
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS HÍBRIDOS**DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF HYBRID CEMENTITIOUS
COMPOSITES***Michel Fernando Albertim¹**Vladimir José Ferrari¹***Resumo:**

O trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e a análise de compósitos cimentícios híbridos formados através da adição conjunta de fibras de aço e microfibras de vidro a uma matriz cimentícia formada por microconcreto. Com as microfibras pretende-se controlar a microfissuração da matriz, principalmente aquela que ocorre na fase pré-pico de carregamento como já observado em outras pesquisas. A ação das fibras de aço é esperada no controle à propagação da fissuração da matriz conferindo ganho de tenacidade ao compósito após a fase de pós-pico do histórico de carregamento. Os compósitos assim formados foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos, moldando-se para tanto, corpos de prova prismáticos com dimensões de (150 x 150 x 500) mm, dotados de entalhe central reto passante conforme recomenda a Rilem (2002). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu/Pr. A resposta de cada compósito foi obtida considerando-se parâmetros de resistência e de tenacidade flexional indicados na Rilem (2002) e parâmetros de resistência ao fraturamento (curvas de resistência) calculados tendo base equacionamento utilizando-se conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear. A adição de forma híbrida e, em baixas quantidades de microfibras de vidro, com as fibras de aço, resultou em melhora no desempenho do compósito em termos de resistência, tenacidade flexional e resistência ao fraturamento.

Palavras-chaves: compósito híbrido; fibras de aço; microfibras de vidro.

Abstract:

The objective of this work was the development and analysis of hybrid cementitious composites formed by the addition of steel fibers and glass microfibers to the cementitious matrix formed by a microconcrete. With the microfibers it is intended to control the microcracking of the matrix that occurs in the pre-peak loading phase as already observed in other studies. The action of the steel fibers is expected in the control the propagation of the cracking of the matrix conferring tenacity gain to the composite. The composites thus formed were subjected to three-point bending tests, molded for both prismatic specimens, with dimensions of (150 x 150 x 500) mm, provided with a straight recessed center notch as recommended by Rilem (2002). The tests were carried out at the Itaipu Binacional Concrete Laboratory in Foz do Iguaçu / Pr. The response of each composite was obtained considering resistance and toughness parameters (flexural and fracturing). It was evidenced that the hybrid addition and low amounts of glass microfibers with the steel fibers results in an improvement in the performance of the composite in terms of flexural resistance and fracture resistance.

Keywords: hybrid composite; steel fibers; glass microfibers.

¹² Universidade Estadual de Maringá, Campus Sede – Brasil, email:vladimirjf@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Diferentes tipos de fibras já foram estudadas quando incorporadas ao concreto com vistas a um melhor desempenho mecânico quando sob esforços de tração. Entre os estudos nacionais, citam-se:

- a) Fibras de aço: Figueiredo (2000), Ferreira (2002), Ferrari (2007 e 2014) e Arquez (2010);
- b) Fibras de vidro: Aquino (1992), Ortenzi (2007), Ventura (2009), Bonifácio & Godinho (2014);
- c) Fibras poliméricas: Cáceres et al. (2013).

Ferreira (2002) comenta que as modificações decorrentes da adição de fibras de aço à matriz cimentícia em taxas de até 2% tendem a restringir-se apenas à fase de pós-pico do histórico de carregamento. Nessas condições, as fibras não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que antecede a carga máxima. Neste sentido, o processo de hibridização (incorporação de mais de um tipo de fibra à matriz cimentícia) tem indicado bons resultados: Ferrari (2007 e 2014), Arquez (2010) e Cáceres et al. (2013).

Assim, um dos principais objetivos para o processo de hibridização é o controle da abertura de fissuras em diferentes estágios de comportamento da matriz cimentícia ao processo de carregamento. Di Prisco et al. (2009) comentam que dois ou mais diferentes tipos de fibras podem ser adequadamente combinados para produzir um compósito e incrementar as suas propriedades físicas e mecânicas a partir da ação de cada uma das fibras.

Banthia e Sappakittipakorn (2007) comentam que o objetivo de usar simultaneamente as fibras de aço juntamente com as sintéticas é obter melhor desempenho do concreto, aumento da energia de fratura e incremento da tenacidade na região pós-pico.

As fibras de aço encontradas comercialmente no Brasil são disponibilizadas com comprimento a partir de 25 mm. Estudos, como os de Ferreira (2002) e Ferrari (2007), mostram que tais fibras não atuam de forma a impedir a microfissuração da matriz cimentícia na fase pré-pico de carregamento. A atuação de tais fibras é sentida somente após o surgimento da fissuração, trabalhando na transferência de tensões entre as faces das fissuras.

Com o propósito de potencializar o efeito de fibras de aço, alguns estudos incorporaram aos compósitos cimentícios microfibras de aço de 13 mm de comprimento (Ferrari, 2007 e 2014; Arquez, 2010). Os resultados mostraram a atuação eficiente das microfibras na fase pré-pico de carregamento, combatendo diretamente a microfissuração e aumentando a resistência do compósito em termos de resistência flexional e também faturamento.

As microfibras de aço utilizadas nas pesquisas citadas anteriormente, não são disponibilizadas comercialmente e foram fabricadas exclusivamente para fins de tais pesquisas.

Nesse sentido, nessa pesquisa buscou-se aplicar fibras de vidro contendo apenas 13 mm de comprimento para o desenvolvimento de compósitos cimentícios formados por uma matriz de microconcreto. Um dos motivos da escolha dessa fibra foi a sua disponibilidade comercial a baixo custo na região de desenvolvimento da pesquisa (Foz do Iguaçu/Pr). O comportamento dos compósitos cimentícios foi avaliado através dos resultados obtidos por meio da realização de ensaios de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos dotados de entalhe central reto passante, conforme prescreve as recomendações da Rilem (2002). A avaliação dos resultados foi feita considerando-se os parâmetros de resistência e de tenacidade flexional indicados na Rilem.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliar o comportamento dos compósitos foram realizados ensaios à flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm) seguindo-se as recomendações da Rilem TC 162-TDF (2002). Os corpos de prova foram dotados de entalhe central reto passante, com profundidade em torno de 25 mm e largura de 5 mm, executado com disco de corte diamantado na face lateral.

O entalhe central tem por objetivo fragilizar a seção transversal nessa região e induzir o fraturamento em um plano preferencial, elevando-se a sollicitação em todo o material a frente da ponta do entalhe. Com isso, durante a sollicitação, a deformação é sempre localizada no plano que contém o entalhe e a dissipação de energia volumétrica é reduzida.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu/PR. Para tanto, fez-se uso de um equipamento servo-controlado “*Timegroup*”, sistema de aquisição de dados “*HBM/MX 840A*”, transdutor de deslocamento “*HBM/WI10*”, *clip gauge* “*HBM/DD1*”, célula de carga com capacidade de 1000 kN, além do suporte de fixação do tipo *yoke*. Na Figura 1 mostra-se a configuração geral do ensaio e um detalhe do corpo de prova posicionado no equipamento.

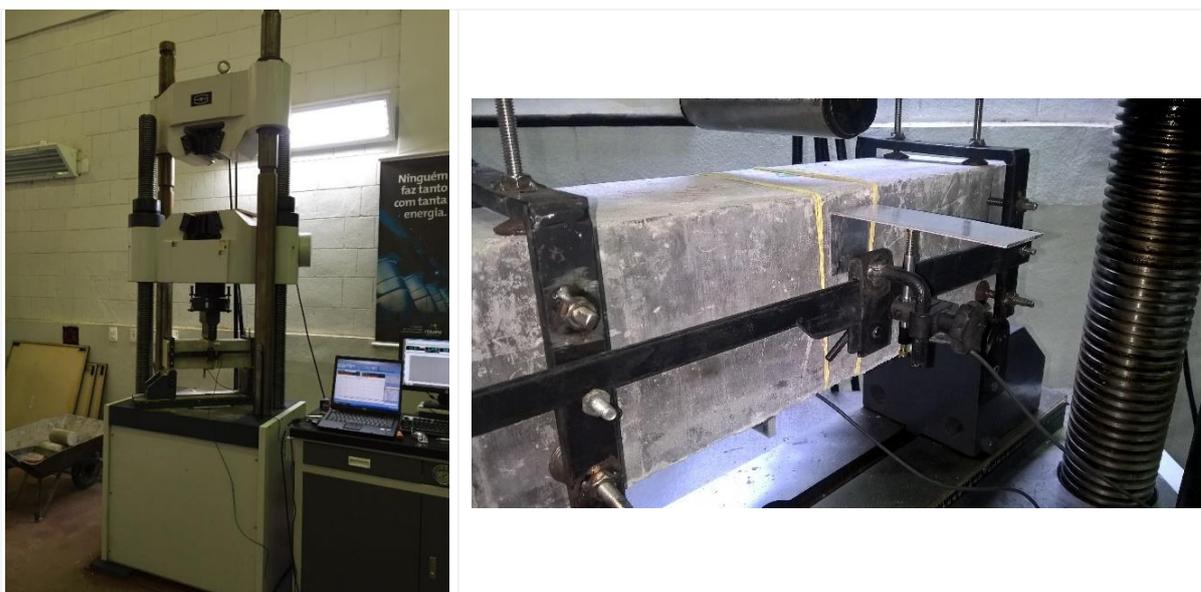


Figura 1. Configuração geral do ensaio de flexão em três pontos (Fonte: Aatoria própria, 2017)

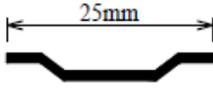
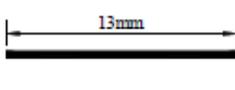
Foram moldados ao todo 27 corpos de prova prismáticos, sendo divididos em grupos formados por 3 prismas com as mesmas características, totalizando-se 9 compósitos diferentes. Na Tabela 1 são indicados os compósitos analisados. Na Tabela 2 são indicadas as características das fibras utilizadas. A fibra de aço empregada foi a FS8-Wirand, fornecida pela empresa Maccaferri – América Latina, com comprimento de 25 mm, gancho nas extremidades e um diâmetro de 0,75 mm, o que resulta num fator de forma igual a 33. A outra fibra utilizada foi a de vidro do tipo AR (álcali resistente), adquirida junto a empresa Prafix Industria e Comercio de Produtos Químicos. Na Figura 2 são ilustradas os dois tipos de fibras utilizadas.

Tabela 1 – Compósitos analisados

Grupos	Compósitos	Taxa de Fibras	Tipo de Fibras
1	CP0	0%	-
2	CP0.5V	0.5%	Vidro
3	CP0.75V	0.75%	Vidro
4	CP1V	1%	Vidro
5	CP1A	1%	Aço
6	CP1A0.25V	1% + 0,25%	Aço + Vidro
7	CP1A0.5V	1% + 0,50%	Aço + Vidro
8	CP1A0.75V	1% + 0,75%	Aço + Vidro
9	CP1A1V	1% + 1%	Aço + Vidro

Fonte: Autoria própria (2017)

Tabela 1 - Tipos de Fibras

Parâmetros	Fibra de Aço	Fibra de Vidro
Formato		
Diâmetro Nominal	0,75mm	0,013mm
Tensão máxima de tração	1100 MPa	1698 MPa
Peso Específico	7850 Kg/m ³	2700 Kg/m ³
Módulo de Young	210 kN/mm ²	84 kN/mm ²
Alongamento na ruptura	3 a 4%	2 a 3%

Fonte: Autoria própria (2017)

**Figura 2.** Fibras de aço e de vidro (Fonte: Autoria própria, 2017)

Numa primeira fase da pesquisa foram analisados o compósito sem fibras (CP0) e aqueles contendo somente fibras de vidro em taxas de 0,5%, 0,75% e 1%. Na sequência, reproduziu-se o compósito contendo 1% de fibras de aço (CP1A), tendo como base as conclusões obtidas em Ferrari (2007) acerca do desempenho desse material. Para estudar o efeito da hibridização sobre o desempenho dos compósitos, as fibras de vidro foram adicionadas ao compósito CP1A em taxas variando-se de 0,25% a 1%.

Para produção dos compósitos foi utilizado Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), areia média, brita com dimensão característica de 10 mm e aditivo do tipo plastificante. As misturas foram preparadas empregando-se uma betoneira elétrica com capacidade de 200 litros. A composição da mistura é a indicada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição de materiais para produção dos compósitos

Material	Compósito	
	Traço em massa	Massa específica
Cimento CP-V ARI PLUS	1,0	3,15 kg/dm ³
Areia	2,3	2,65 kg/dm ³
Brita 0	1,7	2,87 kg/dm ³
a/c	0,5	-
Consumo de cimento (kg/m ³)	446	
Teor de fibra	Variável	
Aditivo plastificante Adiment Premium	0,9%*	1,09 kg/dm ³
* em relação ao peso do cimento		

Fonte: Autoria própria (2017)

3 RESULTADOS

3.1. 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 (2002). O critério de avaliação da tenacidade baseia-se na capacidade de absorção de energia, entendida como a área sob a curva força-deslocamento vertical (P- δ). A contribuição das fibras para a tenacidade do compósito é avaliada através da substituição da parcela de tenacidade proveniente da resposta da matriz cimentícia. Na Figura 3 ilustra-se a resposta típica do comportamento à flexão dos 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 $f_{R,4}$). Em que:

F_L = é a força máxima de *offset* dentro do intervalo de $\delta=0,05$ mm;

δ_L = é o valor de deslocamento vertical correspondente a F_L ;

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

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}^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 (ver Figura 3);

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

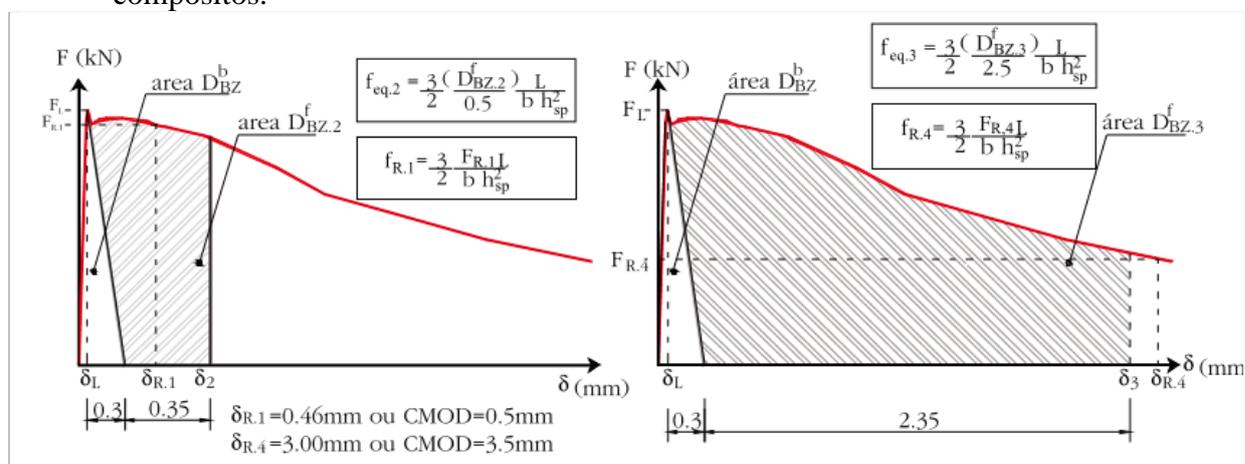


Figura 3. Resposta típica do comportamento em flexão dos compósitos (Rilem, 2002)

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das forças e das resistências calculados seguindo-se as recomendações da Rilem (2002). O valor da força máxima alcançada por cada compósito (F_M) também é apresentada.

Tabela 4 – Forças e resistências conforme Rilem (2002)

Compósitos	Forças (kN)				Resistências (MPa)				
	F_L	F_M	$F_{R,1}$	$F_{R,4}$	$f_{fct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,4}$
CP0	24,6	24,6	2,3	-	7,1	-	-	0,7	-
CP0.5V	20,2	20,2	20,0	-	5,8	-	-	4,8	-
CP0.75V	21,0	21,0	20,6	-	6,0	1,5	0,4	4,9	-
CP1V	20,3	20,3	19,1	-	5,9	2,5	0,6	4,5	-
CP1A	22,9	24,0	21,4	9,8	6,6	5,4	3,4	5,1	2,3
CP1A0.25V	25,6	26,1	22,1	8,6	7,4	6,0	3,8	5,3	2,1
CP1A0.5V	23,5	23,8	17,9	8,4	6,8	4,7	3,2	4,2	2,0
CP1A0.75V	21,3	22,2	16,8	9,0	6,2	5,1	3,3	4,0	2,2
CP1A1V	20,3	20,4	14,8	6,3	5,8	4,0	2,7	3,5	1,5

Fonte: Autoria própria (2017)

Na Figura 4 é indicada a relação entre a força máxima de *offset* (F_L) e a força máxima resistida pelos compósitos (F_M). Em termos das referidas forças, fica evidente o melhor desempenho do compósito CP1A0.25V em relação aos demais, sendo esse, o único compósito a apresentar valores de forças superiores ao CP0. Para os compósitos mono-híbridos contendo fibras de vidro, não se obteve valores de F_M superiores aos de F_L . Já para o compósito mono-híbrido contendo fibras de aço e em todos os compósitos híbridos, as fibras proporcionaram aumento da capacidade de carga além da contribuição da matriz cimentícia.

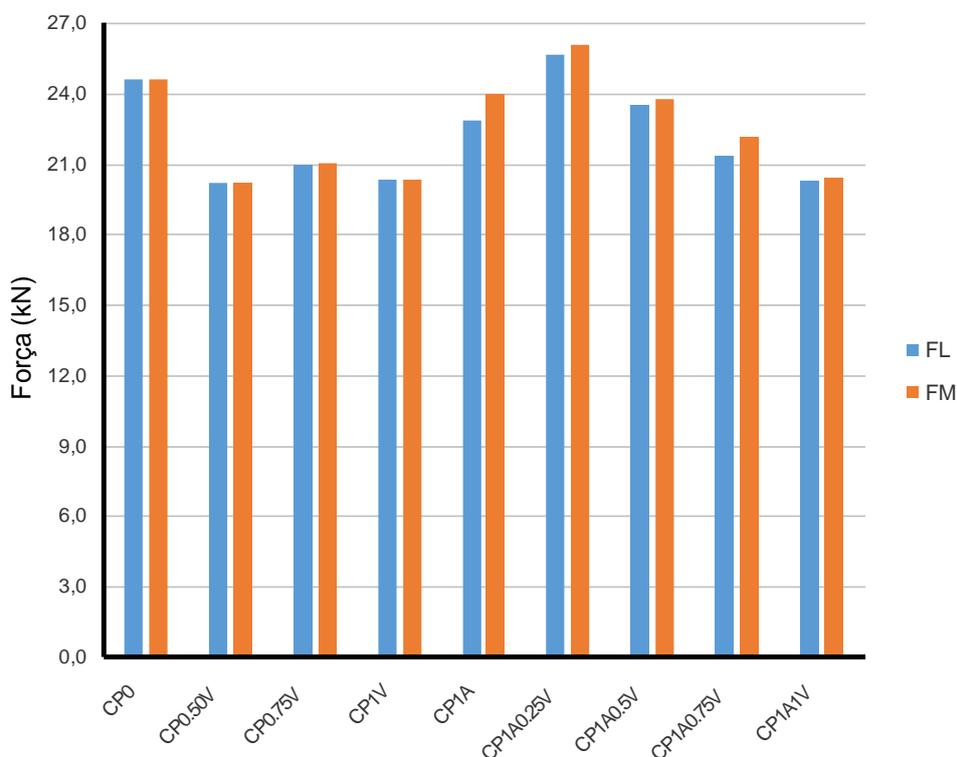


Figura 4. Comparativo entre as forças FL e FM (Fonte: Autoria própria, 2017)

3.2 Curvas P-CMOD

Na Figura 5 são reunidas as curvas “médias” (representativas do comportamento do grupo) dos compósitos analisados. Já na Figura 6 as curvas P-CMOD reunindo-se todos os compósitos são rerepresentadas dando ênfase ao intervalo inicial de solicitação dos mesmos para CMOD até 0,15 mm. Com isso, é possível melhor avaliar o efeito das microfibras na resposta do material.

O comportamento da matriz cimentícia de microconcreto ocorreu conforme o esperado, perdendo a sua capacidade de carga quase que imediatamente após a fissuração (compósito CP0). Outra observação é que todas as curvas mostraram-se menos rígidas em relação ao compósito sem fibras. O que permite afirmar que a presença das fibras diminuiu a rigidez à flexão dos compósitos.

Os compósitos mono-híbridos, contendo apenas fibras de vidro, apresentaram resistência inferior à matriz sem fibras, podendo-se afirmar que a atuação das fibras de vidro diminuiu a resistência dos compósitos. Já a tenacidade flexional desses compósitos foi levemente modificada em relação ao compósito CP0. O comportamento pós-pico revelado através das curvas P-CMOD evidencia escorregamento das fibras de vidro durante o processo de fissuração da matriz.

O comportamento do compósito mono-híbrido com fibras de aço é completamente distinto daqueles contendo apenas fibras de vidro. Apesar das fibras de aço não terem proporcionado aumento na resistência desse compósito em relação ao sem fibras, o histórico de carregamento evidencia que o comportamento desse compósito se deu através de aumento considerável da tenacidade flexional.

Interessante notar a melhora no comportamento do compósito CP1A quando da adição de apenas 0,25% de fibra de vidro. Melhora essa em termos de aumento na capacidade de carga (resistência flexional e carga máxima) e aumento na capacidade de absorção de energia durante o histórico de carregamento. Já aumentando a taxa de adição de fibras de vidro junto as de aço, essa tendência não foi verificada.

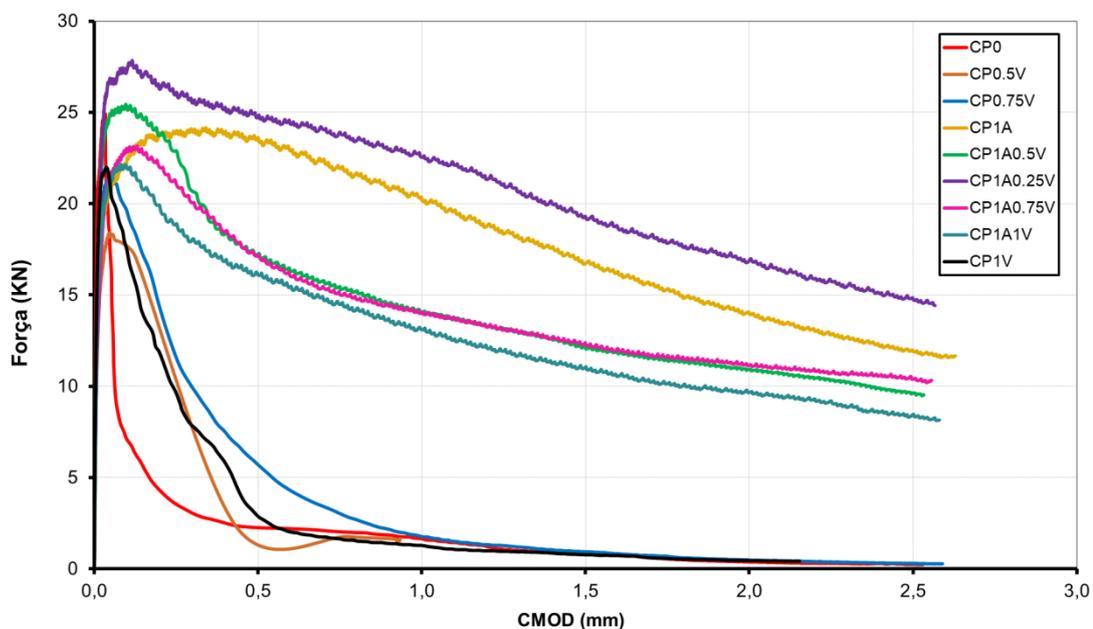


Figura 5. Curvas P-CMOD dos compósitos analisados (Fonte: Autoria própria, 2017)

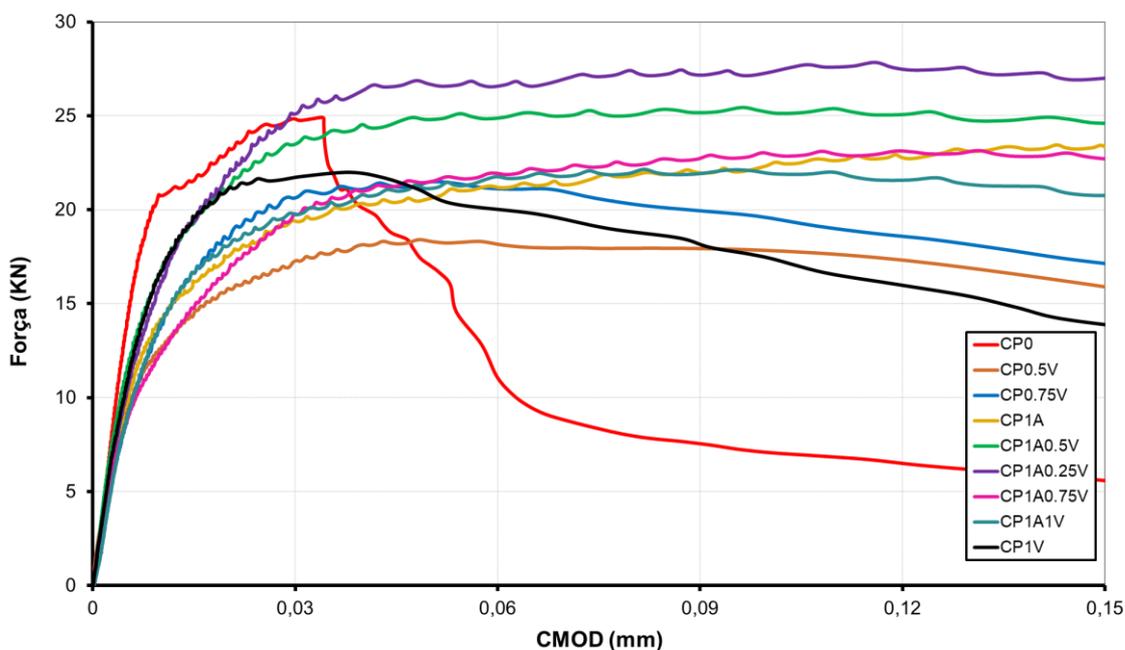


Figura 6 – Curvas P-CMOD dos compósitos analisados para CMOD até 0,15 mm (Fonte: Autoria própria, 2017)

4 CONCLUSÕES

Em face dos resultados apresentados sobre os compósitos analisados, o CP1A0,25V evidenciou o melhor desempenho em termos de resistência flexional. Os demais compósitos híbridos (CP1A0,5V, CP1A0,75V e CP1A1V) também apresentaram desempenho destacado, porém inferior ao CP1A0,25V. O que possibilita afirmar que para esse estudo, adições de fibra de vidro acima de 0,25% não representa melhoria no desempenho do compósito.

O processo de hibridização, ou seja, a adição das fibras de vidro às fibras convencionais de aço, potencializa uma maior contribuição da matriz para a resistência do compósito e melhora o mecanismo de transferência de tensões da matriz para as fibras apenas para o compósito híbrido contendo adição de 0,25% de fibras de vidro.

REFERÊNCIAS

AQUINO, E. M. F. Identificação do modo de fratura de compósitos poliésteres – Vidro-E. 13° CBCIMAT. Vol. 1, Paraná, 1992.

ARQUEZ, A.P. (2010). **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**. São Carlos, 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BANTHIA, N.; SAPPAKITTIPAKORN, M. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1366-1372, 2007.

BONIFACIO, J. S. R.; GODINHO, D. S. S.; **Estudo do efeito das fibras de vidro e polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto**. Engenharia Civil UNESC, Criciúma, 2014.

CACERES, A. R. E.; FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R. Avaliação do comportamento mecânico do concreto com reforço híbrido de fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 55, 2013, Gramado. Anais... Gramado, 2013.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L.. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and Structures**, RILEM, 2009.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FERRARI, V. J.; ARQUEZ, A. P.; HANAI, J. B.; SOUZA, R. A. Desenvolvimento de compósitos cimentícios de elevado desempenho armados com fibras para aplicação como substrato de transição de vigas de concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. Volume 7, n, 6, Dezembro de 2014, p. 965-975.

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

FERREIRA, L. E. T. Fracture Analysis of a High-Strength Concrete and a High-Strength Steel-Fiber-Reinforced Concrete. **Mechanics of Composite Materials**. Vol. 43, n. 5, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. (2000). **Concreto com fibras de aço**. ISSN 0103-9830, BT/PCC/260, 2000.

GUINEA, G. V. Stress in ten sity fac tor, com pli ance and CMOD for a general three-point-bend beam. **International Journal Fracture**, 89, 103-116 (1998).

ORTENZI, Altibano (2007). “**A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu Uso Estrutural em Construção Civil – O Estado-da-arte**”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

RILEM TC 162-TDF (2002a): Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v.35, p.579-582, November.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture mechanics of concrete** - applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. New York, John Wiley & Sons, 1995.

TADA, H. **The Stress Analysis of Cracks**, Hand book, Paris Productions Incorporated, St. Louis, USA, 1985.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4, 2009.