Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835

Revista da Asociação Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia y Recuperação da Construção

Compósitos cimentícios de alto desempenho para aplicação como substrato de transição em vigas

V. J. Ferrari[1], A. P. Arquez[2], J. B. De Hanai[2]

[1]Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil.
[2]Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

Información del artículo
DOI:
http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.115
Artículo recibido el 22 de septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal
Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893 , alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO
Neste estudo apresenta-se o desenvolvimento e a análise do comportamento de compósitos cimentícios de elevado desempenho reforçados com fibras. O material descrito foi especificamente desenvolvido para aplicação como um substrato de transição, ou seja, camada de reparo que forma o banzo tracionado de vigas de concreto reforçadas à flexão com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Dezenove diferentes compósitos foram produzidos pelo processo de hibridização. Variou-se o volume de fibras curtas e de microfibras de aço. Para analisar o comportamento do material à flexão, ensaios em três pontos em prismas entalhados foram realizados. A resposta do material foi analisada considerando-se parâmetros de tenacidade (flexional e ao fraturamento). Ficou evidenciado o elevado desempenho dos compósitos através de comportamento de pseudo-encruamento.
Palavras-chave: compósitos cimentícios; vigas de concreto; substrato de transição.

ABSTRACT
This study presents the development and analysis of the behavior of high performance cementitious compounds reinforced with fibers. The material described was specifically developed for its application as a transition substrate, meaning, a repair layer that forms the tensed span of the flexion reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymers (CFRP). Nineteen different compounds were produced by the hybridization process. The volume of the short fibers and of the steel microfibers varied. To analyze the behavior of the flexural material, tests were done in three points in tests tubes with their notches. The response of the material was analyzed considering the tenacity parameters (to flexion and fracture). The high performance of the compounds through the behavior of pseudo-hardening was confirmed.
Keywords: cementitious compounds; concrete beams; transition substrate.

RESUMEN
Este estudio muestra el desarrollo y análisis del comportamiento de los materiales compuestos de cemento reforzado con fibras de alto rendimiento. El material descrito se desarrolló específicamente para su aplicación como sustrato de transición, o capa de reparación de la formación de la brida tensada vigas de hormigón reforzado con polímeros de flexión reforzado con fibras de carbono (PRFC). Diecinueve compuestos diferentes fueron producidos por el proceso de hibridación. Se varió la cantidad de fibras cortas y microfibras de acero. Para analizar el comportamiento de los ensayos de flexión en tres puntos materiales prismas se realizaron Jagged. La respuesta del material se analizó teniendo en cuenta parámetros de tenacidad a la flexión y (fractura). Materiales compuestos de alto rendimiento evidencia a través de un comportamiento pseudo- endurecimiento.
Palabras clave: compuestos cementíceos; vigas de concreto; sustrato de transición.

Autor a contactar: Vladimir Ferrarí (vladimirjf@hotmail.com)

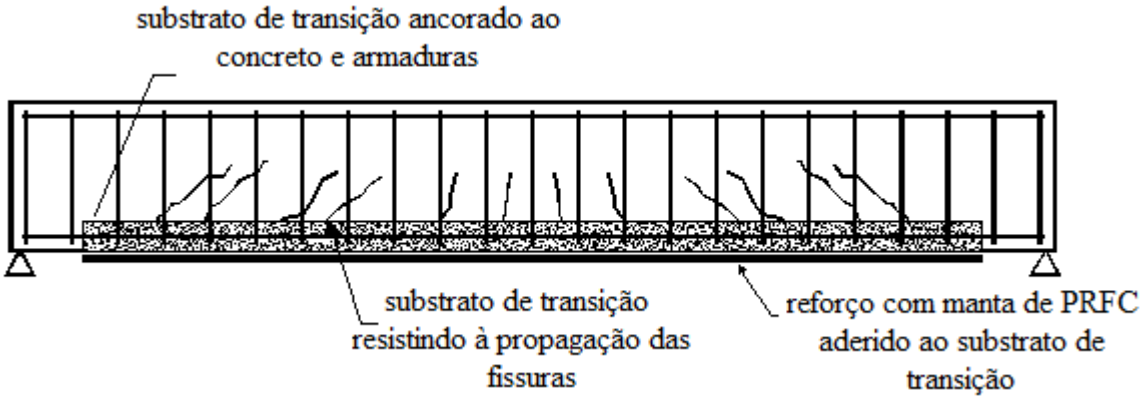
1. INTRODUÇÃO

De acordo com Ferreira (2012), as modificações resultantes da adição de fibras de aço ao concreto, em taxas relativamente baixas (máximo de 2%), são restritas a fase de pós-pico do histórico de carregamento. Em tais condições, as fibras de aço não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que ocorre antes da aplicação do carregamento máximo (crescimento subcrítico da fissura).

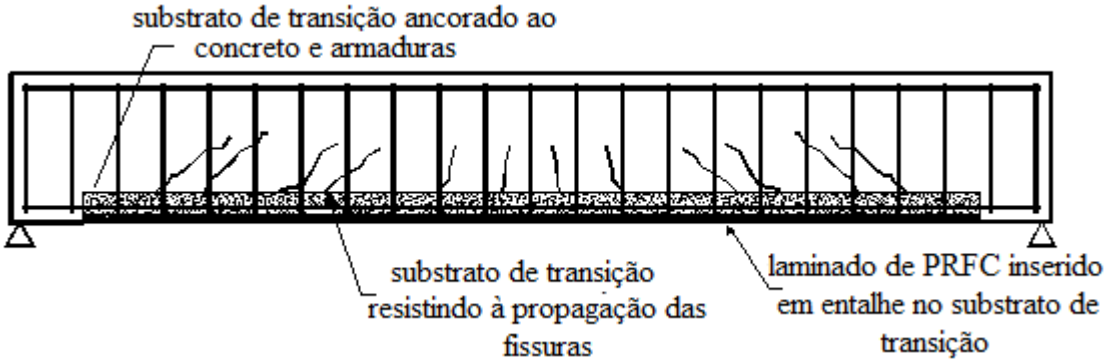
O efeito da incoporação de microfibras de aço às fibras curtas é aqui estudado numa tentativa de melhorar o comportamento dos compósitos cimentícios na fase pré-pico do histórico de carregamento.

Esses materiais foram especificamente desenvolvidos para aplicação como um substrato de transição (Figura 1). Dezenove diferentes compósitos foram preparados em dois estágios: Estágio I (compósitos foram desenvolvidos para aplicação como um substrato de transição de vigas de concreto armado reforçadas pela colagem externa de mantas de PRFC – Figura 1.a) e Estágio II (compósitos foram desenvolvidos para aplicação como substrato de transição de vigas reforçadas pela inserção de lâminas de PRFC em entalhes executados nesse substrato – Figura 1.b).

Na prática de engenharia, é comum encontrar vigas de concreto armado com o banzo inferior tracionado deteriorado por ações mecânicas, efeitos de corrosão da armadura ou fissuração. Em tais casos, o processo de reforço da viga deve ser precedido pelo de recuperação do banzo. Para essa finalidade, Ferrari (2012) então, propôs o desenvolvimento de um compósito de elevado desempenho a base de cimento destinado a formar o substrato de transição como indicado na Figura 1. O conceito do substrato de transição é criar um novo banzo tracionado formado pelo compósito cimentício com características mais apropriadas à aderência do reforço polimérico.



a) reforço externo com manta de PRFC aderido ao substrato de transição (Ferrari, 2012)



b) laminado de PRFC inserido em entalhe no substrato de transição (Arquez, 2010)

Figura 1. Substrato de transição de viga de concreto armado reforçada com PRFC

No presente estudo, novos resultados foram adicionados aos já apresentados em Ferrari (2012). Os novos resultados foram obtidos através do desenvolvimento e da análise de compósitos cimentícios para formar o substrato de transição de vigas reforçadas através da inserção de lâminas de PRFC em entalhes nesse novo substrato.

2. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADO DESEMPENHO

Para avaliar a resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios, foram realizados ensaios em três pontos em corpos de prova prismáticos (150mm x 150mm x 500mm) dotados de um entalhe central reto passante seguindo-se as recomendações da Rilem (2002). A Figura 2 mostra a configuração geral do ensaio que foi conduzido controlando-se o deslocamento da abertura da fissura na entrada do entalhe (CMOD – *crack mouth opening displacement*).

No Estágio I, treze compósitos foram analisados como mostrado na Tabela 1. Os compósitos foram constituídos por diferentes volumes e tipos de fibras de aço e, também por diferentes tipos de matriz cimentícia (argamassa e microconcreto). Os compósitos foram divididos em gupos, sendo cada grupo formado por três corpos de prova prismáticos com as mesmas características. No Estágio II, um grupo adicional formado por seis compósitos (todos eles feitos de microconcreto) foram analisados.

A fibra de aço especificada por "A" tem comprimento de 25 mm e um diâmetro de 0,75 mm. A fibra do tipo "C", produzida especificamente para essa pesquisa, tem 13 mm de comprimento e um diâmetro de 0,75 mm. Essa fibra tem sido designada por microfibra de aço (Figura 3).

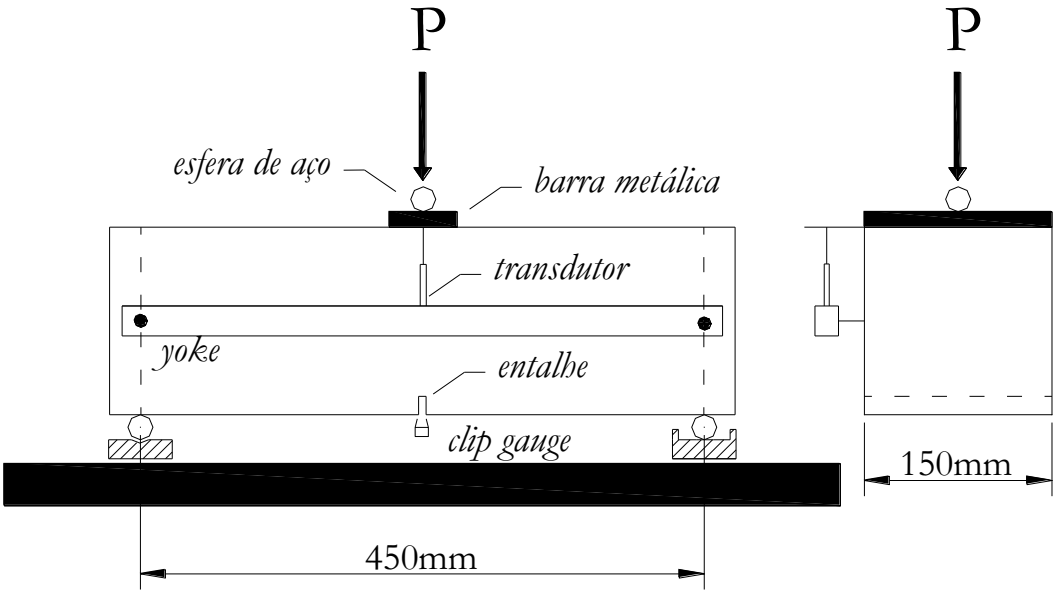
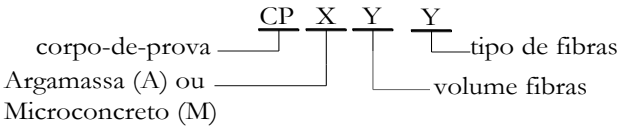


Figura 2. Configuração geral do ensaio

Tabela 1. Compósitos analisados

Matriz	Estágio	Grupo	Compósitos	Volume fibras	Tipo fibras	Material	Idade (dias)
Argamassa (A)	I	1	CPA	0%	-	Argamassa	29
		2	CPA1A	1%	A	Argamassa	29
		3	CPA1.5A	1.5%	A	Argamassa	29
		4	CPA2A	2%	A	Argamassa	29
		5	CPA1.5A0.5C	1.5%+0,5%	A+C	Argamassa	28
		6	CPA1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	Argamassa	28
		7	CPA1.5A2.5C	1,5%+2.5%	A+C	Argamassa	28
		8	CPA1.5A3.5C	1.5%+3.5%	A+C	Argamassa	28
Microconcreto (M)	I	9	CPM	0%	-	microconcreto	28
		10	CPM1A	1%	A	microconcreto	28
		11	CPM1A1C	1%+1%	A+C	microconcreto	28
		12	CPM1A2C	1%+2%	A+C	microconcreto	28
		13	CPM1A2.5C	1%+2.5%	A+C	microconcreto	28
Microconcreto (M)	II	1	CPM1A1C	1%+1%	A+C	microconcreto	50
		2	CPM1A1.5C	1%+1.5%	A+C	microconcreto	50
		3	CPM1A2C	1%+2%	A+C	microconcreto	50
		4	CPM1.5A1C	1,5%+1%	A+C	microconcreto	50
		5	CPM1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	microconcreto	50
		6	CPM1.5A2C	1.5%+2%	A+C	microconcreto	50



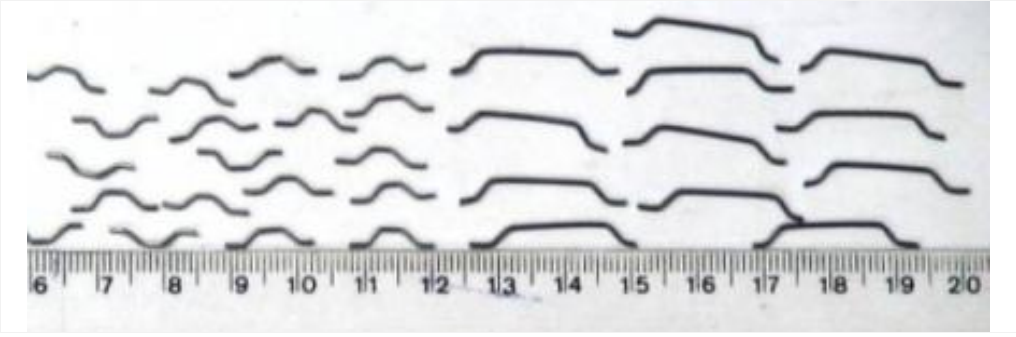


Figura 3. Microfibras de aço (esquerda) e fibras convencionais de aço (direita)

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos

Os valores das propriedades mecânicas dos compósitos estão apresentados na Tabela 2: resistência média à compressão (f_{cm}), resistência média à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) e o módulo de elasticidade (E_{cs}).

Tabela 2. Resultados médios da caracterização dos compósitos sobre compressão

Matriz	Estágio	Grupo	Compósitos	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm,\ sp}$ (MPa)	E_{cs} (GPa)
Argamassa (A)	I	1	CPA	52,5	3,1	23,8
		2	CPA1A	43,8	3,7	22,7
		3	CPA1.5A	42,2	3,7	23,1
		4	CPA2A	45,7	4,9	24,0
		5	CPA1.5A0.5C	49,2	4,4	28,2
		6	CPA1.5A1.5C	47,2	4,9	32,3
		7	CPA1.5A2.5C	43,6	4,8	31,0
		8	CPA1.5A3.5C	42,8	4,9	29,1
Microconcreto (M)	I	9	CPM	62,3	3,8	35,2
		10	CPM1A	42,0	3,0	30,6
		11	CPM1A1C	40,6	3,7	26,3
		12	CPM1A2C	42,8	5,1	30,0
		13	CPM1A2.5C	20,8	2,8	19,9
	II	1	CPM1A1C	33,2	2,5	32,3
		2	CPM1A1.5C	30,6	2,2	31,0
		3	CPM1A2C	33,4	3,2	32,4
		4	CPM1.5A1C	28,3	2,6	29,8
		5	CPM1.5A1.5C	30,5	2,9	31,0
		6	CPM1.5A2C	29,2	2,4	30,2

3.2. Ensaios de flexão – cargas e resistências

A tenacidade flexional dos compósitos foi determinada seguindo-se as recomendações da Rilem (2002) e os resultados são indicados na Tabela 3. O critério para avaliação da tenacidade é baseado na capacidade de absorção de energia, entendida como sendo a área sobre a curva carga (P) *versus* deslocamento vertical (δ).

Segundo a Rilem, a contribuição das fibras para a tenacidade do compósito é avaliada através da 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 δ=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*;
- δ_L – é o valor de deslocamento vertical correspondente a 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 prismático e b é 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 4);
- $F_{R,1}$ e $F_{R,4}$ – valores de força correspondentes aos deslocamentos δ_{R1}=0,46 mm e δ_{R4}=3,00 mm. São valores utilizados para cálculo das resistências residuais dos compósitos.

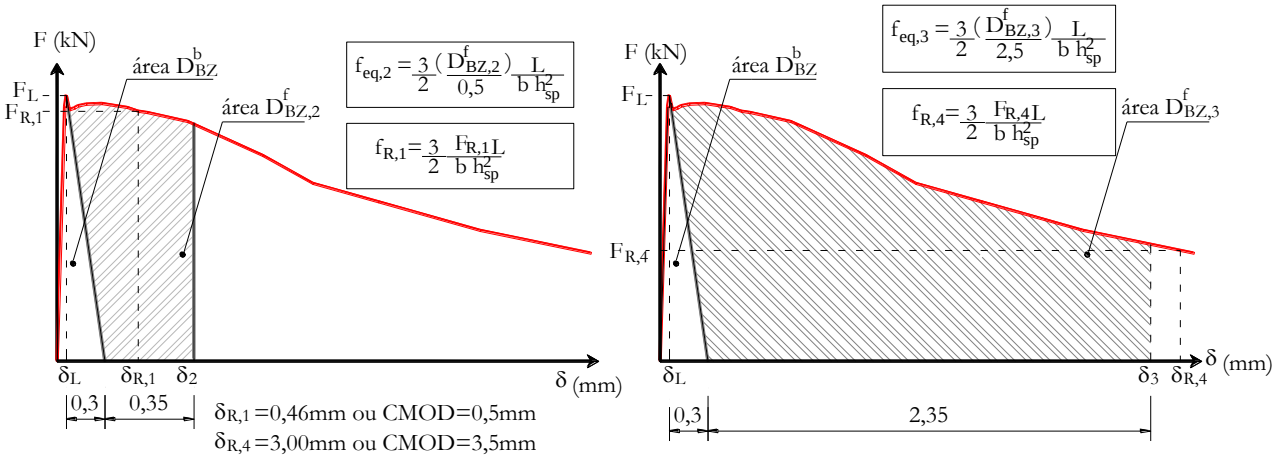


Figura 4 – Critérios da Rilem (2002) para avaliação do comportamento de materiais com fibras

Ainda de acordo com a Rilem (2002), as parcelas de tenacidade ($D^f_{BZ,2}$ e $D^f_{BZ,3}$) 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 através do conceito de resistências flexionais residuais ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$).
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.

Tabela 3. Cargas e resistências

Matriz	Estágio	Compósitos	Cargas (kN)				Resistências (MPa)				
			F_L	F_M	$F_{R,1}$	$F_{R,4}$	$f_{fct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,4}$
Argamassa (M)	I	CPA	8,0	8,0	1,3	-	2,3	-	-	0,4	-
		CPA1A	13,	13,4	12,5	5,2	3,9	3,3	2,6	3,6	1,5
		CPA1.5A	13,	16,1	16,0	6,1	3,7	4,6	3,2	4,5	1,7
		CPA2A	14,	17,6	17,4	7,6	4,6	5,5	4,2	5,5	2,4
		CPA1.5A0.5	16,	17,8	17,2	9,3	4,6	4,9	4,0	4,8	2,6
		CPA1.5A1.5	16,	21,0	20,9	9,4	4,8	6,5	4,8	6,3	2,8
		CPA1.5A2.5	22,	23,7	23,5	12,8	6,1	6,5	5,0	6,5	3,6
		CPA1.5A3.5	20,	21,4	20,8	6,1	5,5	5,7	3,8	5,7	1,7
Microconcreto (M)	I	CPM	14,	14,2	1,3	-	4,0	-	-	0,4	-
		CPM1A	12,	12,1	7,5	3,7	3,3	2,0	1,6	2,1	1,0
		CPM1A1C	17,	18,5	16,9	7,5	5,2	5,1	3,7	5,0	2,2
		CPM1A2C	19,	21,9	19,7	8,0	5,5	5,7	4,1	5,7	2,3
		CPM1A2.5C	10,	10,0	6,3	2,3	2,9	1,5	1,1	1,9	0,7
	II	CPM1A1C	12,	14,3	11,4	1,0	3,6	3,5	2,4	3,4	0,3
		CPM1A1.5C	12,	15,2	12,1	2,7	3,5	3,8	2,5	3,6	0,8
		CPM1A2C	14,	18,9	15,9	1,8	4,1	4,9	3,0	4,5	0,5
		CPM1.5A1C	12,	18,5	16,0	2,4	3,7	5,0	2,4	4,6	0,7
		CPM1.5A1.5	15,	19,8	17,5	1,3	4,3	5,3	3,6	5,0	0,4
		CPM1.5A2C	11,	15,6	13,4	3,2	3,2	4,4	2,9	4,0	1,0

Fica evidenciado que a adição de fibras de aço contribuiu significativamente para o aumento da resistência definida pelo parâmetro ($f_{fct,L}$) que representa a parcela de resistência do compósito proveniente da contribuição da matriz cimentícia.

Ainda é possível afirmar que a adição de microfibras às fibras de aço resultou numa melhora ainda mais significativa nessa propriedade para os compósitos de argamassa em relação aos de microconcreto.

O desempenho dos compósitos de argamassa proveniente da parcela de contribuição das fibras ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) foi melhorado com o aumento do volume da fibra A e potencializado quando da adição das microfibras de aço.

Para os compósitos de microconcreto é evidente a elevação dos níveis das resistências flexionais equivalentes ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) por meio da adição das microfibras de aço à fibra A. Em grande parte desses compósitos, a resistência ($f_{eq,2}$) supera o valor da resistência ($f_{fct,L}$), denotando ganhos significativos de resistência após a fissuração da matriz.

3.3. Curvas P-CMOD

As curvas P-CMOD dos compósitos de argamassa são apresentados na Figura 5. A presença de fibras e microfibras de aço na matriz cimentícia de argamassa 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 fissuração da matriz.

O aumento no volume de fibras do tipo "A", proporcionou melhora gradual na ductilidade dos compósitos de argamassa. Sobremaneira, a incorporação das microfibras de aço às fibras "A", contribuiu ainda mais nesse sentido.

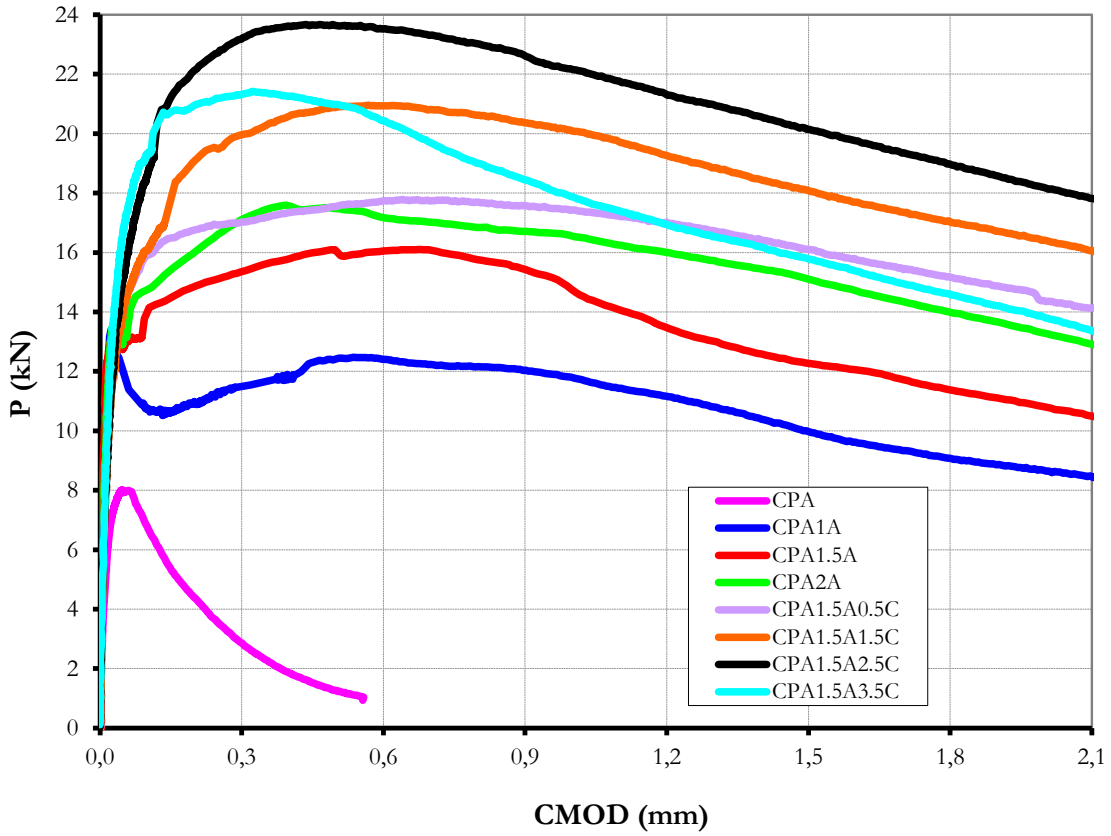


Figura 5. Curvas P-CMOD dos compósitos de argamassa

As curvas dos compósitos de microconcreto são apresentadas na Figura 6. A presença de fibras e microfibras melhorou principalmente a capacidade de absorção de energia desses compósitos. A capacidade resistente foi diminuída com a presença isolada da fibra A (compósito CPM1A).

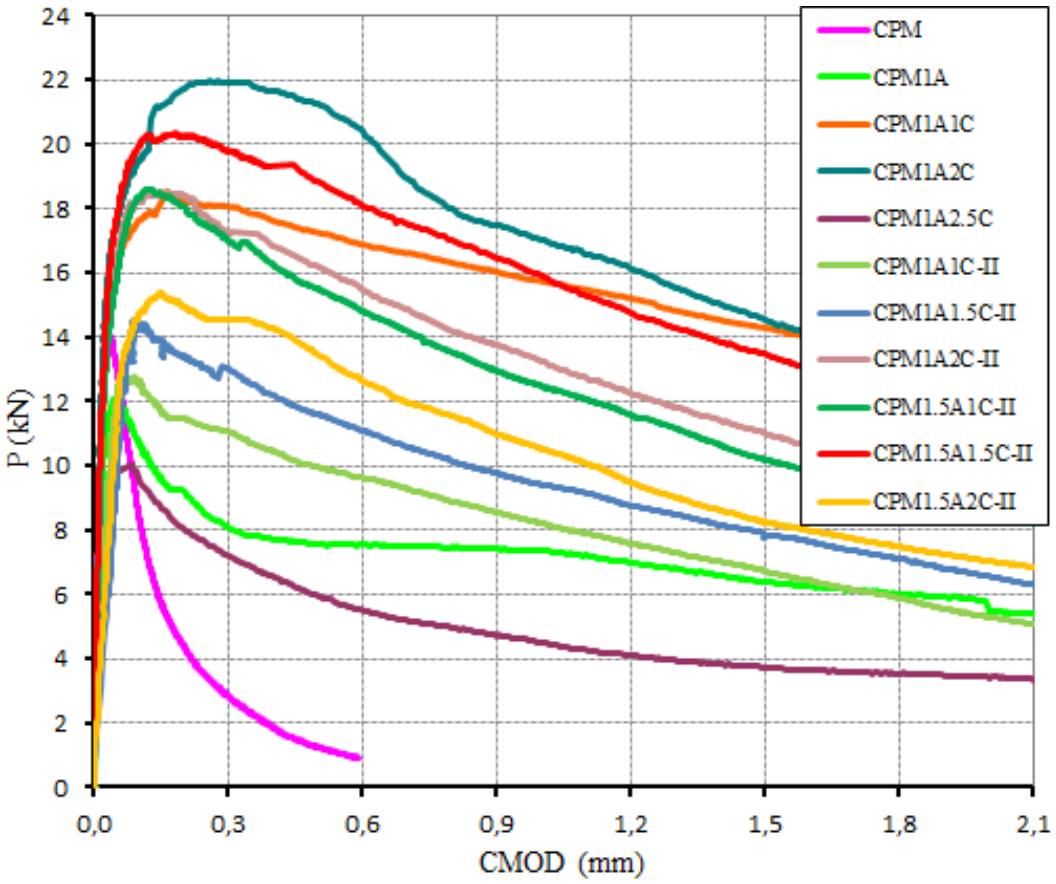


Figura 6. Curvas P-CMOD dos compósitos de microconcreto

3.4. Curvas de resistência ao fraturamento

Na Figura 7 mostram-se as curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de argamassa. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as curvas de resistência dos compósitos de microconcreto produzidos nos estágios I e II, respectivamente. Onde "K_R" representa a resistência ao avanço da fissura (resistência ao fraturamento do compósito) e "α" é a profundidade da fissura (a) normalizada relativamente à altura (W) do corpo de prova pristático, ou seja, $\alpha = a/W$.

O ganho de resistência ao fraturamento ficou bem evidenciado principalmente no regime de ruptura pós-pico (força máxima), aumentando-se entre os diferentes compósitos com o aumento do teor de fibras metálicas incorporadas a cada um deles. Exceções para os compósitos CPA1.5A3.5C e CPM1A2.5C em que suas resistências ao fraturamento ao longo do histórico de carregamento foram inferiores às dos compósitos CPA1.5A2.5C e CPM1A2C, respectivamente.

Também é possível notar que na fase de pós-pico de carregamento, os trechos finais das curvas de resistência para os compósitos de argamassa (CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C) e de microconcreto (CPM1A1C e CPM1A2C) são ascendentes, o que representa o elevado ganho de resistência à propagação da fissura proporcionado pela presença das fibras e microfibras de aço. Tal fato está associado à dissipação de energia envolvida no processo de arrancamento das fibras e microfibras da matriz cimentícia.

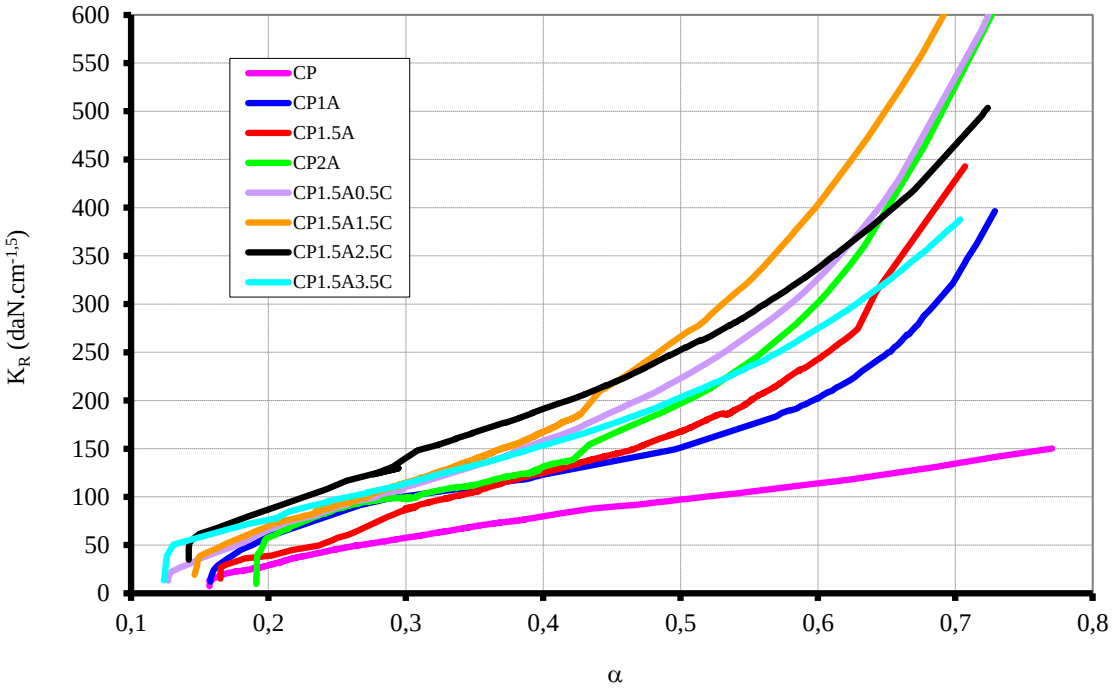


Figura 7. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de argamassa

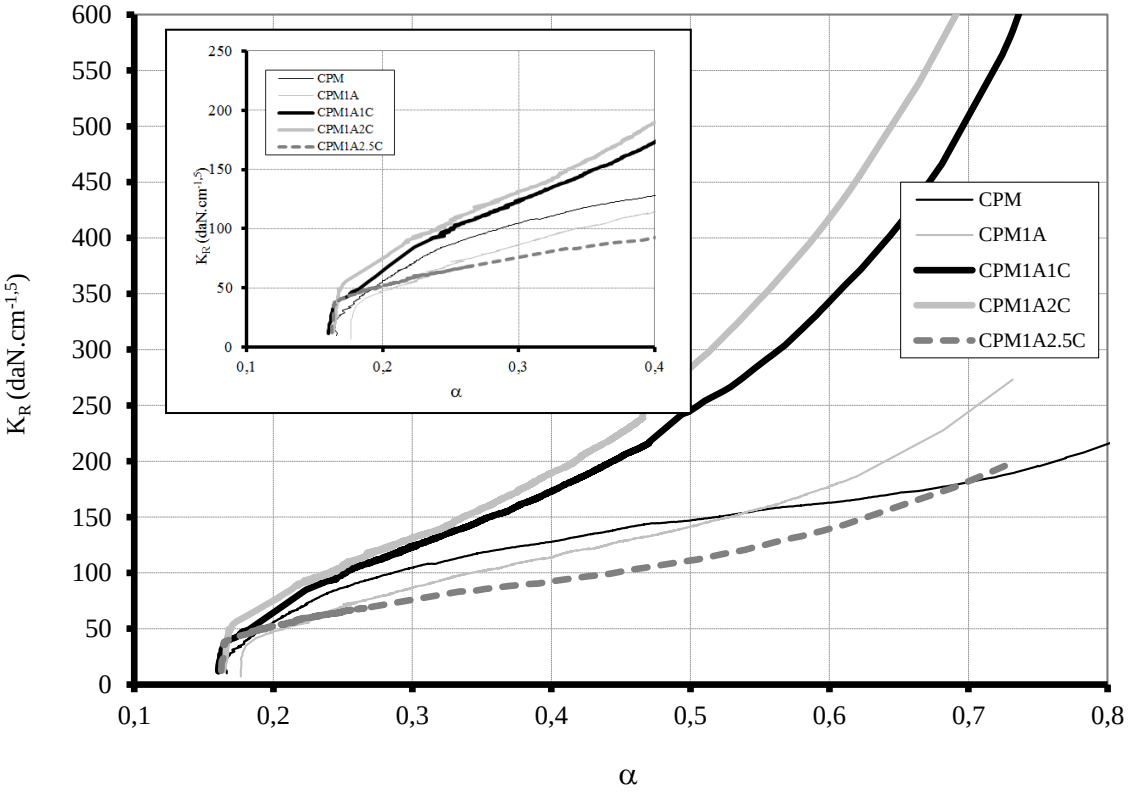


Figura 8. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de microconcreto – Estágio I

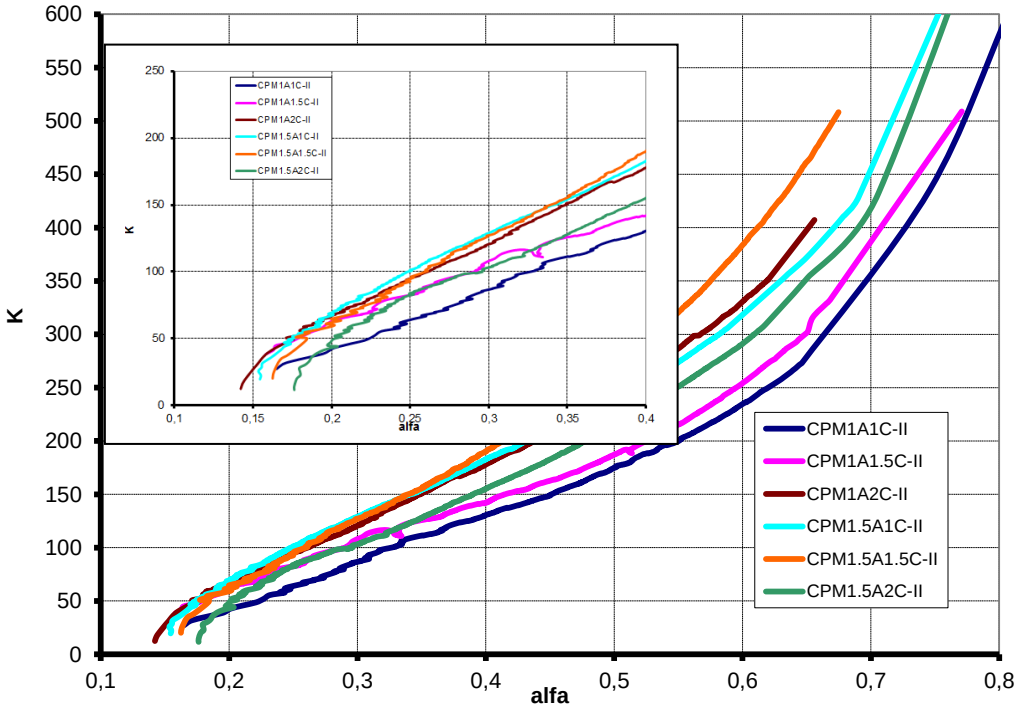


Figura 9. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de microconcreto – Estágio II

4. CONCLUSÕES

Da pesquisa que foi conduzida, as seguintes observações podem ser estabelecidas:

1. O processo de hibridização é uma alternativa interessante para aplicação na recuperação do banzo tracionado de vigas de concreto, uma vez que, a adição de microfibras de aço às fibras curtas de aço aumenta a resistência à tração na flexão e aumentam a tenacidade flexional dos compósitos de argamassa e de microconcreto;
2. Com a fissuração da matriz a transferência de tensões foi facilitada pelas microfibras que, uma vez dispersas na matriz, condicionaram a propagação da fissura a um aumento do nível de carregamento do compósito;
3. Considerando-se as características de pseudo-encruamento e a sua aplicação específica, o compósito CPM1A2C foi o que apresentou as melhores propriedades entre os produzidos no estágio I;
4. Entre os compósitos produzidos no estágio II, destaca-se o CPM1.5A1.5C-II que, através da hibridização resultou em aumentos consideráveis na carga máxima como também na resistência ao fraturamento e a flexão.

5. REFERÊNCIAS

Ferreira, L. E. T.; Bittencourt, T. N.; Souza, J. L. A. O.; Gettu, R. (2012), "*R-Curve behavior in notched beam tests of rocks"*, Engineering Fracture Mechanics, N. 32, pp 27-40.

Ferrari, V. J.; Hanai, J. B. (2012), "*Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite",* Ibracon Structures and Materials Journal, Vol. 5, N. 5, pp 596-626.

Arquez, A. P. (2010), Dissertação mestrado, "*Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado*", Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Rilem TC 162-TDF (2002). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test,* Materials and Structures, Vol. 35, pp 579-582.