

**REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS** IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL

# **Development and analysis of high performance hybrid** cement composites

# **Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios** híbridos de alto desempenho

V. J. FERRARI ª vladimirjf@hotmail.com

J. B. DE HANAI <sup>b</sup> jbhanai@sc.usp.br

## Abstract

In this work, the hybridization effect in cimentitious composites is studied in an attempt to modify the material and to improve the process of transference of stress of the matrix to steel fibers. Steel short fibers and steel microfibers were used in a mortar matrix for production of notched beams of 150 mm x 150 mm cross section with a length of 500 mm. Tests in beams under three point loading were conducted with crack mouth opening displacement (CMOD) control. The performance of the hybrid composites were compared with the performances of steel short fibre composites and matrix. The results were analised considering the flexional toughness and fracture tougheness parameters. The hybridization process have shown to have a satisfactory behavior translated for a strain hardening.

Keywords: cementitious composites, hybridization, flexional tougheness, fracture toughness.

## Resumo

Neste trabalho, estudou-se o efeito da hibridização em compósitos cimentícios numa tentativa de modificar o material em sua microestrutura e melhorar o processo de transferência de tensões da matriz cimentícia para as fibras de aço. Para tanto, fibras curtas e microfibras de aço foram adicionadas a uma matriz cimentícia de argamassa para confecção de corpos-de-prova prismáticos entalhados e com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de flexão com carga no meio do vão sob o controle dos deslocamentos de abertura da entrada do entalhe (CMOD). O desempenho dos compósitos híbridos foi comparado ao dos compósitos produzidos somente com a adição da fibra curta de aço e também ao da matriz sem fibras. Os resultados foram analisados considerando-se os parâmetros de tenacidade flexional e tenacidade ao fraturamento do material. O processo de hibridização permitiu obter compósitos de alto desempenho.

Palavras-chave: compósitos cimentícios, hibridização, tenacidade flexional, tenacidade ao fraturamento.

Received 06 Aug 2008 • Accepted • 09 Jun 2009 • Available Online 30 Sep 2009

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, vladimirjf@hotmail.com, Av. Colombo n.5.790, 87.020-900, Maringá-PR, Brasil;
Universidade de São Paulo, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, jbhanai@sc.usp.br, São Carlos, Brasil.



## 1. Introdução

A matriz cimentícia de concretos e argamassas tem baixa resistência à tração comparativamente à sua resistência à compressão, uma baixa capacidade de deformação e perde quase que imediatamente a sua resistência após o surgimento da primeira fissura. Neste sentido, a incorporação de fibras de aço, de elevada resistência à tração e ductilidade, pode melhorar a capacidade de carga e de deformação da matriz cimentícia. A presença das fibras curtas de aço proporciona à matriz uma capacidade portante pósfissuração e condição para suportar deformações bem maiores do que a matriz sozinha.

Segundo Bentur & Mindes [1], as fibras de aço não são tão eficientes quanto as armaduras contínuas para suportar esforços de tração, entretanto, apresentam papel fundamental no controle da propagação de fissuras no concreto. Elas alteram o comportamento mecânico do concreto após a ruptura da matriz e melhoram a sua tenacidade, ou seja, a sua capacidade de absorção de energia. Como exemplifica a Figura 1, as fissuras existentes numa matriz de concreto podem ser interceptadas pelas fibras, que, por sua vez, opõem-se à tendência de alargamento das fissuras devido à sua aderência com a matriz. Como resultado, há um aumento na tenacidade do material, pois mais energia é necessária para que ocorra abertura das fissuras. Dessa maneira, a ruína torna-se menos frágil, por conta de deformações plásticas e do escorregamento das fibras.

As modificações decorrentes da adição de fibras de aço à matriz cimentícia em taxas de até cerca de 2% tendem a restringir-se apenas à fase de pós-pico do histórico de carregamento. Segundo



Ferreira [3], nessas condições, as fibras de aço não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que antecede a carga máxima (crescimento subcrítico da fissura).

Assim com o objetivo de melhorar o comportamento de compósitos cimentícios de argamassa com fibras de aço na fase pré-pico de resistência, estuda-se neste trabalho o efeito do processo de hibridização, ou seja, da incorporação de microfibras de aço às fibras de aço convencionais, numa tentativa de modificar o compósito em sua microestrutura e, consequentemente, melhorar o processo de transferência de tensões da matriz para as fibras.

## 2. Programa experimental

#### 2.1 Configuração do ensaio e instrumentação

Para avaliar o comportamento à tração na flexão dos compósitos cimentícios de alto desempenho foram realizados ensaios de flexão em corpos-de-prova prismáticos seguindo as recomendações da RILEM [4].

Trata-se de ensaios em corpos-de-prova dotado de entalhe central reto passante, com profundidade nominal de 25 mm e largura de 2 mm, executado com disco de corte diamantado em sua face lateral. A execução do entalhe tem por objetivo induzir o fraturamento em um plano preferencial e também elevar os níveis de solicitação em todo o material à frente da ponta do entalhe. Assim, durante a solicitação do corpo-de-prova entalhado, a deformação é sempre localizada no plano que contém o entalhe e a dissipação de energia volumétrica (que ocorre predominantemente na fase pré-pico de carregamento) é reduzida. Figura 3 – Detalhe do corpo-de-prova posicionado para realização do ensaio



Nas Figuras 2 e 3 é possível observar o aspecto geral da configuração dos ensaios realizados no LE – Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Para medição dos deslocamentos verticais da linha de aplicação da força foi utilizado um transdutor de deslocamentos que se encontrava apoiado num suporte denominado "Yoke", o qual permite que o deslocamento

Tabela 1 – Compósitos analisados e características das fibras e microfibras de aço									
Groupo	Compósitos		Taxa de	fibra	Tipo de fibra	Material	Idade no ensaio		
1		СР	0%	,	-	argamassa	29 dias		
2	1ono- bridos	CPIA	1%	,	А	argamassa	29 dias		
3		CP1.5A	15%	15%		argamassa	29 dias		
4	≥` <u></u>	CP2A	2%		А	argamassa	29 dias		
5	10	CP1.5A0.5C	1.5%+0	),5%	A+C	argamassa	28 dias		
6	qos	CP1.5A1.5C	1.5%+	1.5%+1.5%		argamassa	28 dias		
7	Hibri	CP1.5A2.5C	1,5%+2	2.5%	A+C	argamassa	28 dias		
8	<u> </u>	CP1.5A3.5C	1.5%+3	3.5%	A+C	argamassa	28 dias		
Parâmetros das fibras			Fibro	Fibra A: FS-8 Wirand			Fiber C		
Formato longitudinal		<del>&lt; -</del>	< <u>25mm</u> >			13mm			
Diâmetro nominal				0.75 mm			0.75 mm		
Fator de forma				33			17		
Tensão máxima de tração				1100 MPa			1100 MPa		

Tabela 2 – Resultados médios da caracterização dos compósitos								
Grupos		Compósitos	f <sub>cm</sub> (MPa)	f <sub>ctm,sp</sub> (MPa)	E <sub>cs</sub> (MPa)			
1		CP	52.54	3.07	23839			
2	Ч S	CPIA	43.78	3.68	22696			
3	lonc	CP1.5A	42.24	3.70	23100			
4	22	CP2A	45.68	4.92	23974			
5		CP1.5A0.5C	49.23	4,44	28217			
6	dos	CP1.5A1.5C	47.22	4,89	32261			
7	líbri	CP1.5A2.5C	43.55	4,75	31041			
8	1	CP1.5A3.5C	42.76	4.88	29137			

*Observações:* Para cada compósito foram ensaiados 3 corpos-de-prova à compressão axial e 3 à tração por compressão diametral utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. E<sub>ca</sub> – é o módulo secante de deformação correspondente a inclinação da reta secante ao diagrama tensão-deformação,

passando pelos pontos correspondentes a tensão de 0,5MPa e à tensão de 30% da ruptura .

vertical seja tomado com referência ao próprio corpo-de-prova. Fez-se uso de um equipamento servo-hidráulico Instron com o emprego de uma célula de carga com capacidade de 100 kN. Os ensaios foram conduzidos sob o controle dos deslocamentos de abertura da entrada do entalhe (CMOD), utilizando-se para tanto um extensômetro elétrico do tipo clip gauge. A operação dos ensaios foi realizada com a imposição de uma taxa de abertura do clip gauge de 0,02 mm/min para CMOD até 0,1 mm. Após esse limite, aumentou-se a taxa para 0,40 mm/min.

#### 2.2 Programa de ensaios

Foram moldados vinte e quatro corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Eles foram divididos em oito grupos formados por três prismas moldados com as mesmas características. Assim, foi formado um conjunto de oito compósitos diferentes, a partir da variação do volume e do tipo de fibras de aço adicionadas à matriz cimentícia. Para facilitar a identificação das características de cada compósito utilizou-se a seguinte nomenclatura:



Os compósitos foram confeccionados utilizando-se um traço de argamassa com resistência à compressão da matriz na faixa de 50 MPa. O traço de argamassa foi utilizado numa tentativa de desenvolver um compósito para aplicações em reparos estruturais (como por exemplo, o substrato tracionado e danificado de vigas de concreto armado), onde um importante aspecto a ser considerado é a capacidade do material fluir dentro da fôrma, minimizando o difícil trabalho de vibração.

Na Tabela 1, apresentam-se os diferentes compósitos analisados, juntamente com a descrição das características das fibras e mi-

crofibras de aço utilizadas. A fibra aqui especificada por "A", tem nome comercial FS-8 Wirand, foi fornecida pela empresa Maccaferri – América Latina, possui comprimento de 25 mm, com gancho nas extremidades e diâmetro de 0,75 mm.

Pelas razões já descritas no início do trabalho, buscou-se estudar o efeito da incorporação de microfibras de aço às fibras FS-8. Para tanto, utilizou-se uma microfibra de aço com 13 mm de comprimento e 0,75 mm de diâmetro nominal. Essas microfibras, também fornecidas pela empresa Maccaferri, foram aqui especificadas por "C"

Os compósitos híbridos foram produzidos fixando-se o volume de fibras curtas de aço em 1,5% e variando-se o volume de microfibras de aço. Esse volume de fibra curta foi definido por ser um valor intermediário entre 1% e 2% de fibras e também, da maior capacidade de absorção de energia observada na curva P-CMOD (item 3.2.2) do compósito CP1.5A (1,5% de fibras) em relação ao CP1A (1% de fibra) e de desempenho semelhante a curva P-CMOD do compósito CP2A (2% de fibras), mesmo com um menor volume de fibras.

#### 2.3 Preparação dos compósitos

Os compósitos foram produzidos de acordo com o traço em massa de 1:3 (cimento e agregado miúdo). O consumo de cimento utilizado foi de 500 kg/m<sup>3</sup> e a relação a/c foi de 0,5. Foi adicionado aditivo superplastificante visando-se dar maior fluidez à mistura (requisito necessário para aplicações em regiões congestionadas por armaduras e de dimensões reduzidas). Utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) para garantir elevados ganhos de resistência já nas primeiras idades (condição necessária em casos de aplicação como reparo, onde a estrutura precisa ser recolocada em serviço rapidamente).

Para proceder à mistura dos materiais, empregou-se uma argamassadeira elétrica de capacidade nominal de 50 litros. Os procedimentos usados na mistura foram: a) mistura da areia e cimento por cerca de 1 minuto; b) adição aleatória das fibras e microfibras de aço durante a mistura ainda seca; c) adição de água e aditivo à mistura. O tempo gasto em cada mistura foi de aproximadamente seis minutos, sendo em seguida lançada em carrinho de mão e transportada até o local da moldagem.

Para cada compósito foram também moldados seis corpos-deprova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com o objetivo de obter a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram mantidos às mesmas condições de adensamento e cura – armazenamento em câmara úmida, local onde foram inseridos 24 horas após a moldagem e onde permaneceram até a data de ensaio. A Figura 4 mostra um detalhe da mistura dos materiais.

## 3. Resultados e discussões

#### 3.1 Ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos

Os valores das propriedades mecânicas dos compósitos: resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ), resistência média à tração por compressão diametral ( $f_{ctm,sp}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_{cs}$ ) são apresentados na Tabela 2. A determinação dessas propriedades foi feita na mesma data dos ensaios de flexão, quando a idade dos compósitos era de 28 ou 29 dias.

De uma maneira geral, verificou-se que, com a adição das fibras de aço, a resistência à compressão axial dos compósitos diminuiu. O ACI 544.2R [5] comenta que as fibras de aço, nos teores normalmente empregados (até cerca de 2% em volume) não acrescentam melhoras substanciais na resistência à compressão do concreto, podendo até levar a uma pequena redução nessa propriedade.

O compósito CP1.5A apresentou a maior redução em relação à matriz sem fibras, cerca de 24%, enquanto o CP1.5A0.5C exibiu apenas 7% de diferença. De certa forma, observou-se que as fi-

bras de aço têm influência significativa na redução da resistência à compressão dos compósitos cimentícios de argamassa. Este fato pode estar relacionado ao papel que as fibras de aço exercem no aprisionamento de ar pela matriz.

Com relação aos valores de resistência à tração por compressão diametral, observou-se que os compósitos com fibras apresentaram maiores resistências do que a matriz sem fibras. O maior incremento chegou a 60%, para o compósito CP2A e o menor incremento foi de 20%, para o compósito CP1A. Comparando-se a resistência de 3,70 MPa obtida para o compósito CP1.5A, com a de 4,44 MPa para o compósito CP1.5A0.5C, comprova-se que a presença da microfibra de aço potencializou essa propriedade do material.

Os valores do módulo de elasticidade dos compósitos com apenas um tipo de fibra são praticamente iguais ao da matriz sem fibras, chegando a ser inferior em até 5% para o compósito CP1A. Já para os compósitos híbridos, o módulo de elasticidade sempre é superior ao valor apresentado pela matriz sem fibras. Os incrementos verificados situam-se na faixa de 18% (CP1.5A0.5C) a 35% (CP1.5A1.5C).

3.2 Ensaios de flexão em corpos-de-prova prismáticos

#### 3.2.1 Forças e resistências conforme RILEM

A determinação da tenacidade flexional dos compósitos cimentícios foi feita seguindo-se as recomendações prescritas pelo grupo de trabalho TC 162-TDF da RILEM. Esse grupo tem-se destacado no âmbito da normalização de ensaios para caracterização de materiais cimentícios com fibras, assim como para o estabelecimento de parâmetros a serem utilizados na análise e dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço.

O critério de avaliação da tenacidade pela RILEM [4] baseia-se na capacidade de absorção de energia, entendida como a área sob a curva P- $\delta$  (P é a força aplicada ao corpo-de-prova e  $\delta$  é o seu deslocamento vertical). A contribuição das fibras para a tenacida-de do compósito é avaliada através da subtração da parcela de tenacidade que provém da resposta da matriz cimentícia.



Tabela 3 – Forças e resistências conforme RILEM (4)											
	Forças					Resistências					
Compósitos	F <sub>L</sub> (kN)	F <sub>м</sub> (kN)	F <sub>r,1</sub> (kN)	F <sub>R,4</sub> (kN)		f <sub>fct,L</sub> (MPa)	f <sub>eq,2</sub> (MPa)	f <sub>eq,3</sub> (MPa)	f <sub>r.1</sub> (MPa)	f <sub>R,4</sub> (MPa)	
CP	8.00	8.00	1.26	-		2.33	-	-	0.37	-	
CPIA	13.41	13.41	12.46	5.22		3.87	3.31	2.58	3.60	1.51	
CP1.5A	13.15	16.10	16.01	6.10		3.73	4.58	3.16	4.54	1.73	
CP2A	14.50	17.59	17.35	7.59		4.56	5.53	4.20	5.45	2.38	
CP1.5A0.5C	16,41	17,78	17.23	9,32		4,58	4.94	3.98	4,79	2.61	
CP1.5A1.5C	16.01	20.95	20.91	9.42		4.79	6.46	4.80	6.25	2.81	
CP1.5A2.5C	17.43	19.30	17.87	4.20		5.18	5.42	3.40	5.15	1.21	
CP1.5A3.5C	14.31	15.55	15.18	8.12		4.18	4.47	3.60	4.37	2.34	

Na Figura 5 ilustra-se uma resposta típica do comportamento à flexão de compósitos com fibras, juntamente com as expressões utilizadas para cálculo das resistências equivalentes à tração na flexão (f<sub>eq.2</sub> e f<sub>eq.3</sub>) e das resistências residuais em flexão (f<sub>R,1</sub> e f<sub>R,4</sub>). Os significados dos parâmetros apresentados nessa figura são: F<sub>L</sub> - é a força máxima de offset dentro do intervalo de  $\delta$ =0,05 mm. Esse intervalo é obtido com o auxílio de uma reta paralela à tangente inicial, passando pelo ponto que caracteriza o deslocamento  $\delta$  de offset. Esse procedimento geométrico para cálculo do valor de F<sub>L</sub>, faz parte das recomendações de versões anteriores da RILEM. A versão mais atual permite tomar simplificadamente, F<sub>L</sub>, como sendo o maior valor de força registrado no intervalo de  $\delta$ =0,05mm. Aqui, com auxílio de uma ferramenta computacional, denominada TENAC (Ferreira [6]), foi possível considerar o valor de F<sub>L</sub> como sendo o de offset.

 $\delta_{L} - \acute{e}$  o valor de deslocamento vertical correspondente a  $F_{L}$ ;

 $f_{fct,L}$  – é a tensão correspondente à força  $F_L$ ,

dada pela expressão:  $f_{fct,L} = \frac{3.F_L.L}{2.b.h_{sp}^2};$ 

 $\begin{array}{l} L-\acute{e} o ~vão~livre ~do~corpo-de-prova e b \acute{e} a sua largura; \\ h_{sp}-~distância do topo do entalhe até a face superior do corpo-de-prova; \\ D^{b}_{BZ,} ~D^{f}_{BZ,2} e ~D^{f}_{BZ,3} - parcelas de absorção de energia pela matriz e pelas fibras, respectivamente. São calculadas através da área sob a curva P-δ até deslocamentos específicos (ver Figura 5); \end{array}$ 

 $F_{\rm R,1} e \; F_{\rm R,4}$  – valores de força correspondentes aos deslocamentos  $\delta_{\rm R1}$ =0,46 mm e  $\delta_{\rm R4}$ =3,00 mm. São valores utilizados para cálculo das resistências residuais dos compósitos.

De acordo com a RILEM [4], as parcelas de tenacidade (Df<sub>BZ,2</sub> e Df<sub>BZ,3</sub>) são transformadas em resistências flexionais equivalentes (f<sub>eq,2</sub> e f<sub>eq,3</sub>) para os diferentes níveis de deslocamentos  $\delta_2$  e  $\delta_3$ . A capacidade de carga do material em relação a um valor prédefinido de flecha é avaliada através do conceito de resistências flexionais residuais (f<sub>R,1</sub> e f<sub>R,4</sub>). Utilizando-se esses conceitos, na Tabela 3 apresentam-se os valores de forças e resistência calculados com base nas recomendações da RILEM [4].

Na Tabela 3 é também apresentado o valor da força ( $F_{_M}$ ), que corresponde à força máxima alcançada pelo compósito ao longo do histórico de carregamento. Seguindo uma tendência européia, a RILEM descartou o conceito de força de primeira fissura (first-crack strength) e passou a adotar o valor de  $F_1$  que é a força máxima de offset.

De acordo com a RILEM [4], o valor de  $f_{ct,L}$  corresponde à tensão referente à força  $F_L$  e representa a parcela de resistência proveniente da contribuição da matriz cimentícia. Já os valores de resistências flexionais equivalentes,  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  representam o comportamento do compósito proveniente da parcela de contribuição das fibras na resistência do material. Assim, pode-se dizer que a resistência da matriz foi incrementada com a incorporação de fibras de aço, pois a sua adição sempre aumentou o valor do parâmetro  $f_{etL}$ .

Nos compósitos híbridos, foi detectada tendência de aumento de  $f_{\rm et}$  em função do acréscimo de microfibras até o volume de 2,5%.





É interessante notar que o compósito CP1.5A0.5C apresentou valor de resistência superior ao compósito CP1.5A (sem microfibras de aço) e inferior aos demais: CP1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C. Para o compósito CP1.5A3.5C o elevado volume de fibras pode ter prejudicado o desempenho da matriz.

Os valores das resistências  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  caracterizam o comportamento dos compósitos em relação ao desempenho das fibras. Logo, destaca-se o desempenho dos compósitos CP1.5A, CP2A, CP1.5A0.5C, CP1.5A1.5C, CP1.5A2.5C e CP1.5A3.5C. Nesses compósitos, a ação das fibras de aço elevou o nível de resistência do material de forma que a resistência flexional equivalente ( $f_{eq,2}$ ) superou o valor de



resistência dado pela contribuição apenas da matriz (f<sub>rc1</sub>).

Na Figura 6 analisa-se a relação entre a força máxima de offset ( $F_L$ ) e a força máxima resistida pelos compósitos ( $F_M$ ). De acordo com o ilustrado nessa figura, nos compósitos representados por uma única cor, a força  $F_M$  é igual a  $F_L$ , ou seja, as fibras não proporcionaram aumento da capacidade de carga além da contribuição da matriz. Para os compósitos com fibras onde aparecem duas cores, a força  $F_M$  é superior a  $F_L$ , isto é, a capacidade de carga é incrementada pela parcela de contribuição das fibras.

Logo, fica evidente que a adição de 1% de fibras de aço não foi suficiente para elevar a capacidade de carga do compósito CP1A além da parcela de contribuição dada apenas pela matriz cimentícia. Já nos demais compósitos, em especial nos híbridos, a sua capacidade de carga foi incrementada além da contribuição dada pela matriz.

Nos compósitos híbridos, a capacidade de carga da matriz foi superior à dos compósitos com um tipo de fibra, o que é reflexo direto da ação das microfibras de aço na fase de solicitação inicial do material.

#### 3.2.2 Curvas P-CMOD

O conjunto global de curvas P-CMOD obtidas nos ensaios de flexão, relativo ao comportamento dos diversos compósitos estudados encontram-se reunidos no apêndice da referência [3]. Para representar o comportamento de cada compósito, considerou-se a curva "média" das três para ele obtidas. Na Figura 7 reúnem-se as curvas "médias" P-CMOD dos compósitos cimentícios analisados.

Como pode ser visto, a presença de fibras e microfibras de aço na matriz cimentícia melhorou o seu comportamento, traduzido em termos de aumento da capacidade de absorção de energia e elevação dos níveis de resistência antes e após a ruptura da matriz. O aumento no volume de fibras A, proporcionou melhora gradual na ductilidade desses compósitos. Sobremaneira, a incorporação das microfibras C contribuiu ainda mais nesse sentido.

Com a adição de 0,5% de microfibras, foi possível elevar a capacidade de absorção de energia do compósito CP1.5A ao mesmo nível do CP2A. Com o aumento no volume de microfibras até 1,5%, respostas ainda melhores foram obtidas. No entanto, para volumes de microfibras de 2,5% e 3,5% o desempenho dos compósitos não foi superior ao observado no CP1.5A1.5C.

Na Figura 8, são reapresentadas as curvas mostradas na Figura 7, agora dando ênfase ao intervalo inicial de solicitação dos compósitos, ou seja, para CMOD até 0,15 mm. Assim, é possível melhor compreender o efeito das microfibras na resposta do material.

Com a presença das microfibras, a rigidez inicial dos compósitos foi diminuída em razão da maior descontinuidade na matriz provocado pela elevada quantidade de fibras. Nos compósitos com apenas fibras A, o trecho após a fissuração da matriz, que se caracteriza pela transferência de tensões da matriz para as fibras encontra-se bem definido - resistência constante e CMOD variável. Quando se tem microfibras na matriz, a transferência de tensões foi gradual e ocorreu com aumento da capacidade de carga dos compósitos.

O processo de transferência de tensões durante a evolução da fissuração da matriz é, então, facilitado pela grande quantidade de microfibras dispersas na matriz, que aumenta a possibilidade de interceptação de uma fissura. Com isso, o crescimento da fissura fica condicionado à elevação do nível de carregamento aplicado ao compósito.



#### 3.2.3 Curvas de Resistência ao fraturamento

As curvas P-CMOD obtidas experimentalmente são agora analisadas sob o enfoque da Mecânica do Fraturamento. Para tanto, foram construídas curvas de resistência ao fraturamento considerando-se a metodologia sugerida por Ferreira [3].

As curvas de resistência obtidas para os compósitos cimentícios são apresentadas na Figura 9. Nessa figura  $K_R é$  a resistência ao fraturamento e  $\alpha$  é a profundidade da fissura (a) normalizada relativamente à altura (W) do corpo-de-prova prismático, ou seja,  $\alpha$  = a/W.

Da análise das curvas de resistência, é possível tecer algumas considerações quanto ao desempenho dos compósitos cimentícios à propagação de fissuras. De uma maneira geral, a adição de fibras metálicas à matriz cimentícia de argamassa, aumentou a resistência ao crescimento das fissuras em comparação com o compósito sem adição de fibras (CP).

O ganho de resistência ao fraturamento ficou bem evidenciado, principalmente no regime de ruptura pós-pico, aumentando gradativamente com o aumento no teor de fibras nos compósitos com um tipo de fibra. Já nos compósitos híbridos, o ganho de resistência ao fraturamento evoluiu gradativamente com o aumento no volume de microfibras até 2.5%. A partir desse volume, um melhor desempenho não foi observado.

Nota-se claramente, na fase pós-pico de carregamento, que os trechos finais das curvas de resistência dos compósitos híbridos CP1.5A0.5C e CP1.5A1.5C são mais ascendentes que os demais. Isso caracteriza o elevado ganho de resistência à propagação da fissura proporcionado pela presença das fibras e microfibras de aço e está associado à dissipação de energia envolvida no processo de arrancamento das fibras.

Para uma melhor visualização da resistência ao fraturamento dos compósitos, na Figura 10, as curvas de resistência são reapresentadas agora somente com os trechos iniciais tendo como limites  $\alpha$  = 0,5 e K<sub>p</sub> = 250 daN.cm<sup>-1,5</sup>.

Nota-se para a matriz sem fibras, como era esperado, uma baixa capacidade de resistência ao avanço da fissura, traduzida pela pequena extensão do trecho vertical inicial. Tal fato sugere o crescimento subcrítico das fissuras, mesmo em baixos níveis de car-



regamento, eventualmente em virtude da ausência de agregados graúdos na mistura. Por outro lado, a presença das fibras e micro-fibras de aço na mistura retardou esse fenômeno.

Mesmo para pequenos estágios de avanços da fissura ( $\alpha = 0,2$ ), as resistências ao fraturamento dos compósitos híbridos foram superiores às dos compósitos com um tipo de fibra. Tal fato está diretamente associado à presença das microfibras de aço, que vinculam o avanço da fissura com o aumento do nível de solicitação aplicado ao compósito. No entanto, os resultados mostram existir um volume de microfibras de aço a partir do qual não é possível obter melhor desempenho para o compósito.

É importante destacar também, da análise da Figura 9, que a evolução do ganho de resistência ao fraturamento dos compósitos ocorreu segundo dois estágios distintos e bem definidos. O estágio inicial da fissuração – caracterizado por um aumento na tenacidade ao fraturamento um pouco mais suave – e o estágio final do processo de fissuração – onde a resistência ao fraturamento aumentou de maneira mais acentuada.

No estágio inicial é onde se inicia o processo de tracionamento das fibras e microfibras de aço e a transmissão de tensões entre as faces da fissura por meio dessas fibras. Esse estágio, em que ocorre a formação das faces das fissuras, se caracteriza por haver maior evolução das fissuras do que ganho de resistência ao fraturamento.

O estágio final do processo de fissuração é onde se verifica um aumento considerável da resistência ao fraturamento do compósito, por conta do arrancamento das fibras que se encontram ancoradas à matriz cimentícia. Nesse estágio, a eficiência das fibras em relação ao acréscimo de tenacidade ao fraturamento é refletida notavelmente.

## 4. Conclusões

Em resumo, as principais conclusões construídas ao longo do trabalho são:

O uso de fibras e microfibras de aço é uma alternativa interessante para aplicação no campo da recuperação estrutural, pois a sua adição à matriz cimentícia tem condições de elevar a resistência à tração na flexão e aumentar a tenacidade ao fraturamento do material;

- O processo de hibridização, ou seja, a adição das microfibras de aço além das fibras convencionais potencializa uma maior contribuição da matriz para a resistência do compósito e melhora o mecanismo de transferência de tensões da matriz para as fibras;
- Com a fissuração da matriz, a transferência de tensões foi facilitada pelas microfibras de aço que, em grande número na matriz, condicionaram o avanço das fissuras à elevação do nível de carregamento;
- Dentre os compósitos analisados, considerando-se o ganho contínuo de resistência ao fraturamento e a característica de pseudo-encruamento (incremento na capacidade de carga do compósito cimentício mesmo no estágio pós-fissurado), o compósito híbrido CP1.5A1.5C mostrou ser o mais adequado para aplicações em regiões tracionadas de peças de concreto armado;
- Não se pode deixar de destacar também a resposta obtida com os demais compósitos, entre eles o também híbrido CP1.5A2.5C Apesar de ter apresentado nos estágios iniciais de carregamento uma resistência ao fraturamento levemente superior ao compósito CP1.5A1.5C, sua tenacidade flexional e também a sua resistência à tração indireta são inferiores.

## 5. Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa durante o trabalho de doutorado do autor e à Maccaferri – América Latina pela doação das fibras e microfibras de aço.

## 6. Referências bibliográficas

- [01] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. New York, Elsevir Applied Science, 1990.
- [02] NUNES, N.L.; AGOPYAN, V. Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil, 1998.
- [03] FERREIRA, L.E.T. Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçado com fibras de aço, São Paulo, 2002, Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 266 p.
- [04] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Materials and Structures, v.35, p. 579-582, 2002.
- [05] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. ACI 544.2R, Detroit, 1996.
- [6] FERREIRA, L.E.T.; HANAI, J.B.; BITTENCOURT, T.N. Computacional evaluation of flexural toughness of FRC and fracture properties of plain concrete. Materials and Structures, em impressão, 2007.