



IC-NOCMAT 2007 Maceió  
*International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies:  
Ecological Materials and Technologies for Sustainable Building  
Maceió, Alagoas, Brazil, 14<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> October 2007  
In Honour of Professor R.N.Swamy*

**MECÂNICA DA FRATURA EM COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM POLPA DE BAMBU**

Angela Teresa Costa Sales<sup>a,\*</sup>, Khosrow Ghavami<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal de Sergipe - UFS, [angelasales@ufs.br](mailto:angelasales@ufs.br)

<sup>b</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, [ghavami@civ.puc-rio.br](mailto:ghavami@civ.puc-rio.br)

**Abstract:** The use of vegetal fiber in substitution of asbestos fibers is a reality in asbestos-cement industries in some countries of the world. In spite of their good mechanical properties, exposition to asbestos fibers causes health hazard. Vegetal fibers have shown advantages over synthetic fibers related to availability and adequacy to environmental preservation. The use of vegetal pulp allows high fiber contents to be inserted and, as these fibers have random distribution, they provide isotropic properties to composite material. Cementitious composites are essentially heterogeneous materials with structural imperfections on different observation levels. These faults could consist in stress concentration points that could evolve into cracks and thus the material will be less strong than predicted by the classic strength criteria. In this work, the fracture behavior of bamboo pulp cementitious composites was studied. It was observed a flexural performance improvement in composite notched specimens in relation to the plane matrix. Composites had shown themselves less susceptible to the notch with increment of reinforcement fiber content. Considerable softening was observed preceding the rupture associated with crack propagation in composites. The resistance curves (R-curves) had allowed to get values of  $K_{IR}$  that in composites showed to keep certain constancy with the increase of crack length. At the curve plateau, the average values for  $K_{IR}$  were equal to 1,88 MPa.m<sup>1/2</sup> and 1,84 MPa.m<sup>1/2</sup>, respectively, for 8% and 14% bamboo pulp content. In composites, the profiles of crack growing path were tortuous. In plane matrix, the failure mechanism was more strongly dominated by the presence of initial notch than in composites.

**Keywords:** *Bamboo pulp, cementitious composites, vegetal fiber, fracture mechanics.*

**Resumo:** O uso de fibras vegetais, em substituição a fibras de asbestos, é uma realidade em indústrias de fibrocimento em vários países do mundo, pois, apesar de suas boas propriedades mecânicas e durabilidade, a exposição a asbestos acarreta problemas de insalubridade. Fibras vegetais, pela disponibilidade e adequação ambiental, apresentam vantagens sobre fibras sintéticas. A utilização da polpa vegetal permite inserir maiores teores de fibras que, distribuídas aleatoriamente, conferem características isotrópicas ao compósito. Compósitos cimentícios são materiais essencialmente heterogêneos e passíveis de falhas estruturais que podem se constituir em pontos de concentração de tensões, evoluindo para trincas e tornando o material menos resistente em relação ao que é previsto pelo critério da resistência mecânica. Nesse trabalho, estudou-se o comportamento à fratura de compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Observou-se que os corpos-de-prova entalhados de compósito apresentaram melhoria no comportamento à flexão em relação à matriz sem reforço. Os compósitos mostraram-se menos sensíveis ao entalhe, com o incremento do teor de fibras. Observou-se considerável amolecimento (softening) precedendo a ruptura por propagação da trinca, nos compósitos. As curvas de resistência (curvas-R) permitiram identificar os valores de  $K_{IR}$  que, nos compósitos, mostrou manter certa constância, com o aumento do comprimento da trinca. Nos platôs das curvas, os valores médios para  $K_{IR}$  foram de 1,88 MPa.m<sup>1/2</sup> e 1,84 MPa.m<sup>1/2</sup>, respectivamente, para compósitos com 8% e 14% de polpa. Nos compósitos, os perfis dos caminhos de crescimento das trincas mostraram-se tortuosos, sendo o mecanismo de fratura mais intensamente dominado pela presença do entalhe inicial na matriz sem reforço do que nos compósitos.

**Palavras-chave:** *Polpa de bambu, compósitos cimentícios, fibras vegetais, mecânica da fratura.*

## INTRODUÇÃO

Embora a maior parte da aplicação da Mecânica da Fratura tenha sido para materiais metálicos, seus fundamentos foram aplicados por Griffith para materiais frágeis (Sauoma [1]). Para aplicação da Mecânica da Fratura ao concreto, muitas informações foram, inicialmente, obtidas das pesquisas com metais. Contudo, logo foi percebido que a grande heterogeneidade do concreto o faz apresentar características de fratura singulares. Kaplan, em 1961, foi o primeiro a determinar experimentalmente a tenacidade à fratura do concreto e, desde então, teve início a controvérsia sobre a aplicabilidade da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) para materiais compósitos como o concreto. Observou-se que a falha do material não é causada pelo crescimento instável de uma trinca, mas por uma complexa seqüência de crescimento e obstrução da trinca, levando a uma degradação gradual de sua estrutura (Roelfstra e Wittmann [2]).

Algumas contestações sobre a aplicabilidade da MFLE para o problema de propagação de trinca e fratura do concreto estão relacionadas à questão da tenacidade à fratura no modo I de carregamento ( $K_{Ic}$ ) depender do tamanho do entalhe, da geometria ou das dimensões do corpo-de-prova. Tem sido observado que, no concreto, se desenvolvem microfissuras na frente da ponta da trinca, criando uma zona de processo de fratura (ZPF), análoga à zona plástica em metais, mas que não pode ter seu tamanho determinado com razoável precisão e depende do tamanho e forma do corpo-de-prova, além das condições de carregamento. Essa zona inelástica é dominada por mecanismos complicados (Shah et al. [3]).

Durante a fratura, as altas tensões, próximas à ponta da trinca, causam microfissuração, num fenômeno conhecido como “blindagem de microfissuras”, que consome parte da energia produzida pela aplicação da carga externa. Esse é mais um dos diversos mecanismos de tenacidade presentes da ZPF, que impedem o uso da MFLE para o concreto. Portanto, para aplicação da Mecânica da Fratura ao concreto é necessário conhecer essa ZPF, principalmente seu tamanho e as variações que sofre com a propagação da trinca principal. A ZPF pode resultar em crescimento estável da trinca antes da carga máxima e responde pelo comportamento do concreto após a carga de pico, pois, como algumas partes das superfícies das fissuras podem ainda estar em contato, a falha catastrófica é prevenida. Após a carga máxima, o material apresenta uma relação tensão-deformação caracterizada por amolecimento (*softening*) (Shah et al. [3]).

Para lidar com os efeitos da não linearidade em materiais quase-frágeis, muitos modelos têm sido propostos, tentando simular a fratura no modo I através de uma trinca linear efetiva, desprezando a variação da ZPF ao longo da largura e da espessura do elemento. Em muitas aplicações, torna-se útil determinar a curva de resistência à fratura (curva-*R*) que relaciona a taxa de liberação de energia com o crescimento da trinca. Tem sido mostrado, para o fibrocimento, que o comportamento na fratura pode ser adequadamente descrito pela curva de resistência ( $K_{IR}$ ) que relaciona o fator de intensidade de tensões com o crescimento estável da trinca (Foote et al.[4], Mai et al. [5]).

É sabido que uma das principais funções do reforço com fibras curtas em compósitos cimentícios é inibir a iniciação e propagação de trincas, sendo que a maior influência da presença das fibras se dá sobre o comportamento após a carga de pico. A Mecânica da Fratura traz a possibilidade de descrever o comportamento do material após o surgimento de falhas sobre as quais o reforço tem influência significativa, modificando o comportamento da estrutura após a carga de pico e sendo especialmente útil em situações em que há estritas limitações de abertura de trincas (estruturas sob fadiga, estruturas impermeáveis ou expostas a ambientes agressivos). A formação de ligações das faces fraturadas, promovida pelas fibras torna a aplicação da MFLE tradicional ainda mais questionável (Banthia e Sheng [6]).

No presente trabalho, buscou-se caracterizar o comportamento na fratura dos compósitos cimentícios com polpa de bambu, através de experimentos com corpos-de-prova entalhados sob flexão, nos quais foram determinados valores de carga e deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD), que permitiram o traçado das curvas de resistência relacionando  $K_{IR}$  com o crescimento da trinca.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

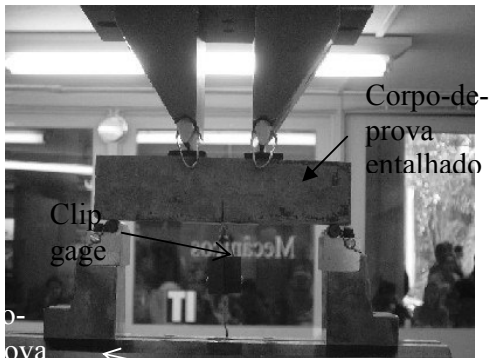
Os experimentos foram feitos com corpos-de-prova de pasta de cimento reforçada com polpa de bambu, em misturas com teores de polpa de 8% e 14% em relação à massa de cimento, denominadas de CPB08 e CPB14, respectivamente, além da mistura de referência, composta pela matriz sem reforço (CPB00). Para cada mistura, moldaram-se 4 corpos-de-prova com dimensões 25 mm x 50 mm x 200 mm, com um entalhe no centro do vão, de profundidade igual a  $\frac{1}{3}$  da altura (17 mm). O raio de curvatura do entalhe ( $\rho$ ) foi de 0,5 mm. A polpa de bambu foi fornecida pela Indústria Itapagé, do estado do Maranhão, Brasil, obtida por processo kraft e refinada. Para essa polpa, Rodrigues [7] determinou um comprimento médio de fibras de 1,47 mm e um diâmetro da ordem de 20  $\mu\text{m}$ . Foi usado cimento Portland do tipo CP II F-32 com adição de filler calcário, da marca Mauá.

Os corpos-de-prova foram produzidos pelo processo HATSCHEK modificado, proposto por Cambell e Coutts [8]. Para tanto, foi aplicado vácuo a uma mistura bastante fluida de aglomerante, água e polpa, vertida num molde (câmara de vácuo), resultando numa placa de dimensões 120 mm x 120 mm e espessura de cerca de 8 mm. Para obtenção da mistura, a polpa de bambu foi seca em estufa, pesada em estado seco e deixada submersa em água por 24 horas. A seguir, foi adicionada uma quantidade de água de cerca de 100 ml para 1,0 g de polpa seca, aplicando-se forte agitação mecânica (2000 rpm) por 15 minutos. A dispersão foi filtrada, para retirar o excesso de água, e a polpa úmida foi envolta em filme plástico e colocada sob refrigeração, por 24 h. Quando da moldagem das placas, a polpa úmida foi novamente dispersa em água, por 5 minutos, adicionou-se o cimento e foi feita a dispersão da mistura final, que foi vertida na câmara de moldagem e submetida a vácuo por cerca de 2 minutos. Na metade do tempo de aplicação do vácuo, foi feita a compactação do material através de soquete.

As placas retiradas da câmara de moldagem foram despedaçadas e os pedaços usados para preencher os moldes de madeira para os corpos-de-prova, revestidos internamente com filme plástico. Os entalhes foram feitos com fixação nos moldes, internamente, de uma fina lâmina metálica. O preenchimento dos moldes se deu em 3 camadas, adensadas com 60 golpes de soquete padrão NBR 7215 da ABNT. Após preenchimento, os moldes foram levados a uma prensa hidráulica, onde o material foi submetido a compressão de 5,0 MPa por 5 minutos, havendo a saída da água em excesso pelas aberturas entre as partes encaixáveis dos moldes. Após essas operações, as misturas passavam a ter relação água/cimento em torno de 0,30, determinada experimentalmente por diferença entre o peso do corpo-de-prova e os pesos dos materiais sólidos componentes (Rodrigues [7]). Os corpos-de-prova com a mistura de referência foram feitos por preenchimento dos moldes com aberturas vedadas, com pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,3 e adensamento com soquete.

Após 48 horas, foi feita a desmoldagem dos corpos-de-prova e iniciou-se a cura, em sacos plásticos, por 7 dias. Em seguida, os corpos-de-prova foram colocados em câmara climática a 25° C e 50% de umidade relativa. Os corpos-de-prova foram ensaiados à flexão aos 28 dias de idade, com carga ( $P$ ) aplicada nos terços médios do vão livre de 170 mm, em uma máquina INSTRON 5500 (Figura 1), com velocidade de deslocamento do travessão de 1 mm/min. Foi medida a evolução da abertura da boca trinca ( $CMOD$ ), através de *clip-gage* fixado em ambos os lados do entalhe.

**FIGURA 1 – ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGOTA COM ENTALHE**



Foi também ensaiada igual quantidade de corpos-de-prova sem entalhe, para cada mistura, tendo sido medidas as cargas e os deslocamentos do travessão da máquina, que

corresponderam às deflexões ( $v$ ) dos pontos nos terços médios do vão livre das vigotas. Foram traçadas as curvas  $P-v$  e foi identificado o ponto de carga máxima, calculando-se o módulo de ruptura,  $MOR$ , e a energia absorvida sob flexão estática, conforme recomendação do RILEM (1984). A energia específica,  $EE$ , foi calculada, dividindo-se o valor obtido de energia pela área da seção transversal do corpo-de-prova. As medidas das cargas máximas suportadas pelos corpos-de-prova com e sem entalhe permitiram a determinação do fator de sensibilidade de cada material à presença do entalhe ( $FSE$ ), definido como a relação entre as cargas máximas suportadas pelos corpos-de-prova entalhados e pelos corpos-de-prova sem entalhe (Banthia e Sheng [6]).

Para os ensaios com corpos-de-prova entalhados, na ausência de padrões adequados para compósitos, foi usado nesse trabalho o procedimento recomendado pela ASTM, descrito por Konish [9], para encontrar o ponto de carga  $P_Q$  nos gráficos  $P-CMOD$ , correspondente ao início do crescimento estável da trinca. Esse valor de carga,  $P_Q$ , foi utilizado para o cálculo do fator de intensidade de tensões do *Modo I*,  $K_Q$ , (Eqn. 1) tomado como um valor parcial da tenacidade na fratura, correspondente ao início do crescimento da trinca, baseado no comprimento inicial do entalhe ( $a_0$ ), conforme a eq. (98), onde,  $a_0$  é o comprimento inicial da trinca,  $L$  é o comprimento do vão livre,  $B$  é a largura da viga com entalhe,  $W$  é a altura da viga com entalhe e  $F\left(\frac{a_0}{W}\right)$  é função da geometria da peça. Para flexão pura, essa função é dada pela Eqn. 2 (Dally e Riley [10]).

$$K_Q = \frac{P_Q L}{BW^2} \sqrt{\pi a_0} \cdot F\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (1)$$

$$F\left(\frac{a_0}{W}\right) = 1,122 - 1,40 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right) + 7,33 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 - 13,08 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 + 14,0 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \quad (2)$$

Para obter a evolução de parâmetros de fratura com o crescimento da trinca, e não somente o valor da tenacidade na carga de pico, foram traçadas as curvas de resistência (curvas-R) para cada corpo-de-prova de cada mistura, por se tratar de um método simples, baseado na MFLE, capaz de representar, em grande extensão, o comportamento dos materiais. Para o traçado das curvas-R a partir dos dados de ensaio com corpos-de-prova entalhados, adotou-se procedimento similar ao usado por Ferreira et al [11]. Não foi considerada a espessura das pastilhas de fixação do *clip gage*, por terem espessura de apenas 1 mm (Sauoma [1]). Como em algumas rochas e compósitos cimentícios a ruptura devido à propagação de trinca é caracterizada por amolecimento (*softening*), o comportamento à fratura é estudado através de modelos de trinca coesiva, de trinca efetiva ou através de modelos de fratura elasto-plástica, que consideram, indiretamente, a resposta inelástica desses materiais. O cálculo dos valores de  $K_{IR}$  foi baseado no modelo bi-paramétrico de Jenk e Shah (Shah et al. [3]). No estudo de Ferreira et al. [11], foi obtida a curva-R para o arenito a partir da relação  $P-CMOD$  de um corpo-de-prova entalhado, sob flexão em três pontos.

Inicialmente, foi calculado o módulo de elasticidade do material ( $E$ ) usando a parte linear inicial da curva  $P-CMOD$  obtida experimentalmente (Eqn. 3), com a conveniente função de forma  $g(\alpha_0)$  (Shah et al. [3]). O comprimento da trinca ( $a$ ), relativo a cada par  $P-CMOD$ , foi

obtido por iteração, conforme Eqn. 4. Os valores de  $\alpha$  obtidos foram usados para calcular os valores de  $K_{IR}$  (Eqn. 5) e os valores corrigidos de  $CMOD$ , pela Eqn. 3 aplicada aos valores de  $a$  obtidos por iteração, usando a conveniente função geométrica  $F(\alpha)$  (Eqn. 2), sendo  $\sigma_N$  a tensão nominal no corpo-de-prova.

$$CMOD = \frac{4 \cdot \sigma_N \cdot a_0}{E} \cdot g(\alpha_0) \quad (3)$$

$$\beta(\alpha) = \frac{CMOD \cdot B \cdot W \cdot E}{6 \cdot P \cdot S} = \alpha \cdot g(\alpha) \quad (4)$$

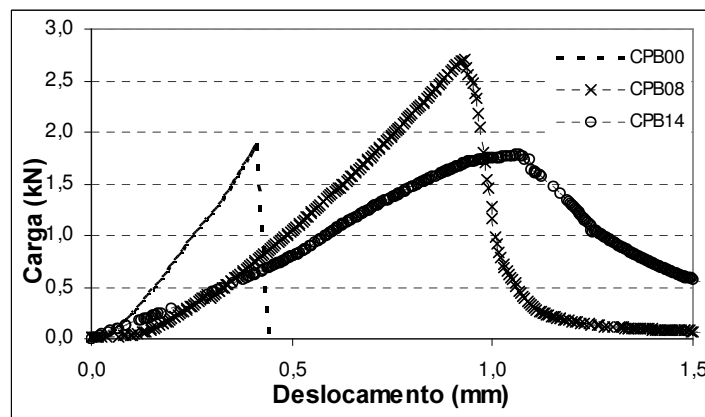
$$K_{IR} = \sigma_N \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

Amostras das superfícies de fratura dos corpos-de-prova das três misturas estudadas (CPB00, CPB08 e CPB14) foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM 5800 LV, buscando obter informações quanto aos tipos de mecanismo de tenacidade presentes no processo de fratura.

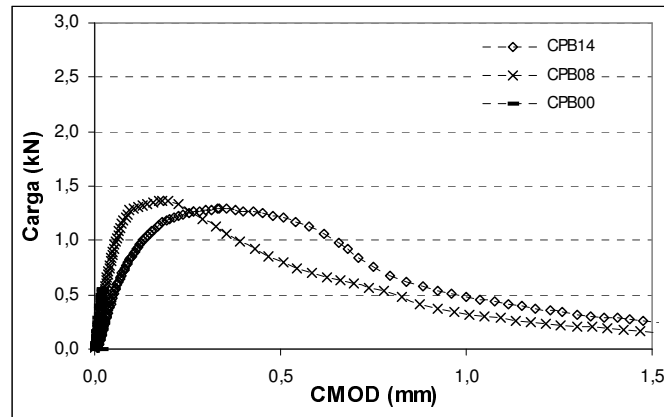
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas carga-deslocamento obtidas dos ensaios de flexão em vigotas sem entalhe e com entalhe, são mostradas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, para as condições sem entalhe e com entalhe.

**FIGURA 2 - CURVAS  $P-V$  DOS ENSAIOS COM VIGOTAS SEM ENTALHE PARA AS TRÊS MISTURAS**



**FIGURA 3 - CURVAS  $P-CMOD$  DOS ENSAIOS COM VIGOTAS COM ENTALHE PARA AS TRÊS MISTURAS**



**TABELA 1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EM ENSAIOS COM VIGOTAS SEM ENTALHE**

Material	Limite de proporcionalidade				Ponto máximo da curva						Energia Esp.	
	$P_{LP}$ (N)		v (mm)		$P_{max}$ (N)		v (mm)		MOR (MPa)		EE ( $\text{kJ/m}^2$ )	
	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio
CPB00	1908	124	0,339	0,034	1908	124	0,339	0,034	4,96	0,36	0,27	0,06
CPB08	2622	47	0,552	0,038	2758	95	0,601	0,024	7,50	0,26	0,78	0,04
CPB14	1552	184	0,797	0,019	1630	146	0,895	0,063	4,43	0,40	0,96	0,09

**TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EM ENSAIOS COM VIGOTAS COM ENTALHE**

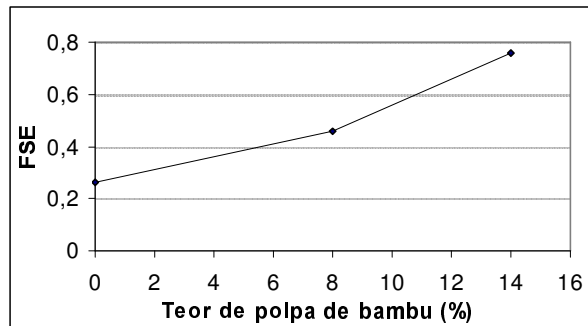
Material	Condições na carga correspondente ao início do crescimento da trinca						Condições no ponto de carga máxima (carga crítica)				FSE
	$P_Q$ (N)		CMOD $_Q$ (mm)		$K_Q$ ( $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )		$P_c$ (N)		CMOD $_c$ (mm)		
	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	Média	Desv. médio	
CPB00	460	66	0,015	0,003	0,34	0,05	500	63	0,019	0,002	0,26
CPB08	1050	82	0,064	0,010	0,77	0,06	1279	90	0,153	0,019	0,46
CPB14	1021	184	0,095	0,022	0,75	0,14	1238	212	0,219	0,074	0,76

Nos corpos-de-prova sem entalhe, a inserção de 8% de polpa de bambu levou a uma melhoria considerável da resistência à flexão, chegando a 51% de aumento, comparando-se com a matriz sem reforço. Porém, para o teor de 14% de polpa, não houve benefício para essa propriedade mecânica, levando à suposição de que a dificuldade em garantir a homogeneidade do material e a maior porosidade, resultantes da presença massiva de fibras, responderam pela introdução de falhas numerosas no material. A capacidade de deformação e a tenacidade, porém, foram sempre crescentes com o aumento do teor de polpa de bambu.

Nos ensaios com corpos-de-prova com entalhe, notou-se uma melhoria considerável no comportamento à flexão dos compósitos em relação à matriz sem reforço, com aumento dos valores de carga correspondentes aos pontos de limite de proporcionalidade e máximo das curvas. Entretanto, entre os teores de 8% e 14% de polpa, não houve variação significativa da resistência à flexão. Consequentemente, o mesmo se deu em relação ao fator de intensidade de tensões  $K_Q$  no início do crescimento da trinca. Com a adição das fibras, esse valor mais do

que dobrou, comparado ao da matriz, mas entre os dois compósitos de teores de polpa diferentes, quase não houve variação. Com relação ao deslocamento de abertura da boca da trinca, com aumento do teor de polpa no compósito, houve considerável incremento. Os compósitos com 8% e com 14% de polpa tiveram deslocamento correspondente à carga máxima 8 vezes e 11,5 vezes maior que o da mistura de referência, respectivamente. A influência do teor de fibras sobre o fator de sensibilidade ao entalhe,  $FSE$ , é mostrado na Figura 4. O compósito com 14% de polpa teve menor prejuízo à capacidade de suportar cargas, devido à presença do entalhe, do que a matriz sem reforço. O  $FSE$  da matriz foi quase um terço do apresentado pelo compósito.

**FIGURA 4** – INFLUÊNCIA DO TEOR DE POLPA SOBRE A SENSIBILIDADE AO ENTALHE DO COMPÓSITO



Observou-se que, nos compósitos, a ruptura devido à propagação da trinca é precedida por um considerável amolecimento (*softening*). Nas Figuras 5 -10, são apresentados dois gráficos para cada mistura, relativos a um dos quatro corpos-de-prova. O primeiro gráfico mostra, simultaneamente, a relação  $P-CMOD$  e a relação entre os valores dos fatores de intensidade de tensões da curva-R ( $K_{IR}$ ) com os correspondentes  $CMOD$ , identificando valores de  $K_{IR}$  em pontos típicos da curva. O segundo mostra a curva que da evolução de  $K_{IR}$  com o aumento da razão  $\alpha$ , entre o comprimento da trinca,  $a$ , e a altura do corpo-de-prova  $W$ .

Na matriz sem reforço, o valor de  $K_{IR}$  foi crescente com o aumento da carga até a ruptura, que se deu logo após a carga de pico, não sendo possível obter um valor constante para esse parâmetro. O comportamento dos compósitos foi bastante diverso do apresentado pela matriz. Os valores de  $K_{IR}$  foram determinados até o ponto da porção descendente da curva  $P-CMOD$  correspondente a 40% da carga máxima. Os valores de  $K_{IR}$  aumentaram com o aumento da carga, na fase anterior à carga de pico, e seguiram aumentando na primeira fase do regime pós-pico, alcançando, então, um valor relativamente constante, para um intervalo de extensão do comprimento da trinca, durante o amolecimento. As médias desses valores de  $K_{IR}$  no platô da curva, para os dois compósitos com fibras, CBP08 e CPB14, foram bem próximos, tendo sido de  $1,88 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e  $1,84 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , respectivamente. Após esse platô, havendo crescimento exacerbado do comprimento da trinca, o valor de  $K_{IR}$  sofre certo decréscimo. A presença das fibras tornou possível manter alguma resistência a cargas dos corpos-de-prova de compósitos, mesmo quando a trinca teve seu comprimento bastante aumentado, quase rompendo a seção do ligamento ( $W-a$ ).

**FIGURA 5** – CURVA-R E CURVA  $P-CMOD$  PARA CPB00



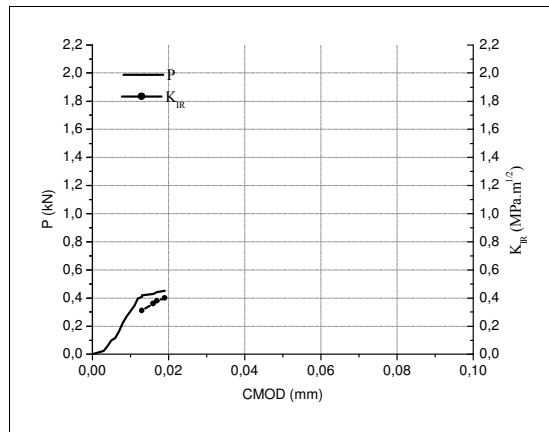


FIGURA 6 – CURVA-R EM FUNÇÃO DA RAZÃO  $a/W$  PARA CPB00

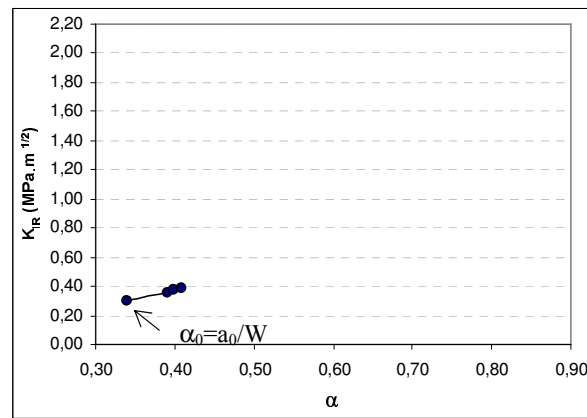


FIGURA 7 – CURVA-R E CURVA  $P-CMOD$  PARA CPB08

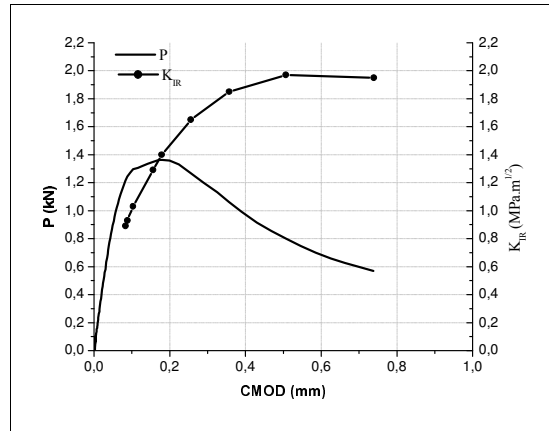


FIGURA 8 – CURVA-R EM FUNÇÃO DA RAZÃO  $a/W$  PARA CPB08

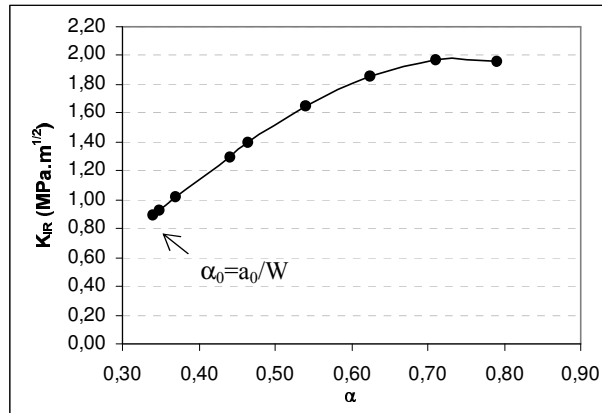


FIGURA 9 – CURVA-R E CURVA *P-CMOD* PARA CPB14

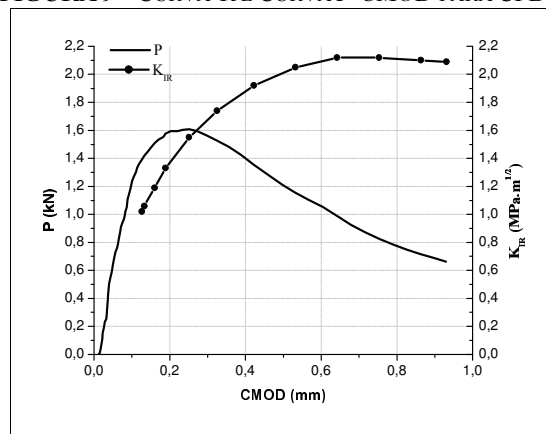
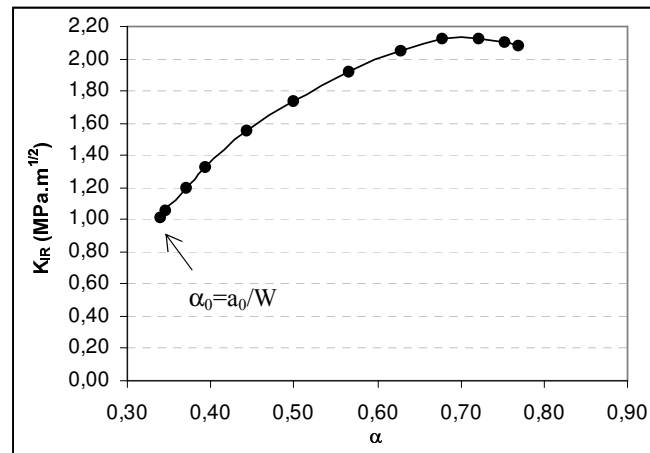
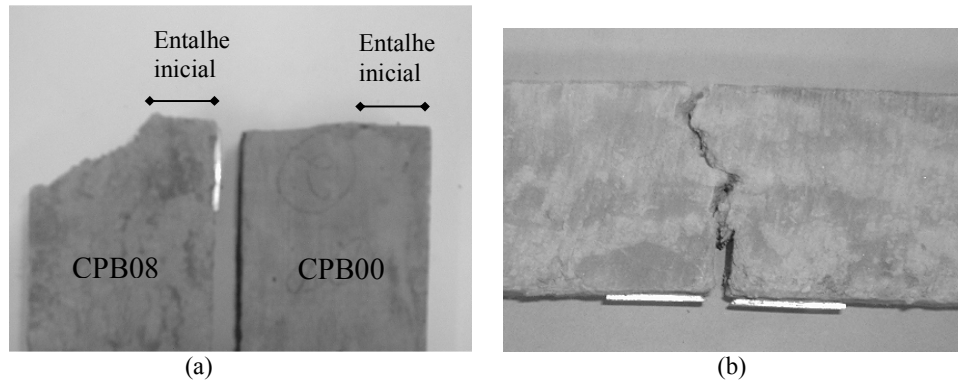


FIGURA 10 – CURVA-R EM FUNÇÃO DA RAZÃO  $a/W$  PARA CPB14



Na Figura 11(a), observa-se que o caminho seguido pela trinca durante o crescimento, na matriz sem reforço, foi aproximadamente coplanar ao entalhe inicial, diferentemente do compósito com 8% de polpa, cuja trinca seguiu caminho bastante tortuoso. A Figura 11(b) apresenta o caminho tortuoso percorrido pela extensão da trinca num corpo-de-prova de CPB14. A aparência das superfícies de fratura dos corpos-de-prova sugere que, para a matriz sem reforço, o mecanismo de fratura foi mais intensamente dominado pela presença do entalhe inicial do que para os compósitos.

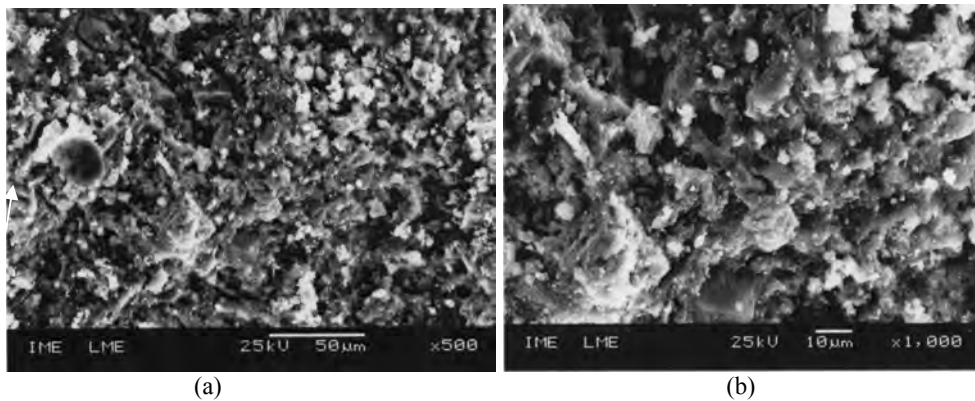
FIGURA 11 – SUPERFÍCIES DE FRATURA (a). PERFIL DE FRATURA EM CPB14 (b)



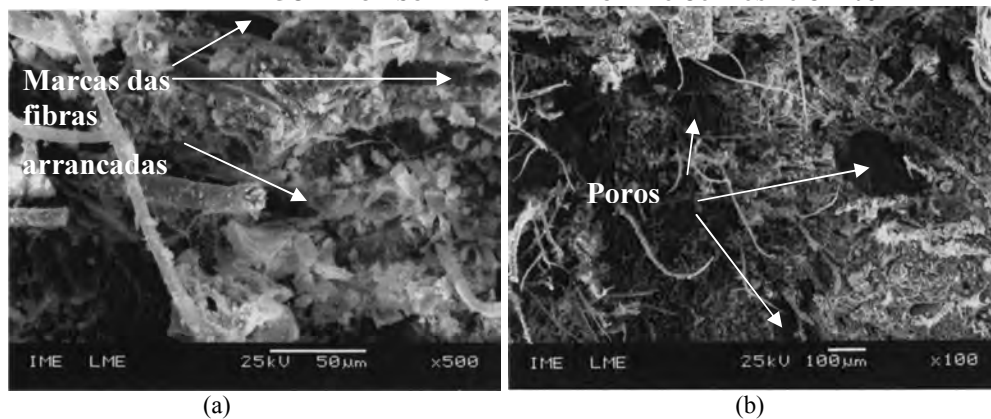
### ANÁLISE DA FRATURA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de superfícies de fratura de corpos-de-prova das três misturas (CPB00, CPB08 e CPB14), são mostradas nas Figuras 12(a-b) a 14(a-b). Analogamente ao que foi assinalado por Rodrigues (2004), percebeu-se que o alto teor de fibras nos compósitos acarretou limitações à observação das imagens ao microscópio. As imagens das Figuras 12(a) e 12(b), da superfície de fratura de um corpo-de-prova de pasta de cimento evidenciam o aspecto rugoso e a presença de poros.

**FIGURA 12 – SUPERFÍCIE DE FRATURA DA MISTURA DE REFERÊNCIA - CPB00**

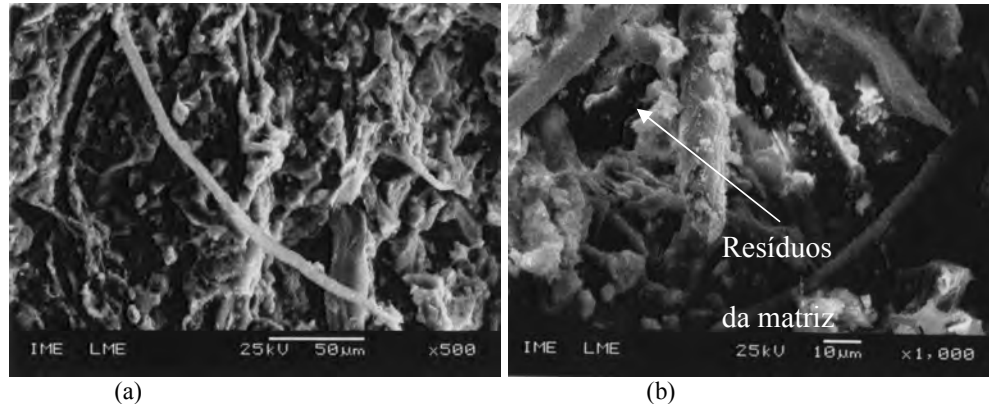


**FIGURA 13 – SUPERFÍCIE DE FRATURA DO COMPOSITO CPB08**



A Figura 13(a), de um corpo-de-prova de CPB08, mostra a ocorrência de arrancamento (*pull out*) de fibras, com fragmentos de matriz aderidos à trechos de fibras soltos, bem como a presença de marcas das posições ocupadas anteriormente pelas fibras na matriz. Há, também, a presença de fibras quebradas. Na Figura 13(b), vêem-se poros de tamanho muitas vezes maior que o diâmetro das fibras. O incremento da porosidade é uma consequência da inserção de altos teores de fibra na mistura.

**FIGURA 13 – SUPERFÍCIE DE FRATURA DO COMPÓSITO CPB14**



A alta concentração de fibras no compósito com 14% de polpa de bambu pode ser percebida nas Figuras 13(a) e 13(b). Vêem-se fibras arrancadas, quebradas e descoladas paralelamente à superfície de fratura, sendo que esse último processo não contribui para a resistência e tenacidade. A presença de resíduos da matriz aderidos à superfície das fibras pode ser indicadora de boa aderência entre fibras e matriz. Não foram percebidos sinais de degradação das fibras vegetais na matriz cimentícia.

## CONCLUSÕES

Nos corpos-de-prova com entalhe, houve melhoria considerável no comportamento à flexão dos compósitos com polpa de bambu em relação à matriz sem reforço, mas, entre os teores de 8% e 14% de polpa, não houve variação significativa de resistência à flexão. A influência do teor de fibras sobre o fator de sensibilidade ao entalhe,  $FSE$ , foi significativo, observando-se que o compósito com 14% de polpa teve bem menor prejuízo à capacidade de suportar cargas, devido à presença do entalhe, do que a matriz sem reforço. O aumento do teor de polpa, de 8% para 14%, proporcionou significativo abrandamento do efeito do entalhe.

A ruptura devido à propagação da trinca, nos compósitos, foi precedida por um considerável amolecimento (*softening*). Na matriz sem reforço, o valor de  $K_{IR}$  foi crescente com o aumento da carga, até a ruptura, que se deu logo depois de atingida a carga de pico. Os compósitos com fibras tiveram comportamento diferente daquele da matriz, pois os valores de  $K_{IR}$  aumentaram com o aumento da carga, alcançando um valor que manteve certa constância, durante o amolecimento. Nesse platô da curva, para os compósitos com fibras, CPB08 e CPB14, os valores médios de  $K_{IR}$  foram de  $1,88 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e  $1,84 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , respectivamente. A presença das fibras tornou os corpos-de-prova ainda dotados de certa resistência, mesmo com grande aumento do comprimento da trinca. Observando-se o perfil do caminho trilhado pela trinca em crescimento, percebeu-se que o mecanismo de fratura foi mais intensamente dominado pela presença do entalhe inicial na matriz sem reforço que nos compósitos. Nesses últimos, a trinca seguiu um caminho bastante tortuoso.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPERJ, pelo suporte financeiro à pesquisa.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Sauoma VE. Lecture notes in fracture mechanics. Dept. of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, may 2000.
2. Roelfstra PE, Wittmann FH. Numerical method to link strain softening with failure of concrete. Fracture toughness and fracture energy of concrete. Proceedings of the International Conference on Fracture Mechanics of Concrete, pp. 163-175, Lausanne, Switzerland, 1986.
3. Shah AN, Swartz SE, Ouyang C. Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. New York: John Wiley and Sons, 1995, 533p.
4. Foote RML, Mai YW, Cotterell B. Process zone size and crack growth measurement in fiber cements. In: Shan SP, Batson GB. Fiber reinforced concrete properties and applications, SP 105-3, p. 55-70. Detroit : ACI, 1987.
5. Mai YW, Foote, RML, Cotterell, B. Size effects and scaling laws of fracture on asbestos cement. International Journal of Cement Composites 2(1), The Construction Press, 1980.
6. Banthia N, Sheng J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. Cement & Concrete Composites, 18, pp. 251-269, 1996.
7. Rodrigues, CS. Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
8. Campbell, MD, Coutts, RSP. Wood fibre-reinforced cement composites, Journal of Materials Science, 1980;15:1962-1970.
9. Konish, HJ, Swedlow JL, Cruse TA. Experimental investigation of fracture in an advanced fiber composite. Journal of Composite Materials, 6, pp. 114-124, 1972.
10. Dally JW, Riley WF. Experimental stress analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
11. Ferreira LET, Bittencourt TN, Sousa JLAO, Gettu R. R-curve behavior in notched beam test of rocks. Engineering Fracture Mechanics, 69, pp. 1845-1852, 2002.