

PMT3306 - Mecânica dos materiais compósitos

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

7 de dezembro de 2020

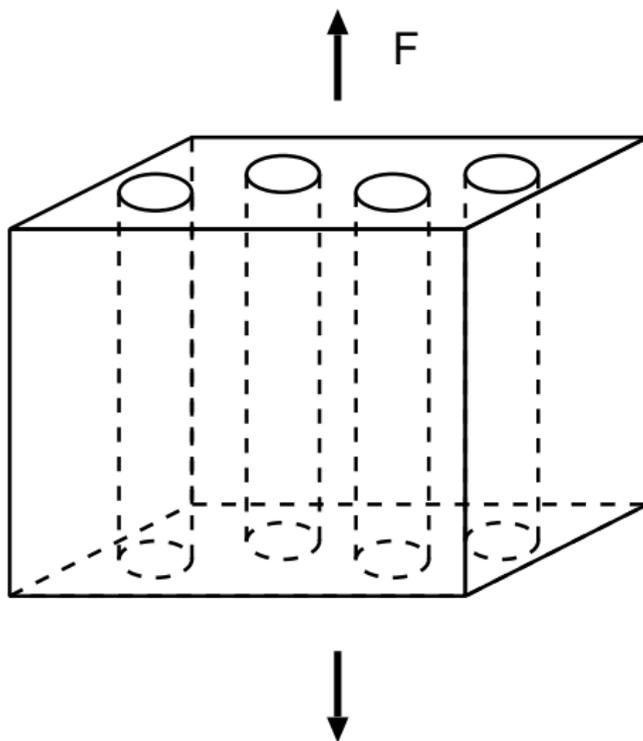
Regra da mistura mecânica

“Dada uma certa propriedade física X característica do reforço (X_r) e da matriz (X_m), teremos

$$X = V_m X_m + V_r X_r$$

onde V_m e V_r correspondem respectivamente às frações volumétricas de matriz e de reforço no compósito.”

Módulo de rigidez longitudinal



Dedução

$$F_C = F_r + F_m \Rightarrow \sigma = V_r \sigma_r + V_m \sigma_m$$

Dedução

$$V_r \sigma_r + V_m \sigma_m = V_r \varepsilon_r E_r + V_m \varepsilon_m E_m = \varepsilon_c E_c$$

mas

$$\varepsilon_c = \varepsilon_r = \varepsilon_m$$

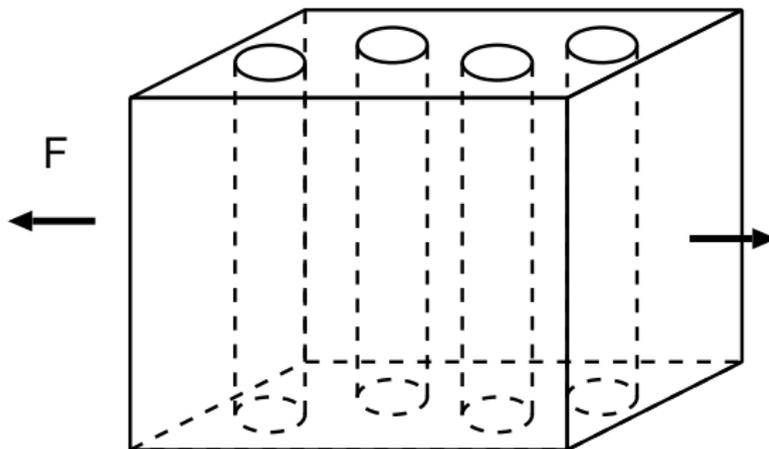
Dedução

Assim

$$E_{c,\parallel} = V_f E_f + V_m E_m$$

⇒ Média de Voigt

Módulo de rigidez transversal



Dedução

$$l_c \varepsilon_c = l_r \varepsilon_r + l_m \varepsilon_m$$

e

$$\sigma_c = \sigma_r = \sigma_m$$

Dedução

$$l_r \varepsilon_r + l_m \varepsilon_m = l_r \frac{\sigma_r}{E_r} + l_m \frac{\sigma_m}{E_m} = l_c \frac{\sigma_c}{E_{c,\perp}}$$

com

$$V_m = \frac{l_m}{l_c} \text{ e } V_r = \frac{l_r}{l_c}$$

Dedução

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

⇒ Média de Reuss

Dedução

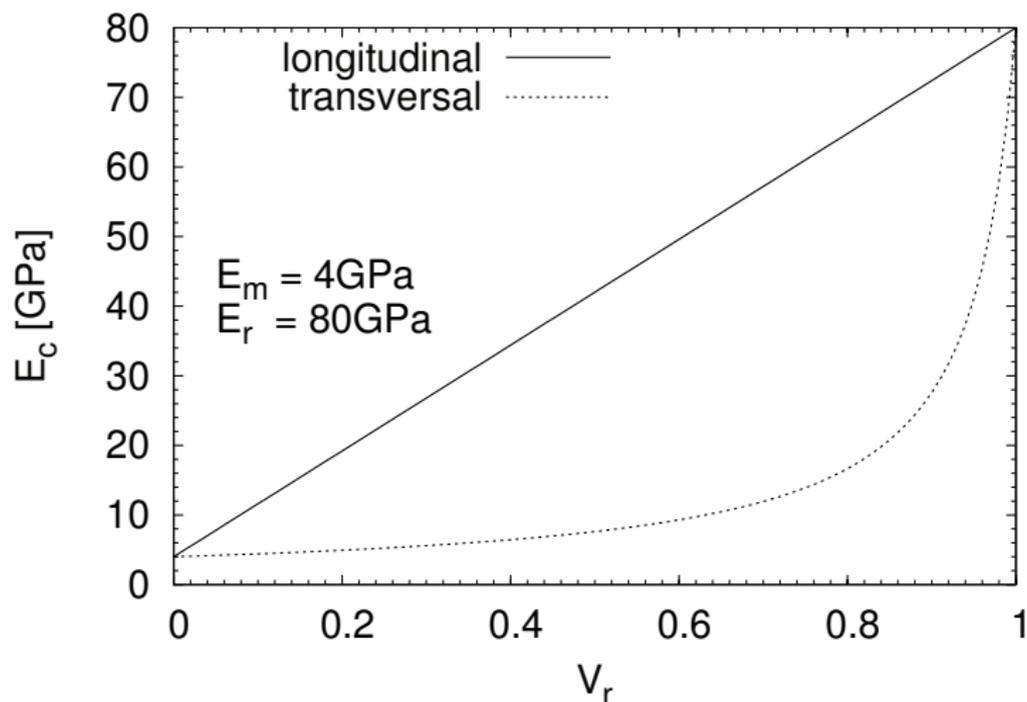
Usando o módulo de flexibilidade:

$$S = \frac{1}{E}$$

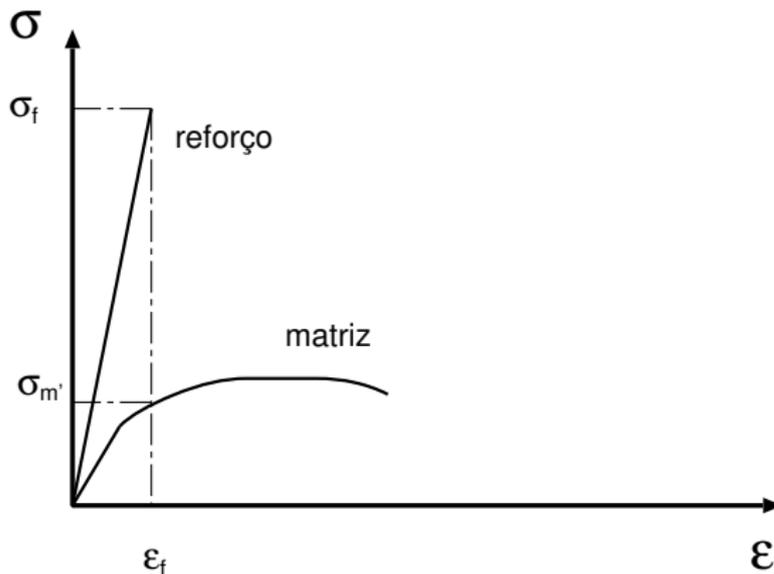
temos

$$S_{c,\perp} = V_f S_f + V_m S_m$$

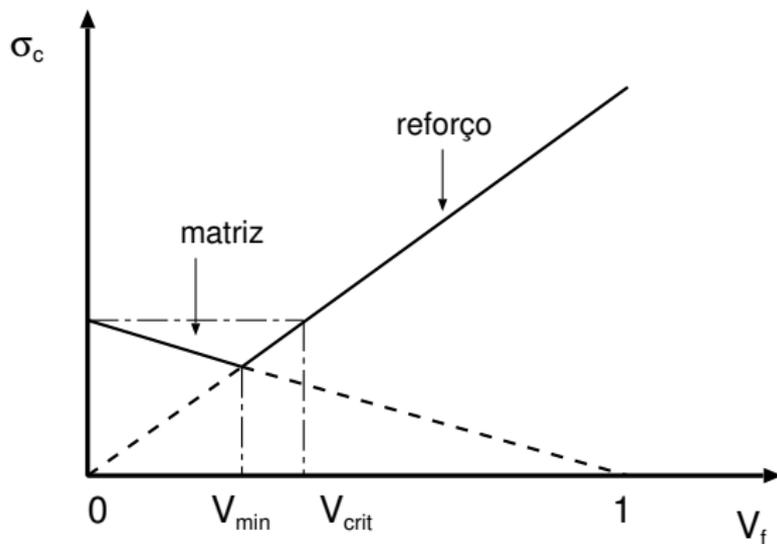
Limites



Tensão crítica da matriz

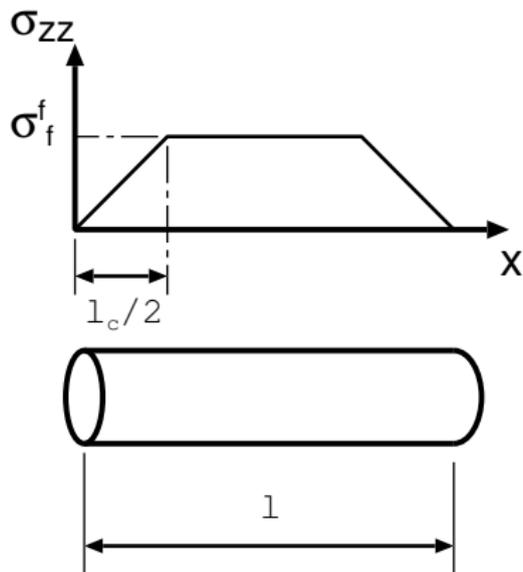


Volume crítico de reforço



$$\sigma_c \approx \sigma_f^f V_f + \sigma_m'(1 - V_f)$$

Transferência de carga



$$\sigma_{zz}\pi R^2 = \tau_{rz}2\pi R x \Rightarrow \sigma_{zz} = \frac{2\tau_{rz}x}{R}$$

Comprimento crítico de fibra

$$\frac{l_{\text{crit}}}{d} = \frac{l_{\text{crit}}}{2R} = \frac{\sigma_f^f}{2\tau_{RZ}}$$

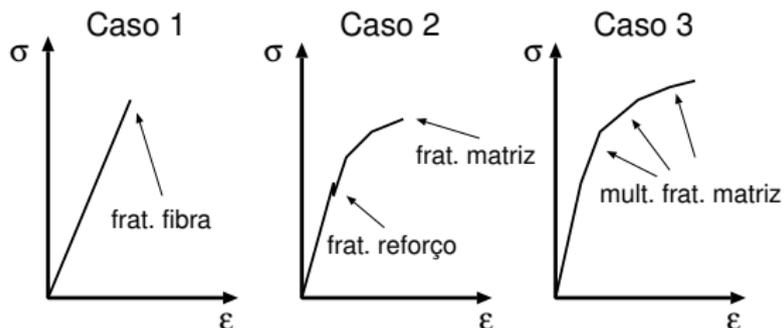
Tensão média:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{\sigma_f^f l - \sigma_f^f \left(\frac{l_{\text{crit}}}{2}\right)}{l_{\text{crit}}} = \sigma_f^f \left(1 - \frac{l_{\text{crit}}}{2l}\right)$$

Considerando o comprimento finito da fibra:

$$\sigma_c = \sigma_f^f \left(1 - \frac{l_{\text{crit}}}{2l}\right) V_f + \sigma'_m (1 - V_f)$$

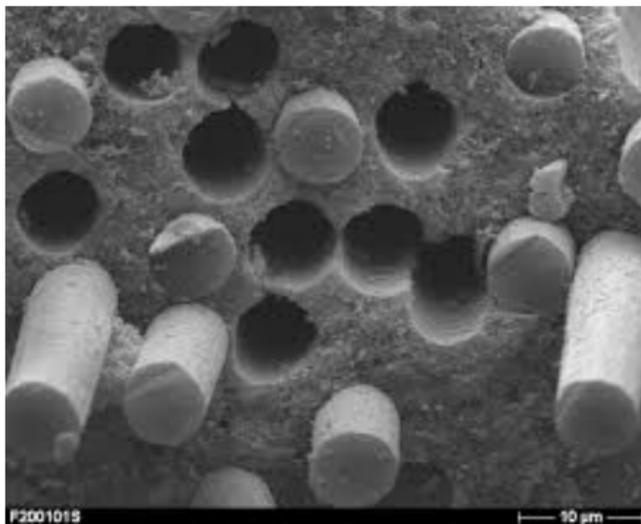
Modos de fratura de compósitos reforçados por fibras



Mecanismos de tenacificação

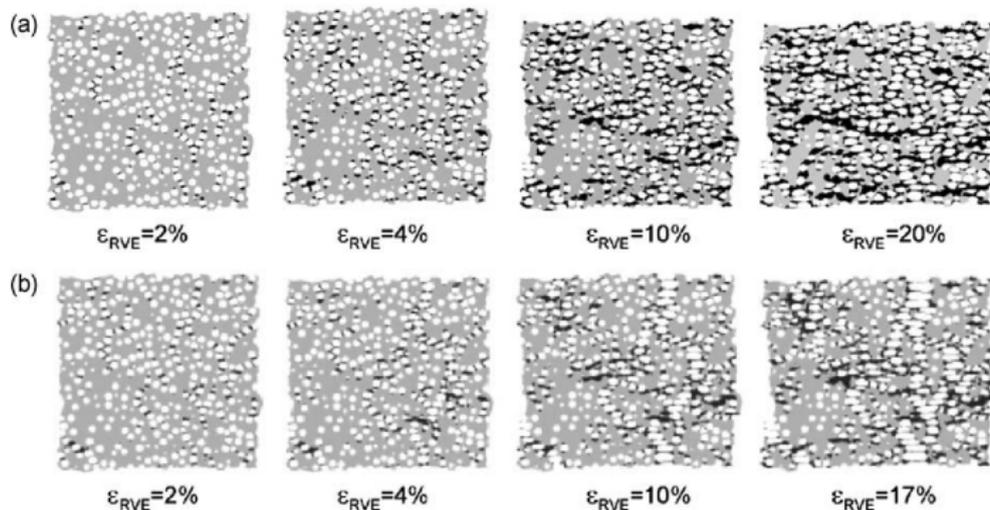
- Ancoramento de trinca (*crack bridging*)
- Arrancamento de fibra (*fiber pull-out*)
- Bifurcação e deflexão

Pull-out



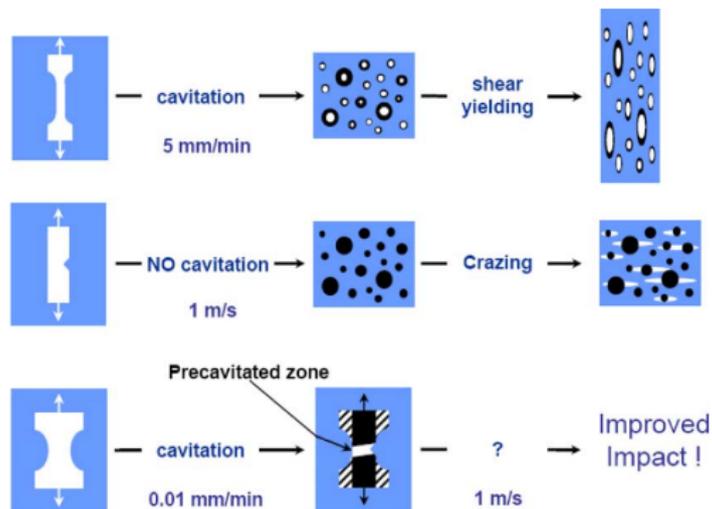
$$W_{pull-out} = \int_0^{\ell} F_3 dx = \frac{\sigma_{33} \pi r}{4} \int_0^{\ell} x dx = \frac{\sigma_{33} \pi r \ell^2}{8}$$

Tenacificação de polímeros



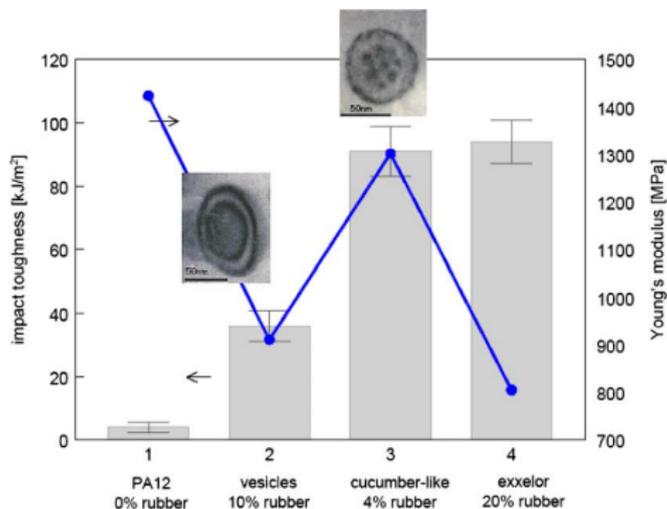
H. Maijer, L. Govaert "Mechanical performance of polymer systems: the relation between structure and properties" *Progr. Polym. Sci.* **30** (2005) 915 – 938.

Tenacificação de polímeros



H. Maijer, L. Govaert "Mechanical performance of polymer systems: the relation between structure and properties" *Prog. Polym. Sci.* **30** (2005) 915 – 938.

Tenacificação de polímeros



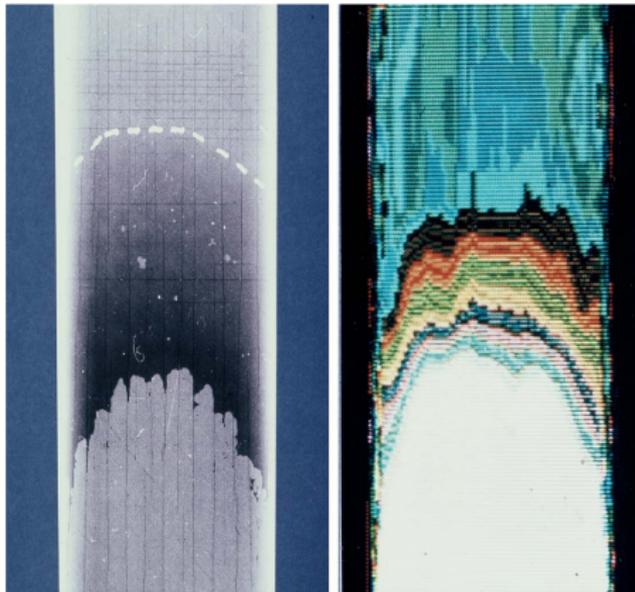
H. Maijer, L. Govaert "Mechanical performance of polymer systems: the relation between structure and properties" *Progr. Polym. Sci.* **30** (2005) 915 – 938.

Fadiga em compósitos

- Aumento da responsabilidade estrutural
- O método de fabricação afeta (muito) a resistência à fadiga
- Pouco conhecimento dos mecanismos (diferentes dos metais)
- Como em outros problemas relacionados à fadiga: conhecimento empírico supera o conhecimento dos fundamentos
- Manufatura aditiva

Fadiga em compósitos reforçados por fibras

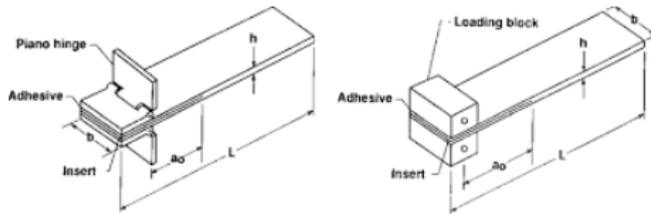
Dano de fadiga



X Ray Radiography

X ray Tomography

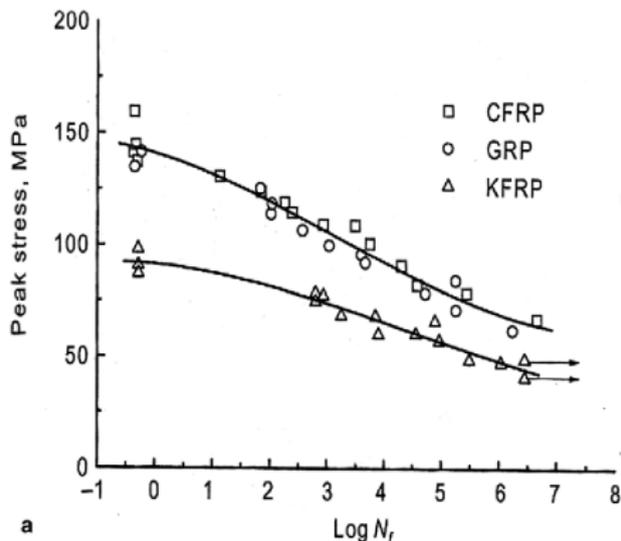
- Material laminado bidirecional simétrico T300/5208 (epoxy + grafita)
- Corpo de prova: DCB



C. Bathias "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *Int. J. Fatigue* **28** (2006) 1094 – 1099.

Fadiga em compósitos reforçados por fibras

Curvas S-N

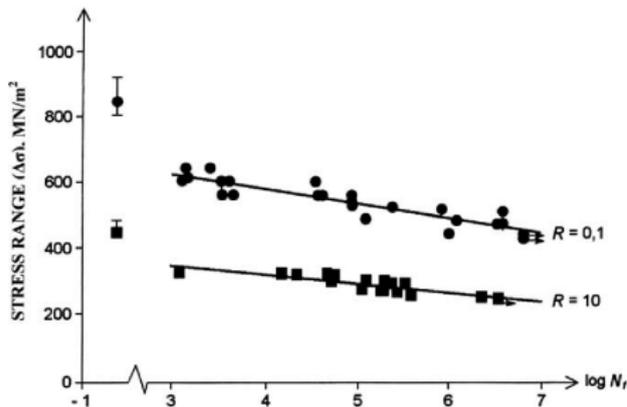


- Ensaio a 45° da fibra principal
- $R = 0,1$
- Materiais diversos (fibra de carbono, CRFP, fibra de vidro, GRP, fibra de Kevlar, KFRP)

C. Bathias "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *Int. J. Fatigue* **28** (2006) 1094 – 1099.

Fadiga em compósitos reforçados por fibras

Curvas S-N

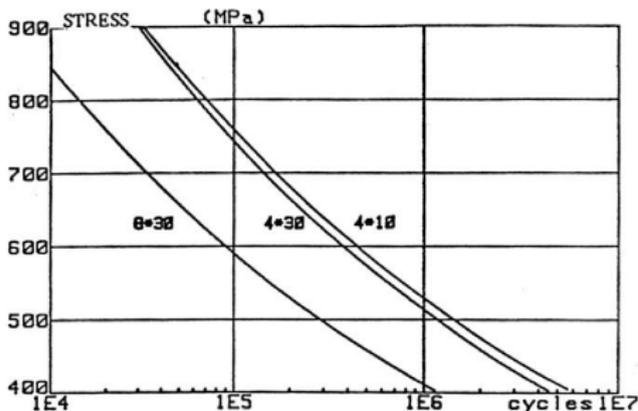


- Efeito de tensões de compressão
- Material: grafita/epoxy

C. Bathias "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *Int. J. Fatigue* **28** (2006) 1094 – 1099.

Fadiga em compósitos reforçados por fibras

Curvas S-N

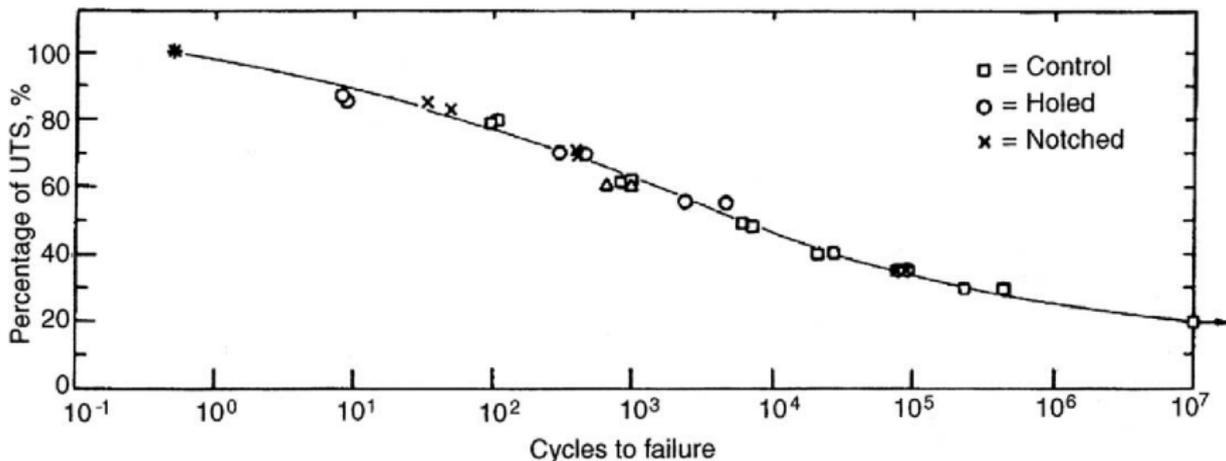


- Efeito das dimensões
- Material: fibra de vidro/epoxy
- Flexão (perda de 5% no módulo)

C. Bathias "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *Int. J. Fatigue* **28** (2006) 1094 – 1099.

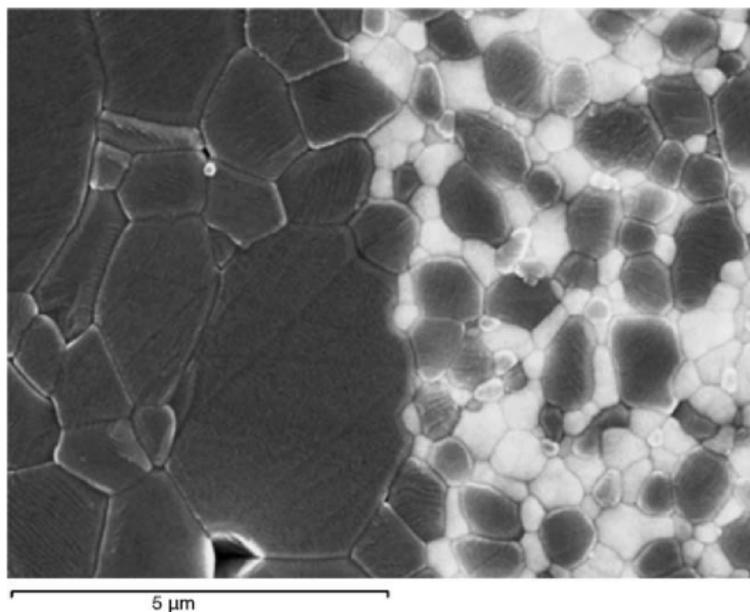
Fadiga em compósitos reforçados pro fibras

Efeito de entalhes



C. Bathias "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *Int. J. Fatigue* **28** (2006) 1094 – 1099.

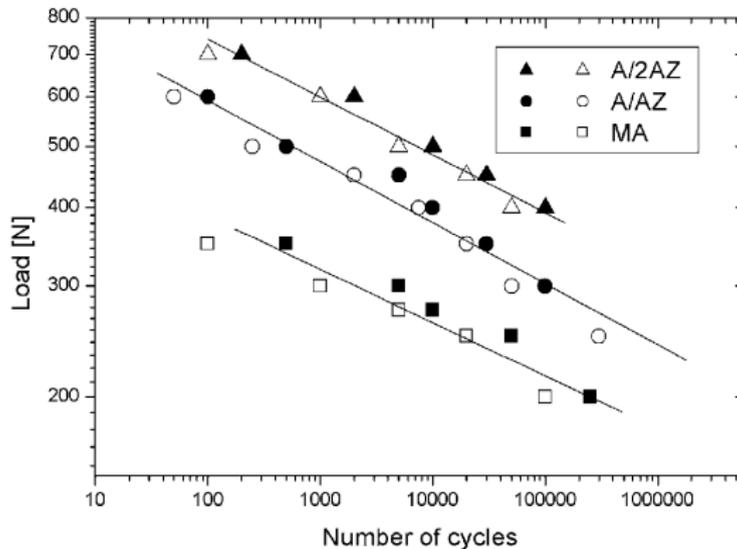
Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.

Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia

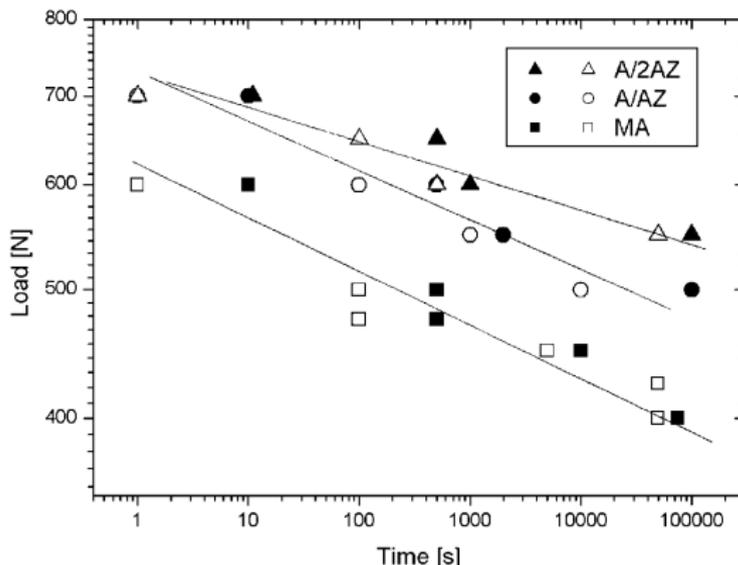
Resistência à Fadiga



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.

Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia

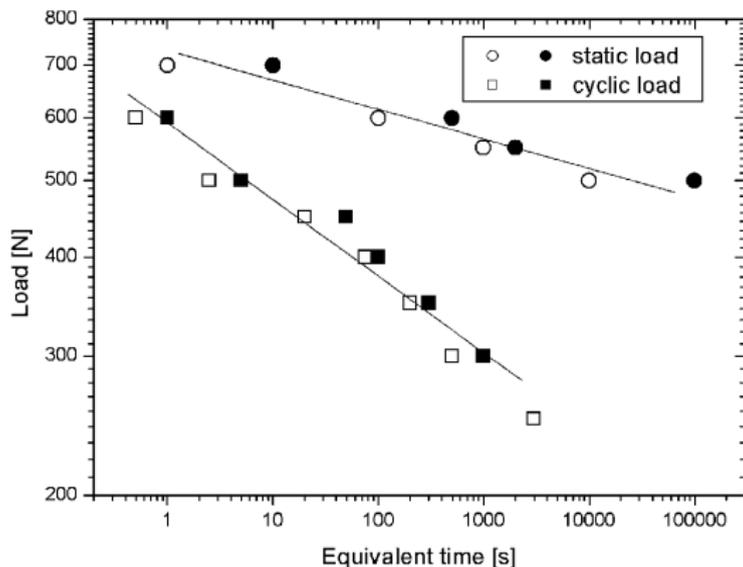
Resistência à Fadiga



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.

Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia

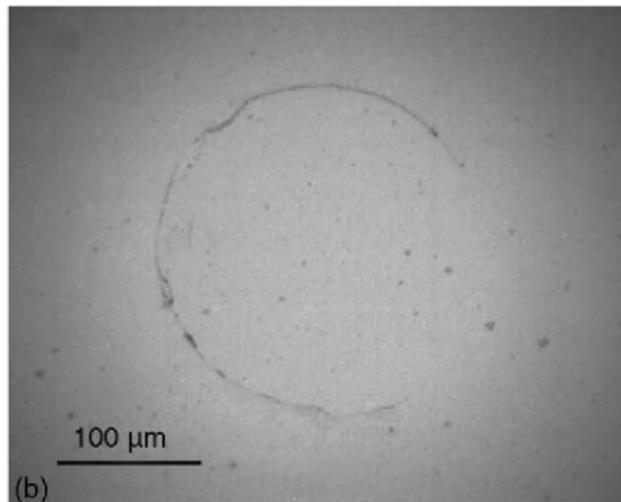
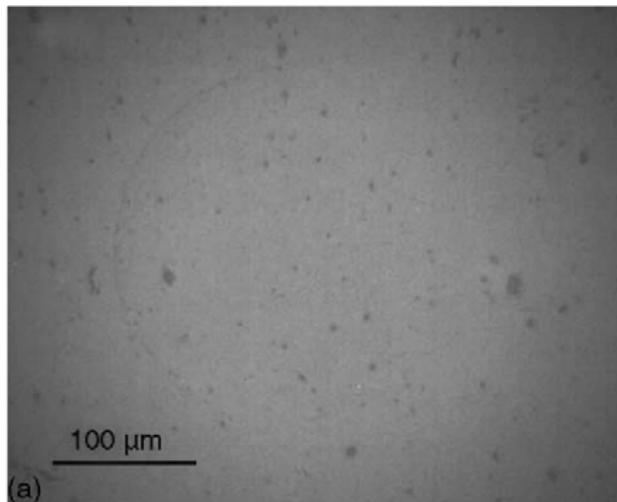
Resistência à Fadiga



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.

Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia

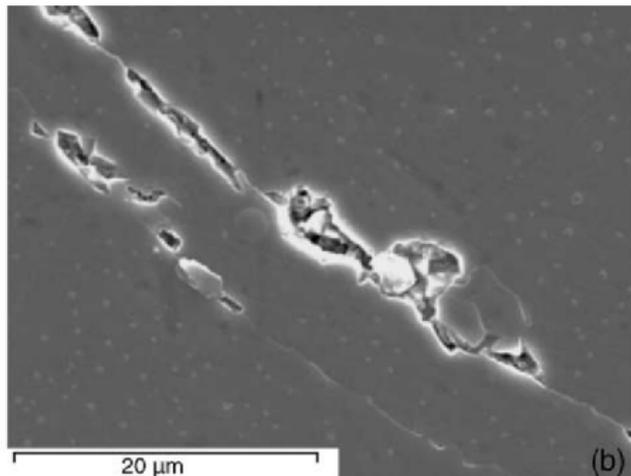
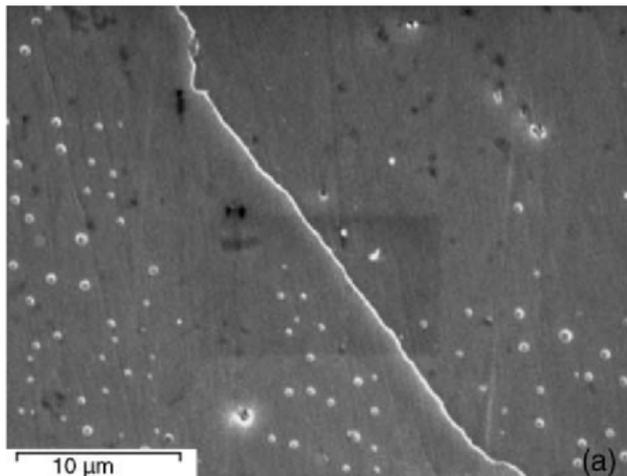
Dano



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.

Compósito laminar Alumina - Alumina/Zircônia

Dano



E. Jiménez-Piqué, L. Ceseracciu, F. Chalvet, M. Anglada, G. de Portu "Hertzian contact fatigue on alumina/alumina-zirconia laminated composites" *J. Amer. Cer. Soc.* **25** (2005) 3393 – 3401.