

## MODELAGEM DE AUMENTO DA TENACIFICAÇÃO DE MATERIAIS REFORÇADOS COM MICRO FIBRAS

**Leandro Ferreira Friedrich**, [leandroff07@hotmail.com](mailto:leandroff07@hotmail.com)

Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Av. Tiarajú, 810, Ibirapuitã, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil

**Neiva Finippini Piacieski**, [neivapiacieski@hotmail.com](mailto:neivapiacieski@hotmail.com)

Departamento de ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rua do comérico, 3000, Universitário, Ijuí, RS, Brasil

**Wang Chong**, [Wangchong@unipampa.edu.br](mailto:Wangchong@unipampa.edu.br)

Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), AV. Tiarajú, 810, Ibirapuitã, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil

**RESUMO:** Através da análise da deformação das microfibras, que estão no plano trincado e sujeitas a carregamento externo na matriz composta, e utilizando-se de análises mecânicas elásticas, foram propostos modelos mecânicos e matemáticos para calcular as forças e tensões as quais as fibras estão sujeitas quando uma trinca principal aparece na matriz frágil e a contribuição dessas fibras para a tenacidade do material composto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tenacidade à fratura, aumento da tenacidade, materiais compostos reforçados por fibras

**ABSTRACT:** Through the analysis of the fibers deformation, that they ate in the cracking plan and subject to external load in the composed matrix, and it's base in the theory of the elasticity, mechanical and mathematical models were proposed to calculate the forces ad stress to which the fibers are subject when a main cracking appears in the fragile matrix and contribution of the fibers the toughness of the composed material.

**KEYWORDS:** Toughness of fracture, increase of the toughness, composed materials reinforced with fibers

### INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, as necessidades econômicas e os fatores ambientais têm desafiado constantemente a indústria moderna na busca de materiais com melhor desempenho. Dentre os materiais compósitos, a cerâmica avançada tem se revelado objeto de pesquisa, devido as suas fundamentais propriedades mecânicas e físicas, como a resistência ao uso, alta resistência a corrosão e abrasão, alta dureza, baixa densidade, resistência a altas temperaturas, entre outras. De acordo com William e Callister (2002) os materiais compósitos estão sendo empregados em diversas áreas e são geralmente constituídos por matriz frágil reforçada com fibra. Por estas razões, a utilização de simulação e modelagem matemática para desenvolver cerâmica composta de alto desempenho é uma etapa necessária e econômica, pois poderá prever o comportamento do composto de maneira otimizada e trazer a melhor composição que irá propiciar a maior tenacidade.

### METODOLOGIA

Serão considerados e aplicados conceitos típicos de Mecânica da Elasticidade e Mecânica da Fratura, utilização da solução fundamental de kelvin e complementar de Mindlin, além do critério de falhas de matérias frágeis propondo um modelo mecânico que possa calcular as forças e tensões às quais as fibras estão sujeitas quando uma trinca principal aparece na matriz frágil, e influência do Efeito Spalling na contribuição das fibras para a tenacidade do material composto.

### Procedimento experimental

Simulações e resultados são obtidos através de implementação computacional em MATLAB.

### Equações governantes

A tensão no composto é obtida pela soma das contribuições individuais que cada fibra atribui ao composto.

$$\sigma_c(w) = \frac{V_f}{A_f} \int_0^{\arctan(L_f/2d_f)(L_f \cos(\theta) - d_f \sin(\theta))/2} \int_0^{L_f \cos(\theta) - d_f \sin(\theta)} N(w, \theta, z) P(\theta) p(z) dz d\theta \quad (1)$$

onde  $L_f$  – comprimento da fibra;  $d_f$  – diâmetro da fibra;  $V_f$  – Fração volumétrica de fibras distribuídas no composto;  $A_f$  – área de seção transversal da fibra;  $N(w, \theta, Z)$  é a força axial da fibra;  $w$  – abertura da superfície da trinca principal;

Aumento de energia de fratura, ou seja, tenacificação:

$$G_c = \int_0^{w^*} \sigma_c(w) dw \quad (2)$$

Onde  $w^*$  é uma abertura suficiente para que todas as tensões nas fibras estejam zeradas (fibras quebradas ou fora da matriz).

Para ser possível resolver o problema da pressão na interface Fibra/matriz, supomos que a pressão seja distribuída linearmente ao longo da fibra enterrada e a tensão cisalhante é constante.

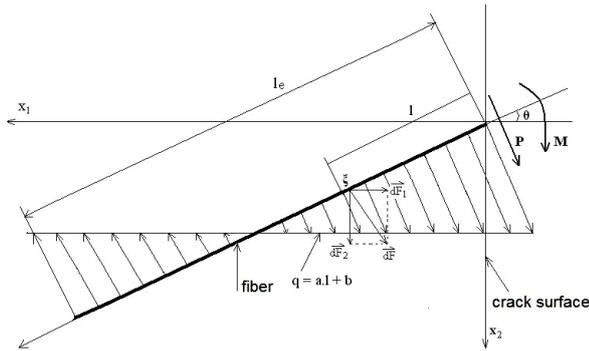


Figura 1. Pressão na interface Fibra/matriz

$$q = al + b \quad (3)$$

$$a = -6\left(\frac{2M}{l_e} + p\right)/l_e^2 \quad b = 6\left(\frac{2Pl_e}{3} + M\right)/l_e^2 \quad (4)$$

No meio espaço as tensões na matriz pode ser obtidas usando a integração sobre toda a superfície das cargas:

$$\sigma_{jk} = \iint_{F_s} d\sigma_{jk} = \iint_{F_s} (\sigma_{jki}^K + \sigma_{jki}^C) dF_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Onde  $\sigma_{jki}^K$  and  $\sigma_{jki}^C$  é a solução fundamental de Kelvin's e a solução complementar de Mindlin's.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros utilizados nas simulações foram retirados do trabalho de LEUNG e SHAPIRO (1999), obtidos de FANTILLI e VALLINI

Tabela 1. Porcentagens de fibras em quatro categorias: Q- quebradas, D- descoladas, Dm- produção de danos na matriz e A-ativas

$\sigma_f / \tau_i$	Q %	D %	Dm %	A %	N %	$G_c (10^{-3} J/m^2)$
469/1	14	58	20	8	86	2,7
469/3	24	45	28	11	76	6,0
469/5	32	36	21	11	68	6,0
635/1	11	61	17	11	89	3,0
635/3	22	46	19	13	78	6,6
635/5	28	40	19	13	72	6,6
954/1	9	64	17	10	91	2,9
954/3	17	52	17	14	83	6,5
954/5	23	46	17	14	77	7,2

Dados gerais:  $L_f=10\text{mm}$ ,  $d_f=0,5\text{mm}$ ,  $E_f=200\text{GPa}$ ,  $V_f=0,3$ ,  $E_m=30\text{GPa}$ ,  $V_m=0,2$ ,  $F_t=3,7\text{MPa}$ ,  $F_c=36,5\text{MPa}$  e  $V_f=5\%$   
 Onde: N- não quebradas,  $G_c$ - tenacidade

Pela Tabela 1, verificamos que aproximadamente 20% do totais de fibras produzem danos na matriz. Supor que essas fibras não produzem os danos, assim, continuam

carregando normalmente como quase todos os trabalhos na computação a tenacificação fizeram, então a tensão de ponte deve ser bem maior do que os obtidos por experimentos (MAALEJ). A mesma conclusão foi indicada no trabalho de PAVAN. Podemos concluir que a alta resistência tanto da fibra como da interface beneficiam a tenacificação.

## CONCLUSÃO

O problema da tenacificação da cerâmica por fibras é complexo, envolvendo todas as propriedades mecânicas da fibra e da matriz. Com o *efeito de spalling* foi possível avaliar o percentual de fibras não quebradas e a região danificada em relação ao comprimento enterrado, o que irá influenciar os processos posteriores de descolagem, pull-out e conseqüentemente a tenacificação. Porém há grande dificuldade em se quantificar o dano com mais precisão, devido a inexistência de equações teoricamente adequadas para este fim. Será necessária a inclusão de outros métodos mais eficientes e com máxima precisão possível para este fim, infelizmente há poucos trabalhos nesta área na literatura.

## AGRADECIMENTOS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através de concessão de uma bolsa IC.

## REFERÊNCIAS

- FANTILLI, P. Alessandro; VALLINI, Paolo. *A Cohesive Interface Model for the Pullout of Inclined Steel Fibers in Cementitious Matrixes*. Journal of Advanced Concrete Technology. Vol. 5, N. 2, 247-258. Japan Concrete Institute. June/2007.
- LEUNG, Chistopher K.Y.; LI, Victor C. Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites. *J.Mech.Phys.Solids*, 1992; 40[6]:1333-1362.
- MAALEJ, Mohamed; LI Victor C.; SASHIDA, Toshiyuki. Effect of fiber rupture on tensile properties of short fiber composites. *J. of Eng. Mech*, 1995; 121[8]:903-913.
- PAVAN, A. R. Modelagem matemática de tenacificação de cerâmica através da adição de fibras dúteis. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática Em Interdisciplinas) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- WILLIAM, D.; CALLISTER, JR. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2002.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.