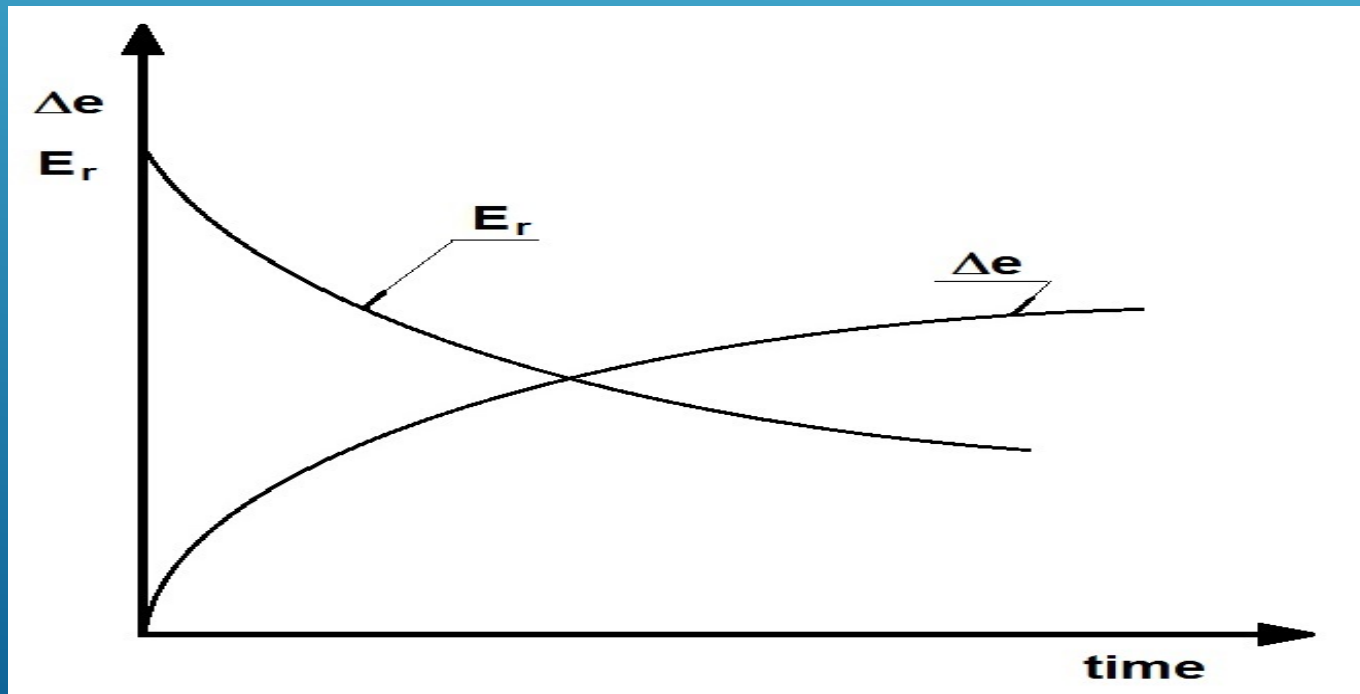
- $\log(\Delta e) = A + B \times \log(c) + C \times \log(t) + \frac{D}{T}$

- $\Delta E$  = perda de módulo
- $\Delta e$  = profundidade penetrada
- A, B, C e D são os parâmetros de corrosão
- c é a concentração da solução agressiva
- t é o tempo de exposição
- T é a temperatura absoluta

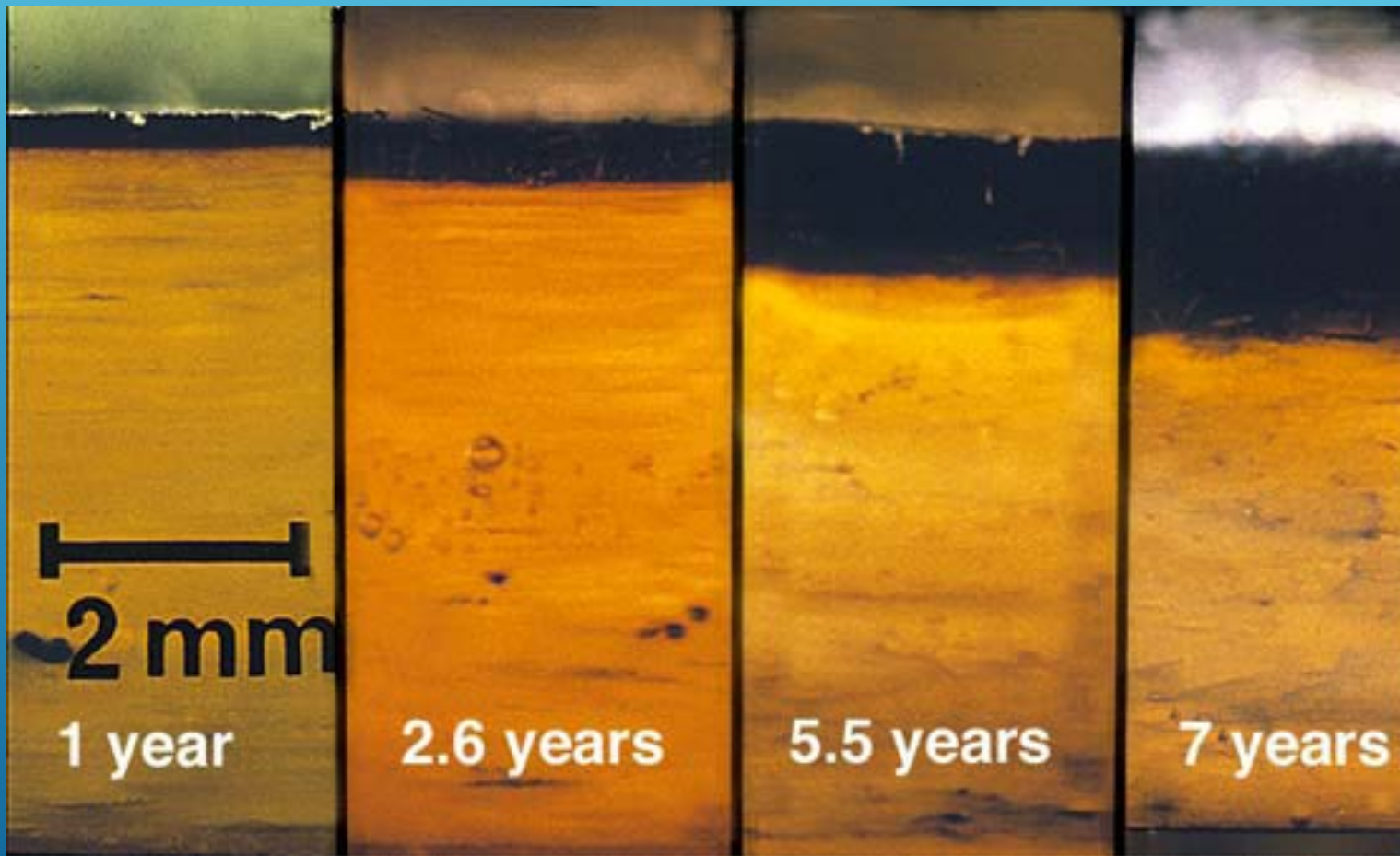
## Equações para ambientes estáveis

$$\text{Log}(E-E_r) = K + C \times \text{log}(t)$$

$$\text{Log}(\Delta e) = K + C \times \text{log}(t)$$



# Penetração de ambientes agressivos em laminados





Vida residual de tubulação  
10 anos em operação  
espessura inicial 15,0 mm  
espessura admissível 8,0 mm

Tempo de inspeção	Espessura penetrada
60 meses (5 anos)	$\Delta e = 4,0$ mm
120 meses (10 anos)	$\Delta e = 6,0$ mm

## Cálculo da vida residual

- $\log(\Delta e) = K + C \log(t)$
- 
- $\log(4.0) = K + C \times \log(60)$
- 
- $\log(6.0) = K + C \times \log(120)$
- 
- 
- $K = 0.397$  e  $C = 0.183$ .
- 
- *A durabilidade é*
- 
- $\log(t - e_{cri}) = K + C \times \log(\text{durabilidade})$
- 
- $\log(15.0 - 8.0) = 0.397 + 0.183 \times \log(\text{durabilidade})$
- 
- *Durabilidade = 280 months = 23 years*
- 
- *Vida residual = (durabilidade) - (tempo em serviço)*
- 
- *Vida residual = 23 - 10 = 13 anos*

## Vida residual inspeção após 5 anos

4,0 mm penetrados em 5 anos

Taxa de penetração:  $4,0 \text{ mm}/5 \text{ anos} = 0,8 \text{ mm/ano}$

Durabilidade =  $(15,0 - 8,0)/0,8 = 8,75 \text{ anos}$

Vida residual =  $8,75 - 5 = 3,75 \text{ anos}$

## VIDA RESIDUAL INSPEÇÃO APÓS 10 ANOS

6,0 mm penetrados em 10 anos

Taxa de penetração:  $6,0 \text{ mm}/10 \text{ anos} = 0,6 \text{ mm/ano}$

Durabilidade =  $(15,0 - 8,0)/0,6 = 11,7 \text{ anos}$

Vida residual =  $11,7 - 10 = 1,7 \text{ anos}$

**ISSO ILUSTRA A DURABILIDADE QUÍMICA**

**VAMOS DISCUTIR A VIDA ESTRUTURAL**

# VIDAS ESTRUTURAIS

## Infiltração

Fundamental para produtos químicos  
Controlada pelo umbral de infiltração

## Exudação

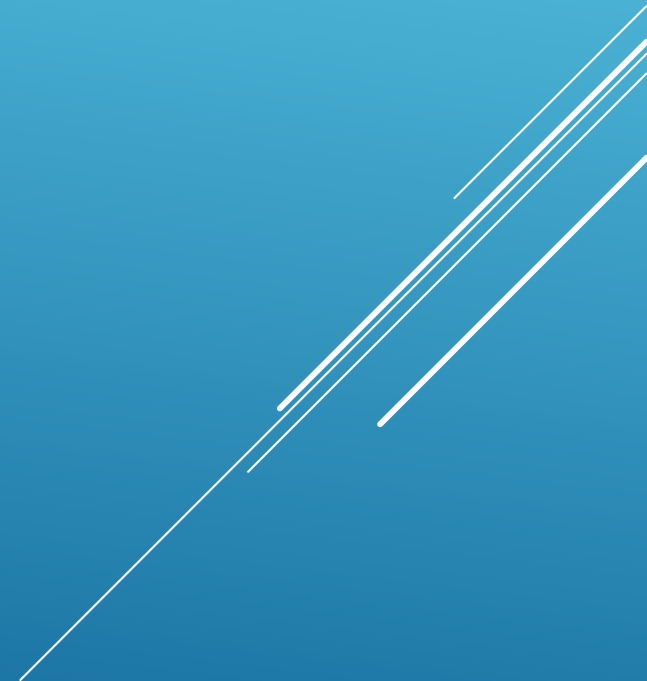
Fundamental para tubos que transportam fluidos sob pressão.  
Controlada pelo umbral de exudação

## Perda de rigidez

Importante para ambientes secos  
Controlada pelo umbral de rigidez

## Ruptura

Controlada pelo umbral de ruptura  
Falhas por ruptura não têm importância comercial

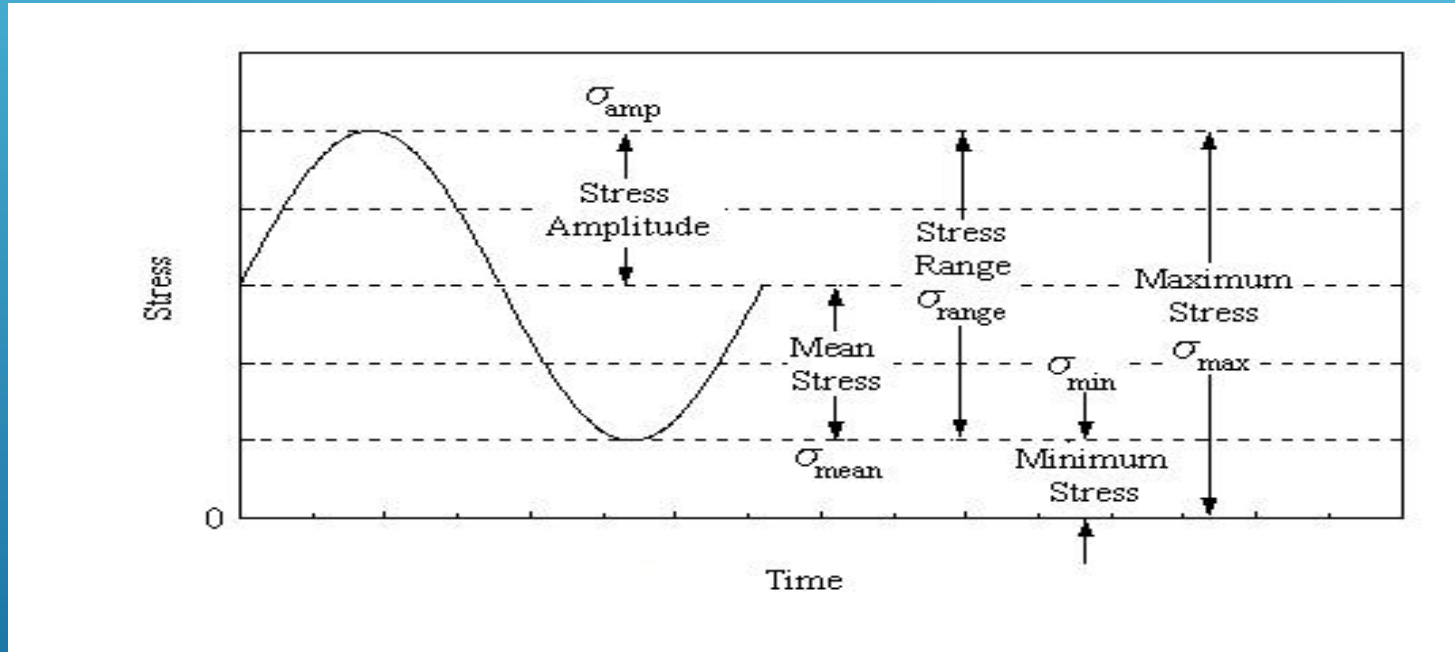




# PROBLEMA

COMBINAR CARGAS ESTÁTICAS COM CARGAS CÍCLICAS

# Cargas Compostas



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



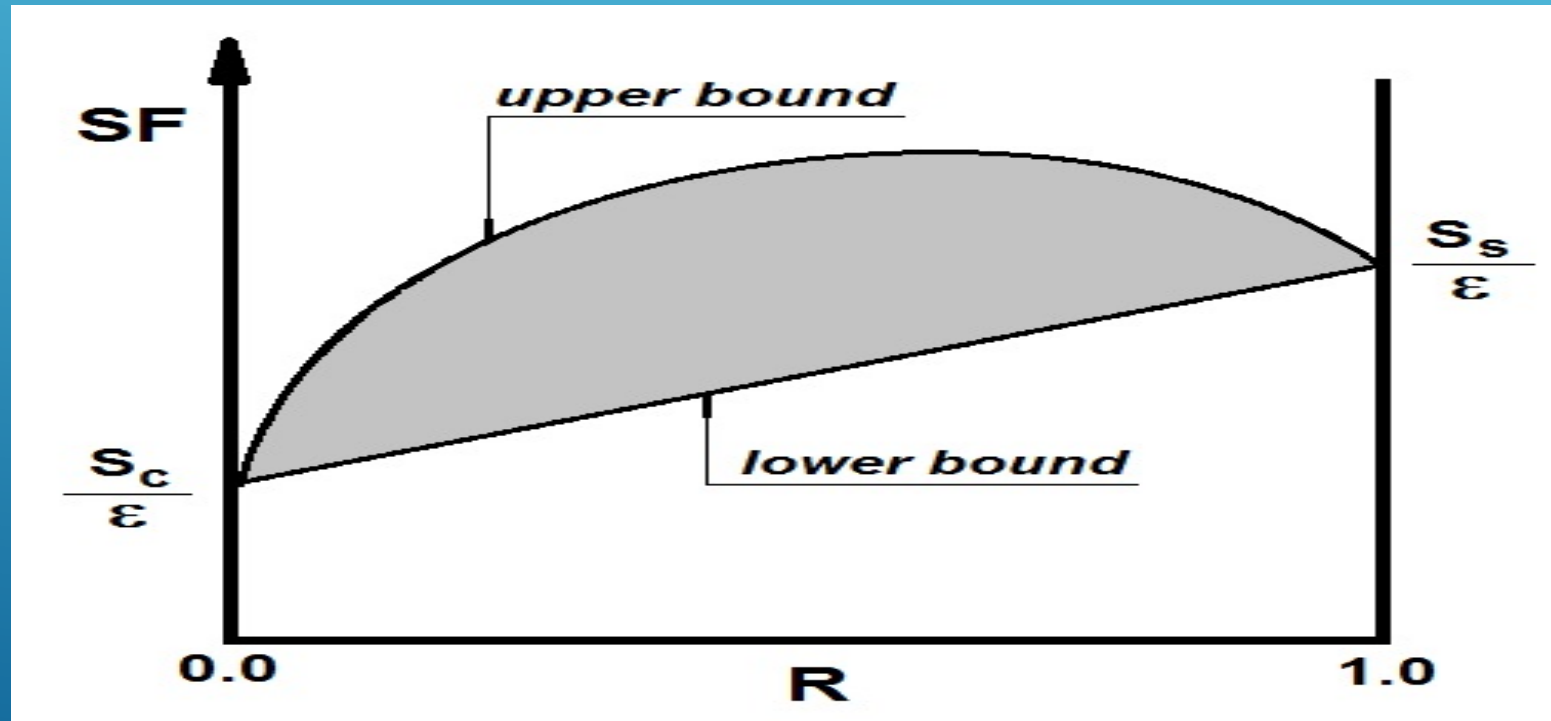


# EQUAÇÃO UNIFICADA

$$\left(\frac{R \times \epsilon \times CS}{S_S}\right)^{\frac{1}{G_S}} + \left(\frac{(1 - R) \times \epsilon \times CS}{S_C}\right)^{\frac{1}{G_C}} + \left(\frac{R \times (1 - R) \times \epsilon^2 \times CS^2}{S_S}\right)^{\frac{1}{G_{SC}}} = 1.0$$

# Intervalos de confiança

- ▶ Limites para CS



# Intervalo de confiança

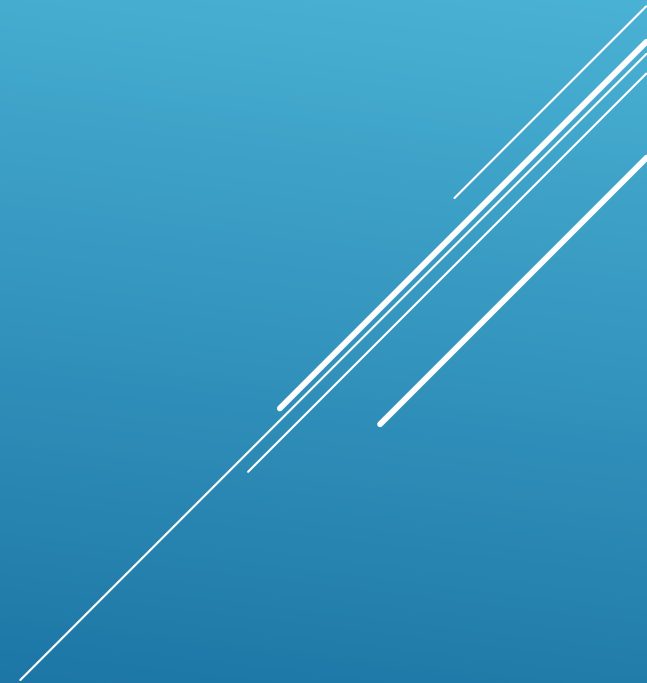
- Limite inferior

- $CS = \frac{R \times S_S}{\epsilon} + \frac{(1-R) \times S_C}{\epsilon}$

- Limite superior

- $\left[ \frac{R \times \epsilon \times CS}{S_S} \right]^{G_S} + \left[ \frac{(1-R) \times \epsilon \times CS}{S_C} \right]^{G_C} = 1.00$

# Exemplos



## Ruptura de tubulação nas condições seguintes

$$S_s = 1.20\%, S_c = 0.64\%, R = 0.67, \epsilon = 0.27\%$$

- *Limite inferior*

- $$SF = \frac{R \times S_s}{\epsilon} + \frac{(1-R) \times S_c}{\epsilon}$$
- $$SF = \frac{0.67 \times 1.20}{0.27} + \frac{(1-0.67) \times 0.64}{0.27}$$

- **SF = 3,76**

- *Limite superior*

- $$\left[ \frac{R \times \epsilon \times SF}{S_s} \right]^{\frac{1}{G_s}} + \left[ \frac{(1-R) \times \epsilon \times SF}{S_c} \right]^{\frac{1}{G_c}} = 1.00$$

- $$\left[ \frac{0.67 \times 0.27 \times SF}{1.20} \right]^{\frac{1}{0.077}} + \left[ \frac{(1-0.67) \times 0.27 \times SF}{0.64} \right]^{\frac{1}{0.089}} = 1.00$$

- **SF = 6,50**

- *Intervalo*

- $[3.76 < SF < 6.50]$

# Exudação de tubulação nas condições seguintes

$$S_s = 0.40\%, S_c = 0.16\%, R = 0.65, \epsilon = 0.20\%.$$

- *Limite inferior*

- $$SF = \frac{R \times S_s}{\epsilon} + \frac{(1-R) \times S_c}{\epsilon}$$
- $$SF = \frac{0.65 \times 0.40}{0.20} + \frac{(1-0.65) \times 0.16}{0.20}$$

- **SF = 1.58**

- *Limite superior*

- $$\left[ \frac{R \times \epsilon \times SF}{S_s} \right]^{G_s} + \left[ \frac{(1-R) \times \epsilon \times SF}{S_c} \right]^{G_c} = 1.00$$

- **G<sub>s</sub> = 0** (resina não sofre strain-corrosion)

- $$\frac{(1-R) \times \epsilon \times SF}{S_c} = 1.00$$

- **SF = 2.29**

- *Intervalo*

- **[1.58 < SF < 2.29]**



**IBCom - Instituto Brasileiro dos Compósitos**

# CONCLUSÃO

A vida química é determinada por 2 parâmetros

A vida estrutural não é determinada. A equação unificada computa o intervalo de confiança para o CS

Os intervalos de confiança podem ser computados para qualquer modo de falha

- Infiltração
- Exudação
- Perda de rigidez
- Ruptura

**Antonio Carvalho**

**11 9 7175 1945**

**tony.hdb@gmail.com**

