



Compuestos cementíceos de alto desempeño para su aplicación como sustrato de transición en vigas

V. J. Ferrari¹, A. P. Arquez², J. B. De Hanai²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil.

²Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao 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 02 de enero de 2016. 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, 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.

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.

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.

RESUMO

Neste estudo apresenta-se o desenvolvimento e a análise do comportamento de compuestos cementíceos de elevado desempeño reforzados com fibras. O material descrito foi especificamente desenvolvido para aplicação como um sustrato de transição, ou seja, camada de reparo que forma o banzo traccionado de vigas de concreto reforçadas à flexão com polímeros reforzados com fibras de carbono (PRFC). Dezenove diferentes compuestos foram produzidos pelo processo de hibridação. 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 desempeño dos compuestos através de comportamento de pseudo-encruamento.

Palavras-chave: compuestos cementíceos; vigas de concreto; sustrato de transición.

Autor de contacto: Vladimir Ferrari (vladimirjf@hotmail.com)

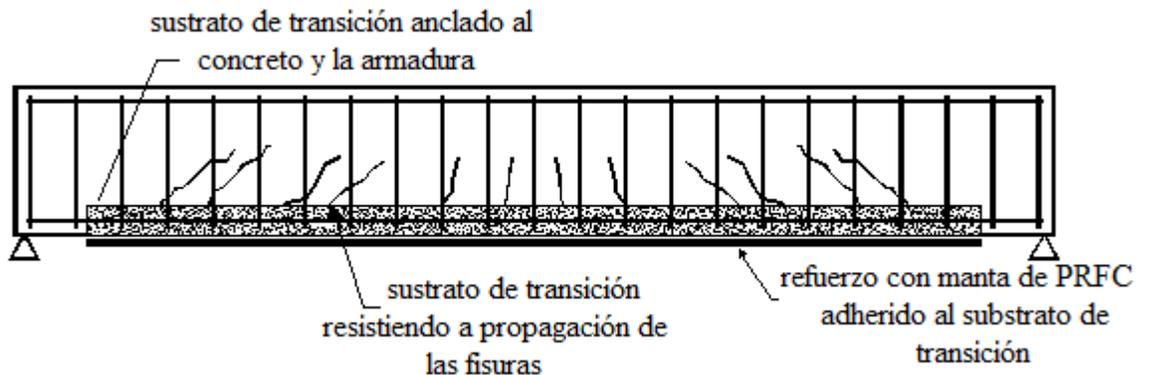
1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Ferreira (2012), las modificaciones resultantes de la adición de fibras de acero al concreto, en porciones relativamente bajas (máximo de 2%), son restringidas a la fase posterior al pico histórico de carga. En esas condiciones, las fibras de acero no son suficientes para inhibir el proceso de fisuración de la matriz que ocurre antes de la aplicación de la carga máxima (crecimiento sub-crítico de la fisura).

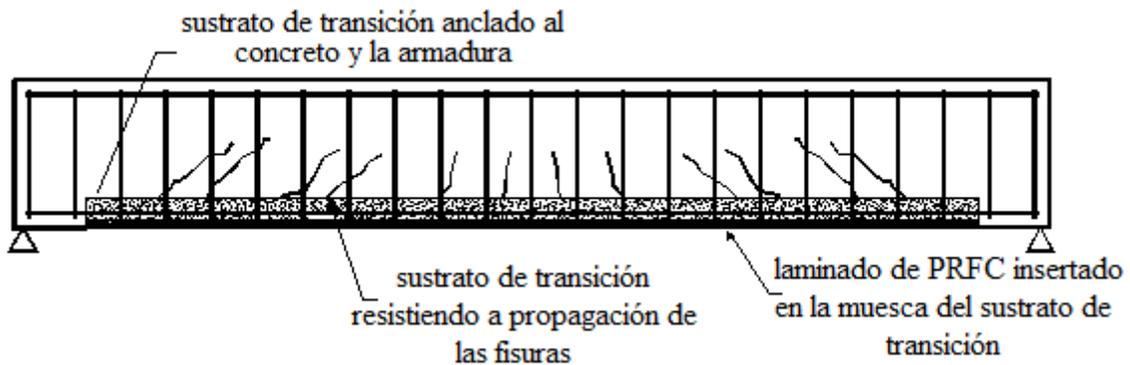
El efecto de la incorporación de microfibras de acero, las fibras cortas aquí estudiadas son un intento por mejorar el comportamiento de los compuestos cementíceos en la fase pre-pico del histórico de carga.

Esos materiales fueron específicamente desarrollados para ser aplicados como un sustrato de transición (Figura 1). Diecinueve diferentes compuestos fueron preparados en dos fases: Fase I (compuestos que fueron desarrollados para aplicación como un sustrato de transición de vigas de concreto armado reforzadas por la colocación externa de mantas de PRFC – Figura 1.a) y Fase II (compuestos desarrollados para su aplicación como sustrato de transición de vigas reforzadas por la inserción de láminas de PRFC en las muescas ejecutadas en ese sustrato – Figura 1.b).

En la práctica de la ingeniería es común encontrar vigas de concreto armado con la cara inferior traccionada deteriorada por acciones mecánicas, efectos de corrosión de la armadura o fisuración. En tales casos, el proceso de refuerzo de la viga debe ser precedido por el de la recuperación de la cara. Para ese fin, Ferrari (2012) propone producir un compuesto de elevado desempeño a base de cemento destinado a formar el sustrato de transición como el indicado en la Figura 1. El concepto del sustrato de transición es crear una nueva cara traccionada formado por el compuesto cementíceo con características más apropiadas a la adherencia del refuerzo polimérico.



a) Refuerzo externo con manta de PRFC adherido al sustrato de transición (Ferrari, 2012)



b) laminado de PRFC insertado en la muesca del sustrato de transición (Arquez, 2010)

Figura 1. Sustrato de transición de viga de concreto armado reforzada con PRFC

En este estudio, nuevos resultados fueron adicionados a los presentados por Ferrari (2012). Los nuevos resultados fueron obtenidos a través del desarrollo y el análisis de compuestos cementíceos para formar el sustrato de transición de vigas reforzadas a través de la inserción de láminas de PRFC en la muesca del nuevo sustrato.

2. COMPUESTOS CEMENTÍCEOS DE ELEVADO DESEMPEÑO

Para evaluar la resistencia a la tracción en la flexión de los compuestos cementíceos, se realizaron ensayos en tres puntos de las probetas prismáticas (150mm x 150mm x 500mm) dotados de una muesca central con pase directo y siguiendo las recomendaciones de la Rilem (2002). La Figura 2 muestra la configuración general del ensayo que fué conducido controlando el desplazamiento de la abertura de la fisura en la entrada de dicha muesca (CMOD – *crack mouth opening displacement*).

En la fase I, trece compuestos fueron analizados como se muestra en la Tabla 1. Los compuestos fueron constituidos por diferentes volúmenes y tipos de fibras de acero y también por diferentes tipos de matriz cementícea (mortero y microconcreto). Los compuestos fueron divididos en grupos, siendo cada uno formado por tres probetas prismáticas con las mismas características. En la fase II, un grupo adicional formado por seis compuestos (todos hechos de micro concreto) fueron estudiados.

La fibra de acero especificada por “A” tiene 25 mm de largo y diámetro de 0,75 mm. La fibra del tipo “C”, producida específicamente para esta investigación, tiene 13 mm de largo y diámetro de 0,75 mm. Esa fibra ha sido designada como microfibra de acero (Figura 3).

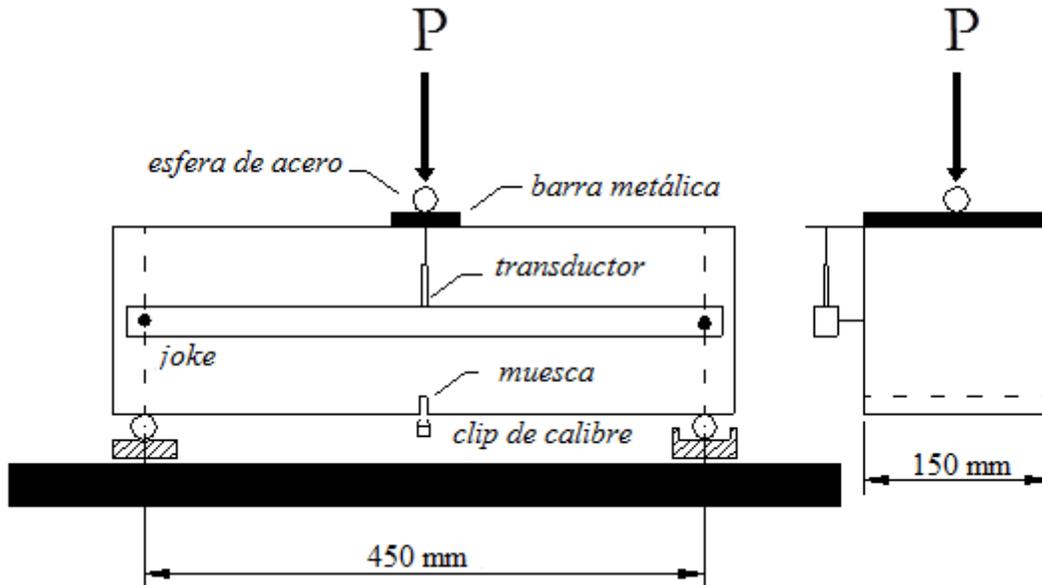


Figura 2. Configuración general del ensayo

Tabla 1. Compuestos analizados

Matriz	Fase	Grupo	Compuestos	Volumen de fibras	Tipo fibras	Material	Edad (días)
Mortero (A)	I	1	CPA	0%	-	Mortero	29
		2	CPA1A	1%	A	Mortero	29
		3	CPA1.5A	1.5%	A	Mortero	29
		4	CPA2A	2%	A	Mortero	29
		5	CPA1.5A0.5C	1.5%+0,5%	A+C	Mortero	28
		6	CPA1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	Mortero	28
		7	CPA1.5A2.5C	1,5%+2.5%	A+C	Mortero	28
		8	CPA1.5A3.5C	1.5%+3.5%	A+C	Mortero	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

CP
X
Y
Y

corpo-de-prova ————
 Argamassa (A) ou ————
 Microconcreto (M)

———— tipo de fibras
 ———— volume fibras

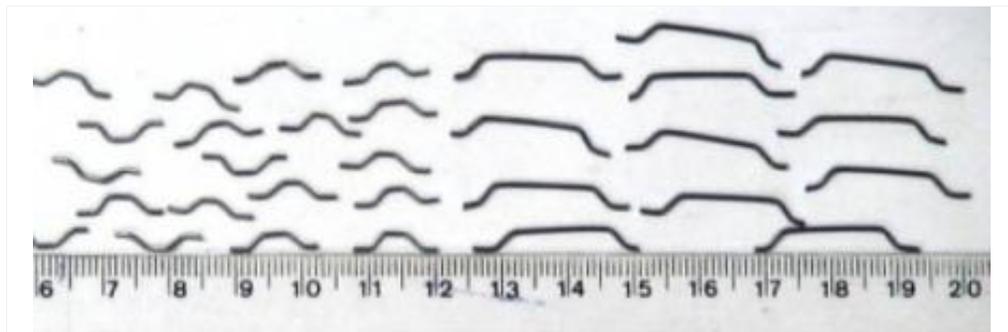


Figura 3. Microfibras de acero (izquierda) y fibras convencionales de acero (derecha)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Ensayos de compresión en probetas cilíndricas

Los valores de las propiedades mecánicas de los compuestos están en la Tabla 2: resistencia promedio a la compresión (f_{cm}), resistencia promedio a tracción por compresión diametral ($f_{ctm,sp}$) y módulo de elasticidad (E_{cs}).

Tabla 2. Resultados promedios de la caracterización de los compuestos sobre resistencia a la compresión

Matriz	Fase	Grupo	Compuestos	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm, sp}$ (MPa)	E_{cs} (GPa)
Mortero (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. Ensayos de flexión – cargas y resistencias

La tenacidad a flexión de los compuestos fue determinada siguiendo las recomendaciones de la Rilem (2002) y los resultados son los indicados en la Tabla 3. El criterio para la evaluación de la tenacidad es basado en la capacidad de absorción de energía, entendida como el área sobre la curva de carga (P) *versus* el desplazamiento vertical (δ).

Según la Rilem, la contribución de las fibras para la tenacidad del compuesto es evaluada a través de la sustracción de la tenacidad que viene de la respuesta de la matriz cementícea. En la Figura 4 se observa una respuesta típica del comportamiento a flexión de compuestos con fibras, en conjunto con las expresiones utilizadas para calcular las resistencias equivalentes a tracción en la flexión ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) y de las resistencias residuales en flexión ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$). Los significados de los parámetros presentados en esa figura son:

- F_L – es la fuerza máxima de *offset* dentro del intervalo de $\delta=0,05$ mm. Ese intervalo es obtenido con el uso de una recta paralela a la tangente inicial, pasando por el punto que caracteriza el desplazamiento δ de *offset*;
- δ_L – es el valor del desplazamiento vertical correspondiente a F_L ;
- $f_{fct,L}$ – es la tensión correspondiente a la fuerza F_L , dado por la expresión:

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

- L – es el vano libre de la probeta y b es su longitud;
- h_{sp} – distancia del tope de la muesca hasta la cara superior de la probeta;
- D_{BZ}^b , $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ – cuota de absorción de energía por la matriz y por las fibras, respectivamente. Son calculadas a través del área sobre la curva $P-\delta$ hasta desplazamientos específicos (ver Figura 4);
- $F_{R,1}$ y $F_{R,4}$ – valores de fuerza correspondientes a los desplazamientos $\delta_{R1}=0,46$ mm y $\delta_{R4}=3,00$ mm. Son valores utilizados para el cálculo de las resistencias residuales de los compuestos.

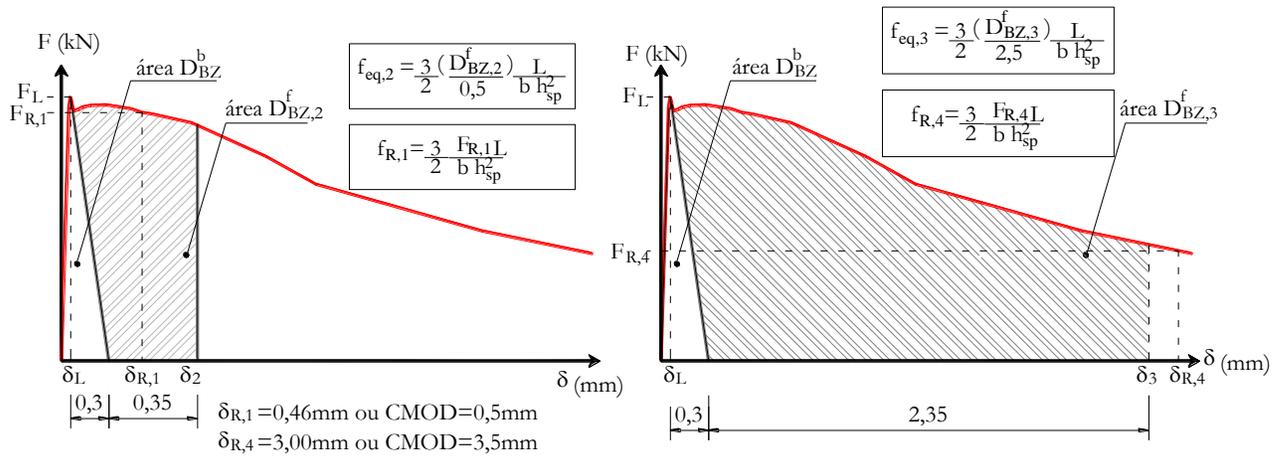


Figura 4 – Criterios de la Rilem (2002) para la evaluación del comportamiento de materiales con

Aún de acuerdo con la Rilem (2002), las cuotas o parcelas de tenacidad ($D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$) son transformadas en resistencias flexionales equivalentes ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) para los diferentes niveles de desplazamientos δ_2 y δ_3 . La capacidad de carga del material en relación a un valor pre-definido de flecha es evaluada a través del concepto de resistencias flexionales residuales ($f_{R,1}$ y $f_{R,4}$).

En la Tabla 3 es presentado el valor de la fuerza (F_M), que corresponde a la fuerza máxima alcanzada por el compuesto a lo largo del histórico de carga.

Tabla 3. Cargas y resistencias

Matriz	Fase	Compuestos	Cargas (kN)				Resistencias (MPa)				
			F _L	F _M	F _{R,1}	F _{R,4}	f _{ct,L}	f _{eq,2}	f _{eq,3}	f _{R,1}	f _{R,4}
Mortero (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

Queda evidenciado que la adición de fibras de acero contribuye significativamente para el aumento de la resistencia definida por el parámetro ($f_{ct,L}$) que representa la cuota de resistencia del compuesto proveniente de la contribución de la matriz cementicia.

Aún es posible afirmar que la adición de microfibras a las fibras de acero resulto en mejoras aún más significativas en esa propiedad para los compuestos de mortero en relación a los de micro concreto.

El desempeño de los compuestos de mortero proveniente de la cuota de contribución de las fibras ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) fué mejorado con el aumento del volumen de la fibra A y potencializado con la adición de las microfibras de acero.

Para los compuestos de micro concreto es evidente el incremento de los niveles de las resistencias flexionales equivalentes ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) por medio de la adición de las microfibras de acero a la fibra A. En gran parte de esos compuestos, la resistencia ($f_{eq,2}$) supera el valor de la resistencia ($f_{ct,L}$), mostrando ganancias significativas de resistencia posterior a la fisuración de la matriz.

3.3. Curvas P-CMOD

Las curvas P-CMOD de los compuestos de mortero son presentados en la Figura 5. La presencia de fibras y microfibras de acero en la matriz cementicia de mortero mejoro su comportamiento, traducido en términos de aumento de la capacidad de absorción de energía e incremento de los niveles de resistencia, antes y después de la fisuración de la matriz.

El aumento en el volumen de fibras de tipo “A”, proporcionó una mejora gradual en la ductilidad de los compuestos de mortero. Así mismo, la incorporación de las microfibras de acero a las fibras “A” contribuyó aún más en ese sentido.

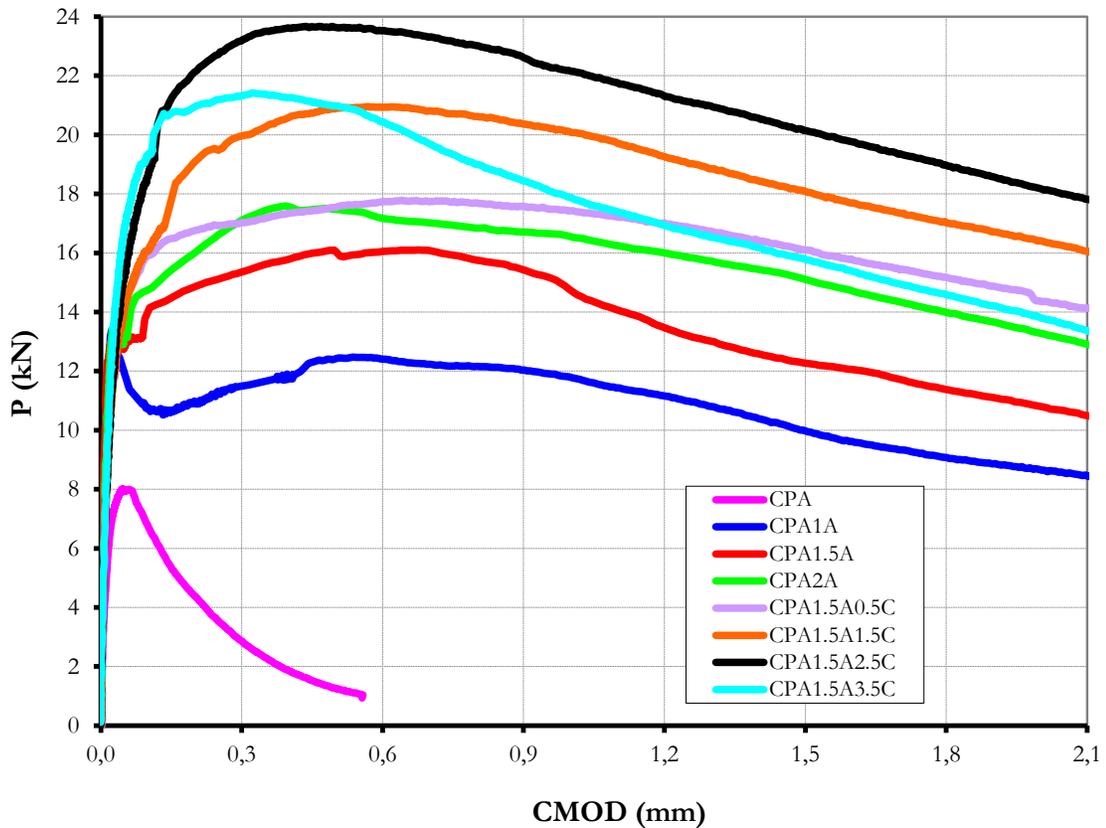


Figura 5. Curvas P-CMOD de los compuestos de mortero

Las curvas de los compuestos de micro concreto son presentadas en la Figura 6. La presencia de fibras y microfibras mejoraron principalmente la capacidad de absorción de energía de esos compuestos. La capacidad resistente fue disminuida con la presencia aislada de la fibra “A” (compuesto CPM1A).

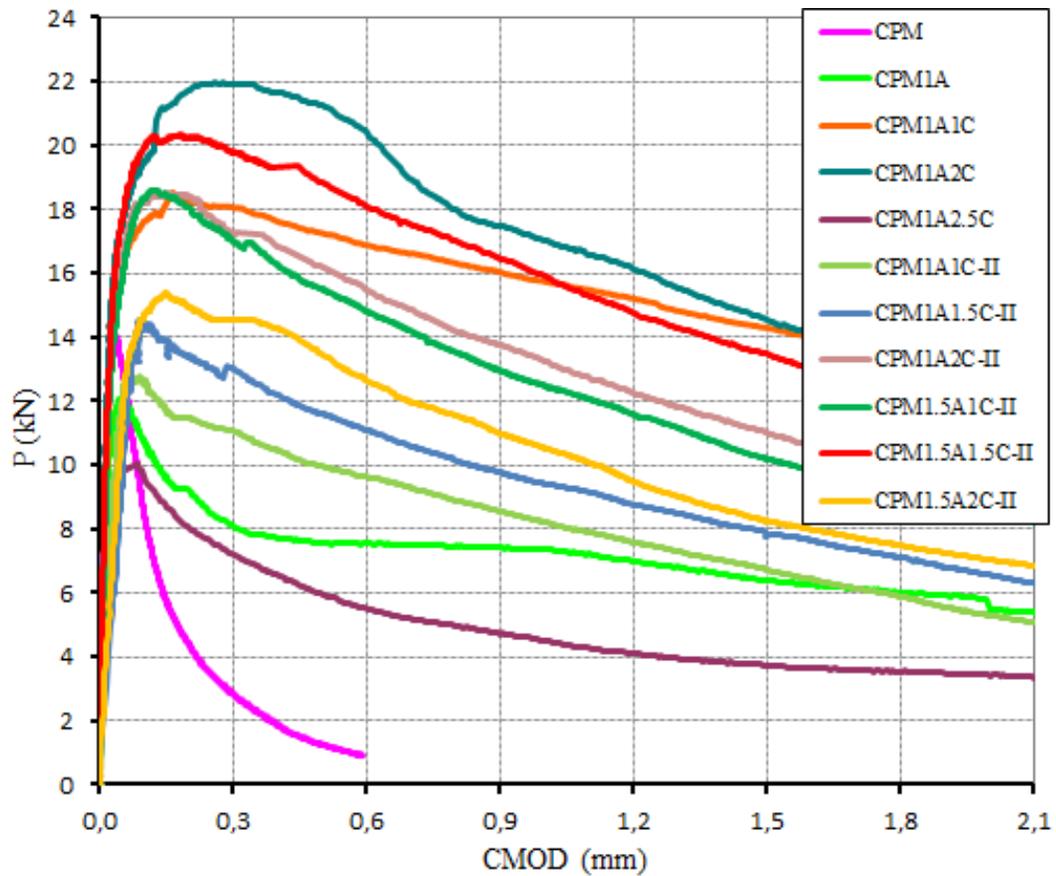


Figura 6. Curvas P-CMOD de los compuestos de micro concreto

3.4. Curvas de resistencia a la fractura

En la Figura 7 se muestran las curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de mortero. En las Figuras 8 y 9 se presentan las curvas de resistencia de los compuestos de micro concreto producidos en las fases I y II, respectivamente. Donde “ K_R ” representa la resistencia al avance de la fisura (resistencia a la fractura del compuesto) y “ α ” es la profundidad de la fisura (a) normalizada relativamente a la altura (W) de la probeta, es decir, $\alpha = a/W$.

La ganancia de resistencia a la fractura quedó evidenciada principalmente en el régimen de ruptura post-pico (fuerza máxima), aumentando entre los diferentes compuestos con el aumento del rango de fibras metálicas incorporadas a cada uno de ellos. Exceptuando para los compuestos CPA1.5A3.5C y CPM1A2.5C en los que sus resistencias a la fractura a lo largo del histórico de carga fueron inferiores a la de los compuestos CPA1.5A2.5C y CPM1A2C, respectivamente.

También es posible notar que en la fase de post-pico de carga, los trechos finales de las curvas de resistencia para los compuestos de mortero (CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C) y de micro concreto (CPM1A1C y CPM1A2C) son ascendentes, lo que representa la elevada ganancia de resistencia a la propagación de la fisura dado por la presencia de las fibras y microfibras de acero. Tal hecho está asociado a la disipación de energía del proceso de arrancamiento de las fibras y microfibras de la matriz cementicia.

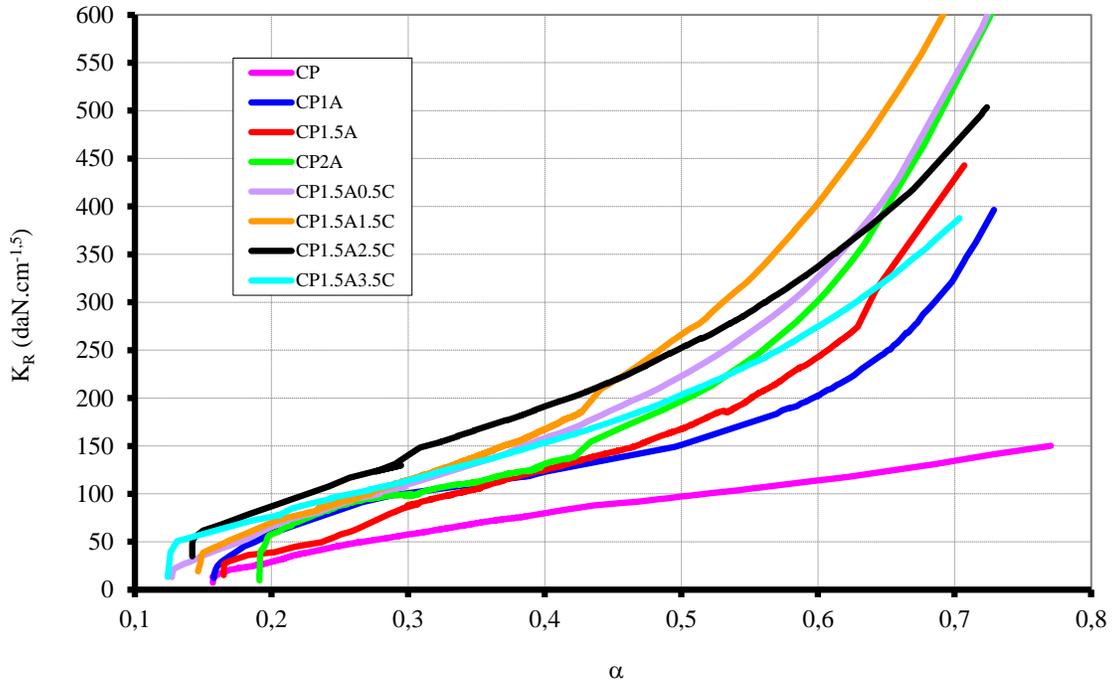


Figura 7. Curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de mortero

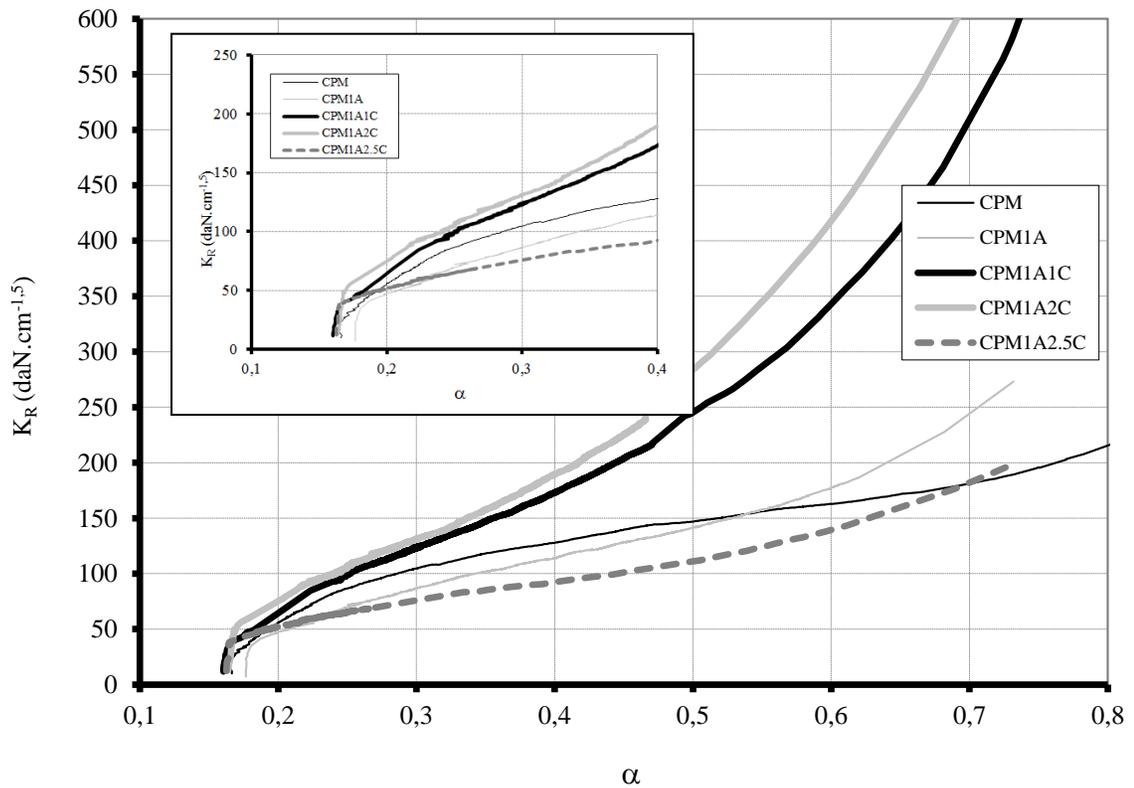


Figura 8. Curvas de resistencia a la fractura de lós compuestos de micro concreto – Fase I

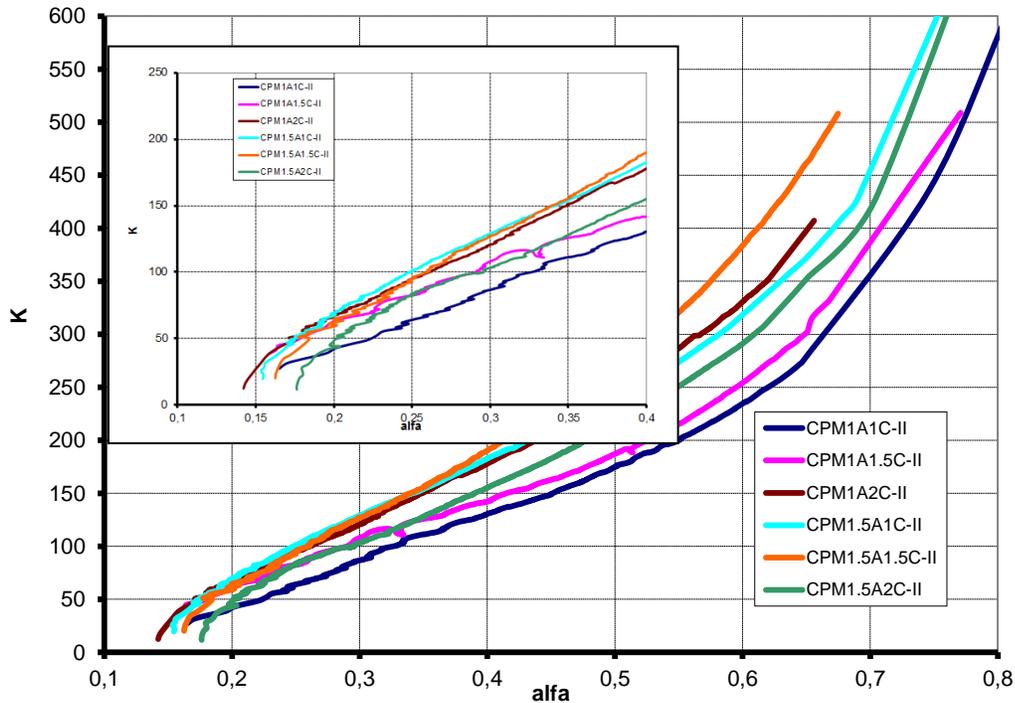


Figura 9. Curvas de resistencia a la fractura de lós compuestos de micro concreto – Fase II

4. CONCLUSIONES

De la investigación que fué elaborada, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. El proceso de hibridización es una alternativa interesante para la aplicación en la recuperación del vano traccionado de vigas de concreto, una vez que, la adición de microfibras de acero a las fibras cortas de acero aumenta la resistencia a la tracción en la flexión y aumentan la tenacidad flexional de los compuestos de mortero y de micro concreto;
2. Con la fisuración de la matriz, la transferencia de tensiones fue facilitada por las microfibras que, una vez dispersas en la matriz, condicionaron la propagación de la fisura a un aumento del nivel de carga del compuesto;
3. Considerándose las características de pseudo-endurecimiento y su aplicación específica, el compuesto CPM1A2C fue el que presentó las mejores propiedades entre los producidos en la fase I;
4. Entre los compuestos producidos en fase II, se destaca el CPM1.5A1.5C-II que, a través de la hibridización resultó en aumentos considerables de la carga máxima como también en la resistencia a la fractura y flexión.

5. REFERENCIAS

- 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, “*Aplicación de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de acero para reforço à flexión de vigas de concreto armado*”, Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao 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.