

Compósitos cimentícios híbridos de microconcreto

Vladimir J. Ferrari⁽¹⁾, Luiz E. T. Ferreira⁽²⁾, João Bento de Hanai⁽³⁾

Trabalho recebido em 03/10/2007 e aprovado para publicação em 21/12/2008

Resumo

Neste trabalho estuda-se o efeito da hibridização em compósitos cimentícios de microconcreto 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 microconcreto 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 em três pontos sob o controle dos deslocamentos de abertura da entrada do entalhe (CMOD). O desempenho dos compósitos híbridos foi comparado diretamente ao do compósito mono-híbrido (produzido somente com a adição da fibra curta de aço) e 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 com um comportamento satisfatório traduzido por um pseudoencruamento.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios. Hibridização. Tenacidade flexional. Tenacidade ao fraturamento.

⁽¹⁾ Engenheiro Civil, Doutor em Estruturas, professor da Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo 5790, 87020-900, Maringá, PR, Brasil. E-mail: vladimirjf@hotmail.com

⁽²⁾ Pesquisador Associado, Doutor, Depto. de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 13566-590 São Carlos, SP, Brasil. E-mail: leferrei@sc.usp.br

⁽³⁾ Professor Titular, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 13566-590 São Carlos, SP, Brasil. E-mail: jbhanai@sc.usp.br. Autor para correspondência: vladimirjf@hotmail.com

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.

Nesse 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 pós-fissuração e condição para suportar deformações bem maiores do que a matriz sozinha.

Segundo Bentur e Mindes (1990), 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 em razão da 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.

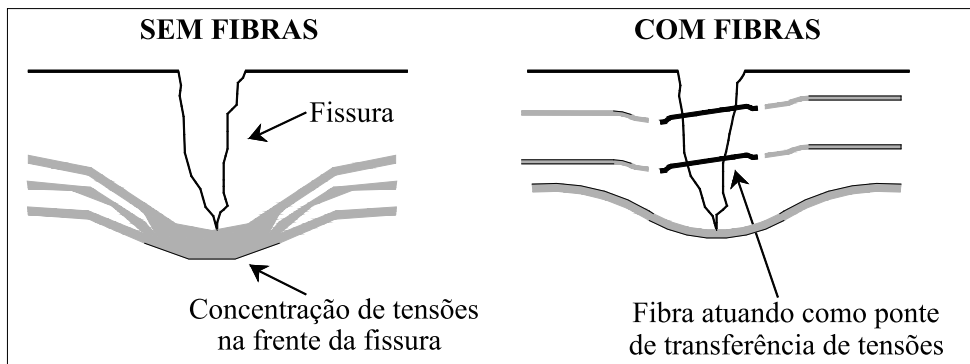


Figura 1: Mecanismo de ação das fibras de aço (Nunes; Agopyan, 1998)

As modificações decorrentes da adição de fibras de aço à matriz cimentícia, em taxas relativamente baixas (no máximo 2%), restringem-se apenas à fase de pós-pico do histórico de carregamento. Segundo Ferreira (2002), 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 microconcreto 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, conseqüentemente, melhorar o processo de transferência de tensões da matriz para as fibras.

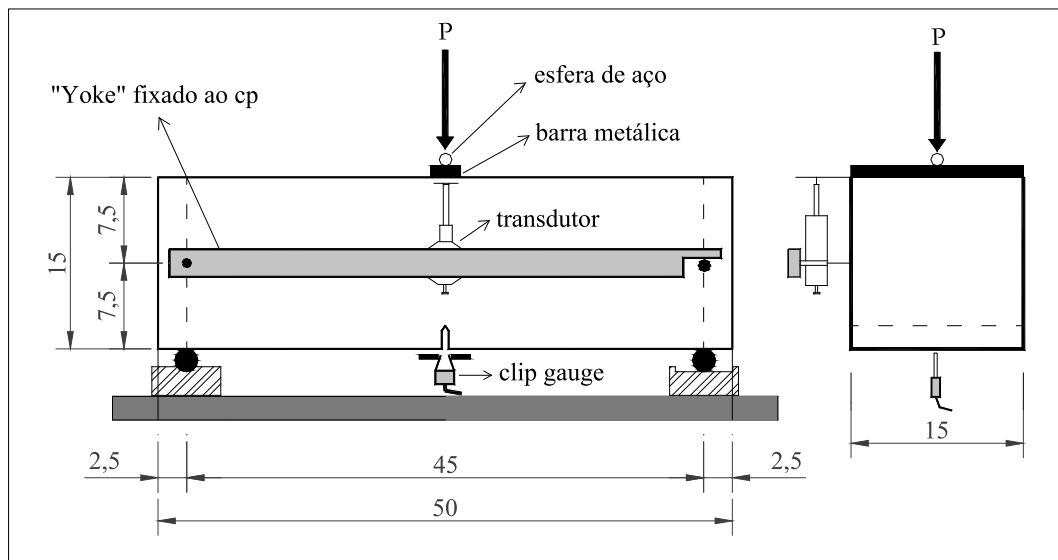
2 Programa experimental

2.1 Configuração do ensaio e instrumentação

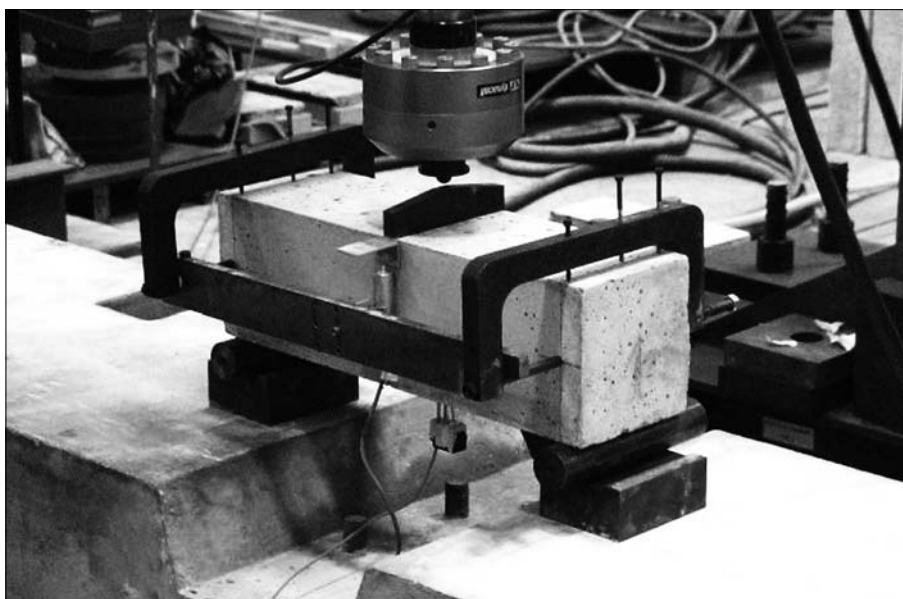
Para avaliar o comportamento à tração na flexão dos compósitos cimentícios de microconcreto foram realizados ensaios de flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos, seguindo as recomendações da Rilem (2002).

Trata-se de ensaios em corpos-de-prova dotados 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. O entalhe tem por objetivo induzir o fraturamento em um plano preferencial e elevar os níveis de sollicitação em todo o material à sua frente. Assim, durante a sollicitação 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.

Na Figura 2 é possível observar o aspecto geral da configuração dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE). 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”. 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 conduzido 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.



a) Dimensões do corpo-de-prova e instrumentação utilizada

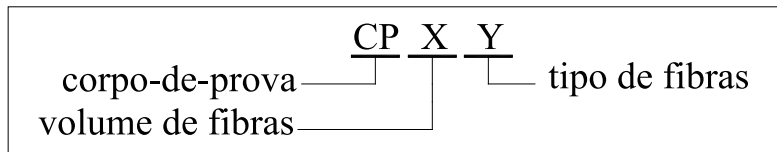


b) Detalhe do corpo-de-prova posicionado para a realização do ensaio

Figura 2: Configuração geral dos ensaios de flexão em três pontos

2.2 Programa de ensaios

Foram moldados 15 corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm, divididos em cinco grupos, formados por três prismas moldados com as mesmas características. Assim, foi formado um conjunto de 15 compósitos 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:

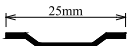
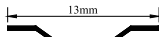


Os compósitos foram confeccionados utilizando-se um traço de microconcreto, com resistência à compressão da matriz na faixa de 50 MPa. Na Tabela 1 apresentam-se os diferentes compósitos analisados, juntamente com a descrição das características das fibras e microfibras de aço utilizadas. A fibra aqui especificada simplesmente por “A” tem nome comercial FS-8 Wirand, e foi fornecida pela empresa Maccaferri – América Latina; possui um comprimento de 25 mm, com gancho nas extremidades, e um diâmetro de 0,75 mm.

Pelas razões 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 foram aqui especificadas simplesmente por “C”.

Os compósitos híbridos foram produzidos fixando-se o volume de fibras curtas de aço em 1% e variando-se o volume de microfibras de aço.

Tabela 1: Compósitos analisados e características das fibras e microfibras de aço

Grupo	Compósitos		Taxa de fibra	Tipo de fibra	Material	Idade no ensaio
1	Mono-híbrido	CPM	0%	-	microconcreto	28 dias
2		CPM1A	1%	A	microconcreto	28 dias
3	Híbridos	CPM1A1C	1% + 1%	A + C	microconcreto	28 dias
4		CPM1A2C	1% + 2%	A + C	microconcreto	28 dias
5		CP1M2.5C	1% + 2.5%	A + C	microconcreto	28 dias
Parâmetros das fibras			Fibra A: FS-8 Wirand		Fibra C	
Formato longitudinal						
Diâmetro nominal			0,75 mm		0,75 mm	
Fator de forma			33		17	
Tensão máxima de tração			1.100 MPa		1.100 MPa	

2.3 Preparação dos compósitos

Os compósitos foram produzidos de acordo com o traço em massa de 1:2,13:1,83 (cimento, agregado miúdo e brita 0). O consumo de cimento utilizado foi de 446 kg/m^3 e a relação a/c foi de 0,48. Foi adicionado aditivo superplastificante, visando 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 betoneira elétrica de capacidade nominal de 200 litros. Os procedimentos usados na mistura foram: a) mistura da areia, brita 0 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-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm 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 nas 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 3 mostra um detalhe da mistura dos materiais.

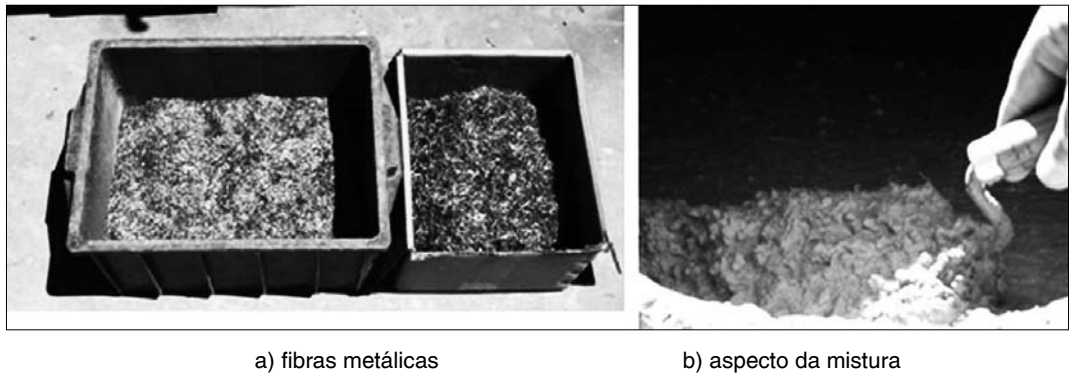


Figura 3: Detalhe da mistura dos materiais

3 Resultados e discussões

3.1 Ensaio 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 dias.

De maneira geral, verificou-se que com a adição de fibras de aço a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos compósitos diminuíram. O ACI 544.2R (1996) salienta que as fibras de aço, nos teores normalmente empregados (até 2% em volume), não acrescentam melhoras substanciais na resistência à compressão do concreto, podendo até levar a uma pequena redução nessa propriedade. A resistência à compressão do compósito CPM1A2.5C foi reduzida em até três vezes em relação à matriz sem fibras e o seu módulo de elasticidade, em até duas vezes. Este fato está relacionado à elevada quantidade de microfibras de aço presente na matriz cimentícia.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, observou-se que apenas o compósito híbrido CPM1A2C apresentou maior resistência (cerca de 35% de incremento) do que a matriz sem fibras.

Tabela 2: Resultados médios da caracterização dos compósitos à compressão

Grupo	Compósitos		f_{cm} (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	E_{cs} (MPa)
1	Mono-híbrido	CPM	62,30	3,81	35.160
2		CPM1A	42,01	3,04	30.551
3	Híbridos	CPM1A1C	40,57	3,67	26.281
4		CPM1A2C	42,76	5,14	29.974
5		CPM1A2.5C	20,82	2,82	19.900

Observações:

Para cada compósito foram ensaiados três corpos-de-prova à compressão axial e três à tração por compressão diametral.

E_{cs} — é o módulo secante de deformação correspondente à inclinação da reta secante ao diagrama tensão-deformação, passando pelos pontos correspondentes à tensão de 0,5MPa e à tensão de 30% da ruptura.

3.2 Ensaios de flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos

3.2.1 Forças e resistências

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 reforçadas com fibras de aço.

O critério de avaliação da tenacidade pela Rilem (2002) baseia-se na capacidade de absorção de energia, entendida como a área sob a curva P- δ (P é a força aplicada ao corpo-de-prova e δ é o seu deslocamento vertical). A contribuição das fibras para a tenacidade do compósito é avaliada pela subtração da parcela de tenacidade que provém da resposta da matriz cimentícia.

Na Figura 4 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 ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) e das resistências residuais em flexão ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$). Os significados dos parâmetros apresentados nessa figura são:

F_L - 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 δ de *offset*. Esse procedimento geométrico para cálculo do valor de F_L faz parte das recomendações de versões anteriores da Rilem. A versão mais atual permite tomar simplificadaamente F_L como sendo o maior valor de força registrado no intervalo de $\delta = 0,05$ mm. Aqui, com auxílio de uma ferramenta computacional denominada TENAC (Ferreira et. al., 2007), foi possível considerar o valor de F_L como sendo o de *offset*.

δ_L - é o valor de deslocamento vertical correspondente à F_L ;

$f_{fct,L}$ - é a tensão correspondente à força F_L , dado pela expressão:
$$f_{fct,L} = \frac{3.F_L.L}{2.b.h_{sp}^2};$$

L - é o vão livre do corpo-de-prova e b é a sua largura;

h_{sp} - distância do topo do entalhe até a face superior do corpo-de-prova;

$D_{BZ,2}^b$, $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ - parcelas de absorção de energia pela matriz e pelas fibras, respectivamente.

São calculadas através da área sob a curva P- δ até deslocamentos específicos (Fig. 4);

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

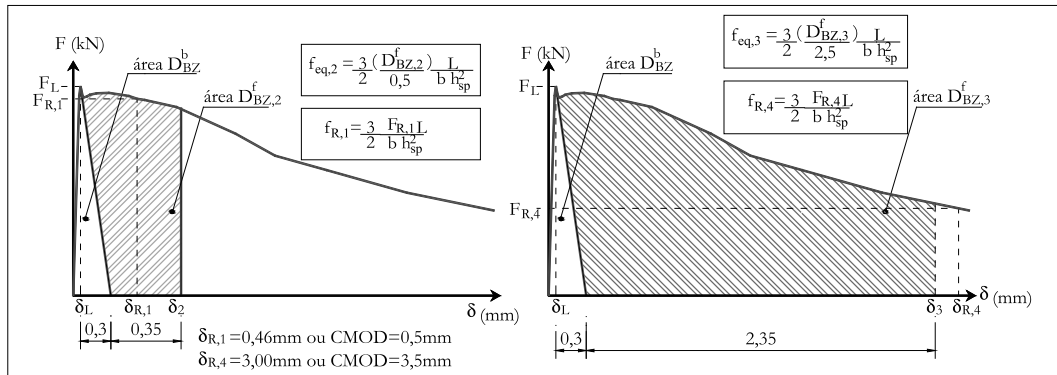


Figura 4: Critérios da Rilem para avaliação do comportamento de materiais com fibras

De acordo com a Rilem (2002), as parcelas de tenacidade ($D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$) são transformadas em resistências flexionais equivalentes ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) para os diferentes níveis de deslocamentos δ_2 e δ_3 . A capacidade de carga do material em relação a um valor pré-definido de flecha é avaliada por meio do conceito de resistências flexionais residuais ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$). Utilizando-se esses conceitos, na Tabela 3 apresentam-se os valores de forças e resistência calculados com base nas recomendações da Rilem (2002).

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 europeia, a Rilem descartou o conceito de força de primeira fissura (*first-crack strength*) e passou a adotar o valor de F_L , que é a força máxima de *offset*.

O valor de $f_{fct,L}$ 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 afirmar que nos compósitos híbridos, com exceção do CPM1A2.5C, a resistência da matriz foi incrementada com a incorporação de fibras de aço, pois a sua adição aumentou o valor do parâmetro $f_{fct,L}$.

Comparando-se os valores de forças e resistência dos compósitos híbridos CPM1A1C e CPM1A2C com o compósito mono-híbrido, nota-se que a presença da microfibras de aço foi fundamental para a elevação dos níveis de resistência nos primeiros.

Tabela 3: Forças e resistências conforme Rilem (2002)

Compósitos	Forças				Resistências				
	F_L (kN)	F_M (kN)	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,4}$ (kN)	$f_{fct,L}$ (MPa)	$f_{eq,2}$ (MPa)	$f_{eq,3}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
CPM	14,19	14,19	1,25	-	4,04	-	-	0,36	-
CPM1A	12,05	12,05	7,53	3,69	3,32	1,97	1,58	2,07	1,02
CPM1A1C	17,63	18,53	16,92	7,47	5,17	5,06	3,73	4,96	2,19
CPM1A2C	19,37	21,94	19,73	8,04	5,54	5,73	4,13	5,65	2,30
CPM1A2.5C	10,03	10,03	6,34	2,26	2,95	1,54	1,07	1,86	0,66

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, encontra-se reunido no apêndice do trabalho de Ferrari (2007). Para representar o comportamento de cada compósito selecionou-se, dentre as três curvas obtidas por grupo, a curva “média”, que é aquela de comportamento intermediário que possa ser representativo das outras duas curvas do grupo. Na Figura 5 reúnem-se as curvas “média” P-CMOD dos compósitos cimentícios de microconcreto 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. Já nos compósitos híbridos CPM1A1C e CPM1A2C, a presença das fibras proporcionou, além de um considerável aumento na capacidade de absorção de energia, uma significativa elevação dos níveis de resistência do material antes e após a ruptura da matriz. O aumento no volume de microfibras de 1% para 2% proporcionou melhora gradual na ductilidade do compósito híbrido. Já para 2,5% de microfibra de aço, a resposta do material passa a não ser mais interessante do ponto de vista da ductilidade e resistência.

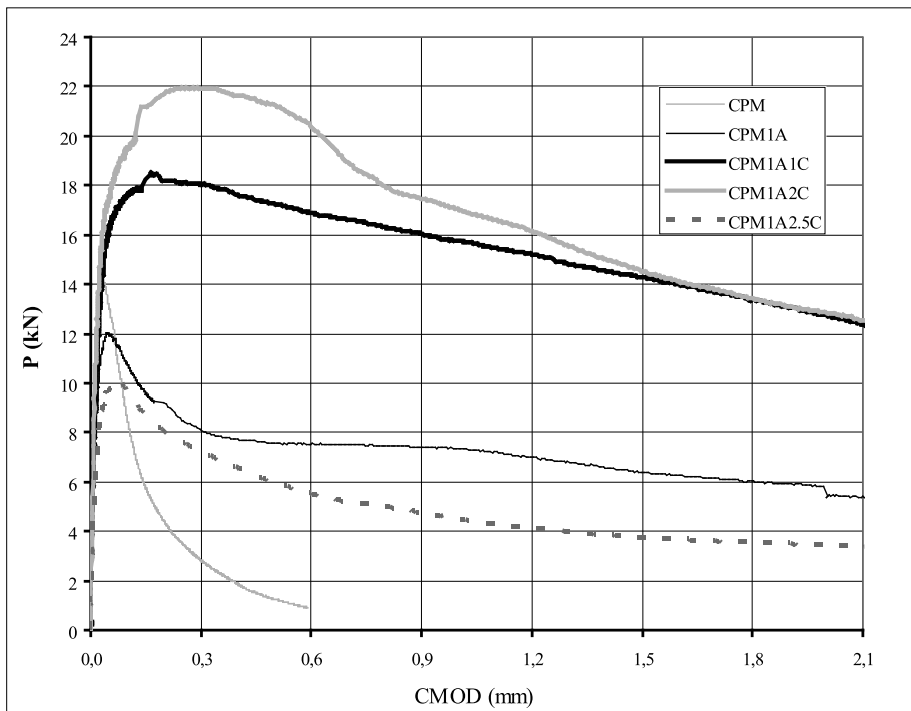


Figura 5: Curvas P-CMOD dos compósitos de microconcreto

Na Figura 6 são reapresentadas as curvas mostradas na Figura 5, agora dando ênfase ao intervalo inicial de solicitação dos compósitos, ou seja, para CMOD até 0,15 mm. Assim, pode-se melhor visualizar o efeito das microfibras na resposta do material.

Observa-se facilmente que enquanto no compósito mono-híbrido a transferência de tensões da matriz para as fibras de aço é caracterizada por decréscimo da resistência do material, nos compósitos híbridos a transferência de tensões após a fissuração da matriz é gradual e ocorre com aumento da capacidade de carga dos compósitos (CMOD e P aumentam). O processo de transferência de tensões durante a evolução da fissuração da matriz é, então, facilitado pela presença das microfibras, que, em consequência da grande quantidade dispersa na matriz, 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.

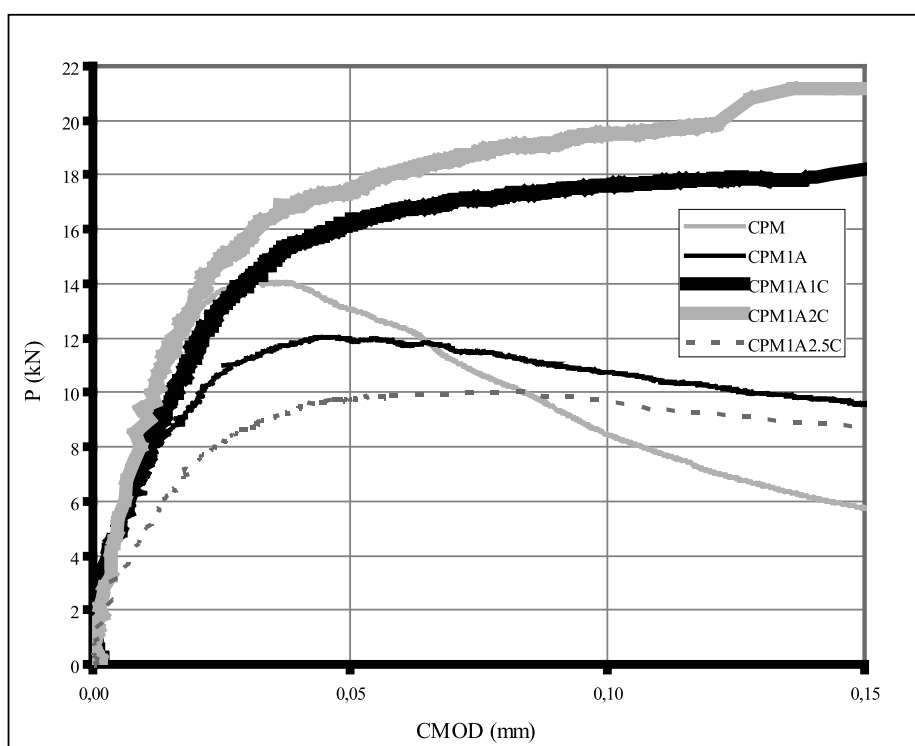


Figura 6: Comportamento P-CMOD inicial dos compósitos de microconcreto

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 (2002).

As curvas de resistência obtidas para os compósitos cimentícios são apresentadas na Figura 7. Na figura, K_R é a resistência ao fraturamento e α é a profundidade da fissura (a) normalizada relativamente à altura (W) do corpo-de-prova prismático, ou seja, $\alpha = a / W$.

Com a análise das curvas de resistência é possível tecer algumas considerações quanto ao desempenho dos compósitos cimentícios à propagação de fissuras. Com exceção do compósito CPM1A2.5C, a adição de fibras metálicas à matriz cimentícia de microconcreto aumentou a resistência ao crescimento das fissuras quando feita a comparação com o compósito sem adição de fibras (CPM).

O ganho de resistência ao fraturamento ficou bem evidenciado no regime de ruptura pós-pico nos compósitos híbridos CPM1A1C e CPM1A2C. Já no compósito monohíbrido, a resistência ao fraturamento foi superior ao da matriz sem fibras quando a fissura já se encontrava praticamente na metade da altura do corpo-de-prova.

Nota-se claramente na fase pós-pico de carregamento, que a ascensão dos trechos finais das curvas de resistência dos compósitos híbridos reflete 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 da matriz.

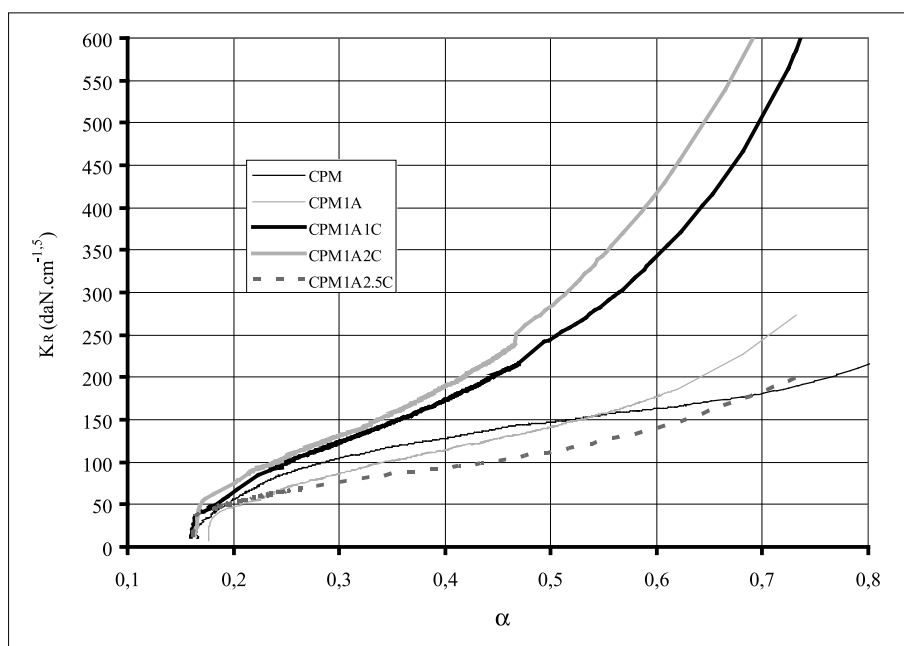


Figura 7: Curvas de Resistência para os compósitos de microconcreto

4 Conclusões

Aqui se reúne uma síntese das principais conclusões construídas ao longo do trabalho:

- 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 as 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 de microconcreto analisados, considerando-se o ganho contínuo de resistência ao fraturamento e à característica de pseudoencruamento, o compósito híbrido CPM1A2C mostrou-se o mais adequado para aplicações em regiões tracionadas de peças de concreto armado.

5 Agradecimentos

Ao LE – Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, pela disponibilização dos equipamentos; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), 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

- Bentur, A.; Mindess, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. New York, Elsevir Applied Science, 1990.
- Ferreira, L. E. T. (2002). *Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçado com fibras de aço*. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Ferreira, L. E. T.; Hanai, J. B.; Bittencourt, T. N. (2007). Computational evaluation of flexural toughness of FRC and fracture properties of plain concrete. *Materials and Structures*, em impressão.
- Ferrari, V. J. (2007). *Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido à substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Nunes, N. L.; Agopyan, V. (1998). *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.
- Rilem TC 162-TDF. (2002). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*. Materials and Structures, v. 35, p. 579-582.
- American Concrete Institute. (1996). *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*. ACI 544.2R, Detroit.

Anexo

Microconcrete hybrid cementitious composites

Abstract

Steel short fibers and steel microfibers were used in a microconcrete 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 results were analysed considering the flexional toughness and fracture toughness parameters. The hybridization process have shown to have a satisfactory behavior translated for a strain hardening.

Key words: Cementitious composites. Hybridization. Flexional toughness. Fracture toughness.

1 Introduction

The effect of the steel fibers (in maximum 2%) in the cementitious matrix restricts only the phase after loading maximum. According to Ferreira (2002), in these conditions, the steel fibers are not enough to inhibit the process of cracking of the matrix that precedes the maximum load (sub critical growth of the crack).

The hybrid combination of regular steel fibers and steel microfibers was attempted to explore the mechanical and cracking characteristics of microconcrete.

2 Experimental program

Specimens with span $L = 450$ mm, width $b = 150$ mm, depth $h = 150$ mm and initial notch depth $a_0 = 25$ mm were tested in three-point bend configuration under CMOD control in a servo-hydraulic INSTRON equipment. Three replicate specimens were tested for each fiber combination. A total of fifteen different mixes with single and hybrid fiber composites were prepared. Details of the composites are provided in Table 1. Two different types of steel fibers were used in combination. The regular fibers A and microfibers C had a length of 25 mm and 13 mm, respectively, and diameter of the 0,75 mm.

Table 1: Composites analysed e characteristics fibers and microfibers

Group	Composites		Taxa de fibra	Type of fibers	Material	Age
1	Mono hybrid	CPM	0%	-	microconcrete	28 dias
2		CPM1A	1%	A	microconcrete	28 dias
3	Hybrid	CPM1A1C	1% + 1%	A + C	microconcrete	28 dias
4		CPM1A2C	1% + 2%	A + C	microconcrete	28 dias
5		CP1M2.5C	1% + 2.5%	A + C	microconcrete	28 dias

3 Results and discussions

3.1 Load-CMOD response and evaluation of toughness fracture of hybrid fiber composites – R-curves

Figure 1 depicts the load-CMOD responses of microconcrete composites reinforced with steel fibers. The results show that a hybrid composite presenting a reasonably high magnitude of flexural strength can be achieved.

Since fibers start to work after cracking of the matrix, where the material's response is no longer linear, an alternative way of measuring the enhancement in fracture resistance due to the addition of fibers is through the use R-Curve concept.

The R-curves for various mixes have been determined according to an effective approach based on linear elastic fracture mechanics, as suggested by Ferreira (2002). These curves are shown in Figure 2, where $\alpha = a/h$.

For microconcrete matrix, the figures show that K_r values increases fast in the pre-peak regimen and smoothly in the first part of the pos-peak, as expected for relatively brittle materials. However, for larger values of α , the curves of matrix presented ascending behavior due to the influence of the cohesive interface.

The addition of regular steel fibers in the microconcrete matrix promoted a gradual increase on fracture resistance. However, the combination of steel microfibers with regular steel fibers promoted a much more accentuated increase in the fracture resistance of composites.

For the hybrid composites CPM1A1C and CPM1A2C, it is possible to observe that fracture resistance grows accentuatedly, evidencing the energy dissipation that accompanies fiber debonding and pull-out, though reflecting the contribution of fibers to the fracture resistance of the composites.

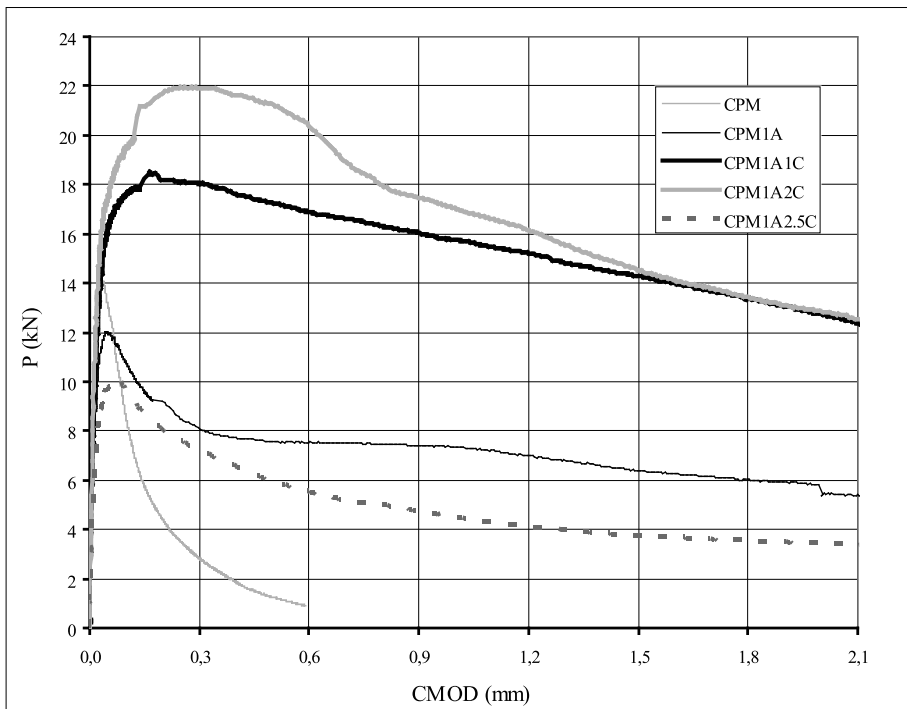


Figure 1: Load – CMOD response of single and hybrid fiber microconcrete composites

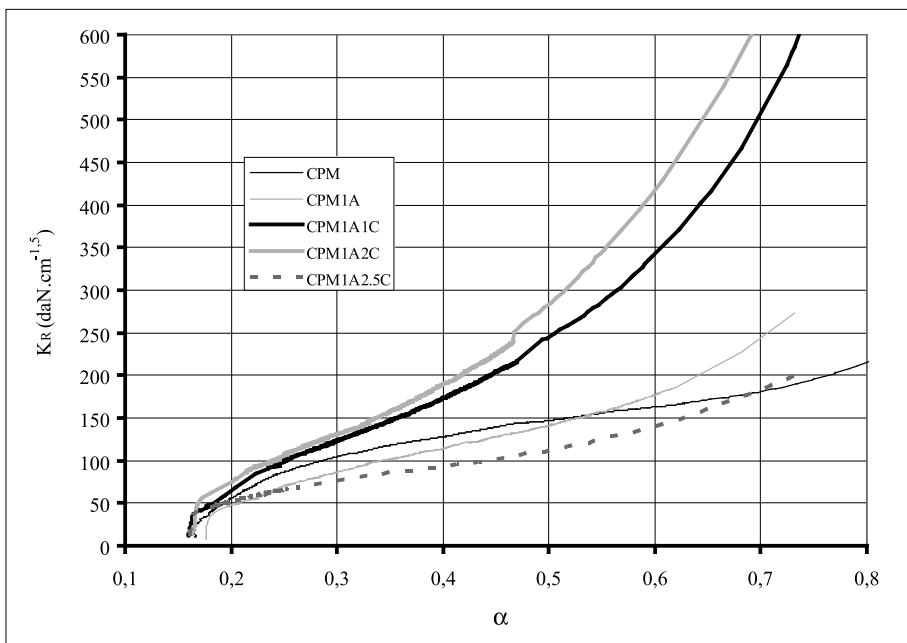


Figure 2: Single and hybrid fiber microconcrete (R-curves)

4 Conclusions

The results of an experimental investigation on the strain-hardening behavior of hybrid steel fiber reinforcement cementitious composites under three-point bending have been presented. The volume ratio of hybrid regular steel fiber and steel microfiber were investigated and some conclusion can be drawn from this study.

Strain-hardening behavior was achieved in CPM1A1C and CPM1A2C hybrid fiber composites. The test results indicated that through the combination of steel microfibers and regular steel fibers, it is possible to obtain microconcrete cementitious composites with significant enhanced strength and improved fracture toughness.

5 References

FERREIRA, L. E. T. Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçado com fibras de aço, 2002, Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 266 p.