

Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete

Influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras

A. M. LEITE ^a

alexmacedoleite@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4022-6787>

A. L. DE CASTRO ^a

alcastro@sc.usp.br
<https://orcid.org/0000-0002-7248-7327>

Abstract

One of the main purposes of the addition of fibers to the concrete is the control of the plastic shrinkage cracking in the fresh state and the increase of the post-crack resistance in the hardened state. The cementitious matrix is one of the factors that influences the performance of fiber reinforced concrete, interfering in the fluidity of the mixture and in the adhesion between fiber and matrix. In this context, the present paper evaluates the behavior of two concrete, one of conventional strength and another of high-strength, without fiber and with a content of 1%, by volume, of fiber, being used steel fiber and macro-polymeric fiber. For this, the mechanical properties of the concrete were evaluated in the hardened state by the tests of compressive strength, Barcelona, flexure of prisms and punching of plates. From the experimental results, statistically analyzed, there were significant changes in toughness and residual strength due to change in the cementitious matrix. Finally, an equivalence of performance between the fibers as to the toughness was observed, with the change of the cementitious matrix.

Keywords: fiber reinforced concrete, cementitious matrix, steel fiber, macro-polymeric fiber, properties.

Resumo

Uma das principais finalidades da adição de fibras ao concreto é o controle da fissuração por retração plástica no estado fresco, e o aumento da capacidade resistente pós-fissuração no estado endurecido. A matriz cimentícia é um dos fatores que influencia no desempenho do concreto reforçado com fibras, interferindo na fluidez da mistura e na aderência entre as fibras e a matriz. Neste contexto, o presente trabalho avalia o comportamento de dois concretos, um de resistência convencional e outro de alta resistência, sem fibras e com teor de 1%, em volume, de fibras, sendo utilizadas fibras de aço e macrofibras polimérica. Para isso, foram avaliadas as propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido, a partir dos ensaios de resistência à compressão, Barcelona, flexão em prismas e punção em placas. A partir dos resultados experimentais, analisados estatisticamente, verificou-se alterações significativas da tenacidade e da resistência residual com a mudança da matriz cimentícia. Por fim, observou-se uma equivalência de desempenho entre as fibras quanto à tenacidade, com a alteração da matriz cimentícia.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras, matriz cimentícia, fibras de aço, macrofibras polimérica, propriedades.

^a University of São Paulo, Department of Structural Engineering, São Carlos School of Engineering, São Carlos, SP, Brazil.

Received: 15 Oct 2018 • Accepted: 07 Apr 2019 • Available Online: 26 May 2020

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

O concreto reforçado com fibras se trata de um material compósito que vem sendo utilizado para diversas aplicações, como revestimento de túneis, radier, pisos industriais, elementos pré-moldados, dentre outras. As fibras melhoram a distribuição das fissuras e limitam as aberturas destas no Estado Limite de Serviço, reduzindo a exposição do concreto ao ambiente. O reforço com fibras é apropriado para estruturas com alta capacidade de distribuição de tensões. No caso de estruturas com tensões localizadas e tensões dispersas, podem ser utilizados simultaneamente reforços locais com barras de aço e fibras dispostas aleatoriamente no concreto [1].

A adição de fibras ao concreto provoca alterações nas propriedades do material, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, para melhorar a trabalhabilidade da mistura, que é afetada pela incorporação de fibras, geralmente utiliza-se aditivo superplastificante. No entanto, nos casos de concretos com maiores teores de fibras, a adição de aditivo superplastificante pode ser inviável, sendo necessário alterar a matriz cimentícia para melhorar a fluidez do concreto.

A principal contribuição das fibras ocorre no estado endurecido do concreto, após a ruptura da matriz cimentícia, fornecendo resistência residual ao compósito. As fibras agem como ponte de transferência de tensão, reduzindo a concentração de tensão nas extremidades das fissuras. Com isso, o concreto se torna um material pseudo-dúctil, apresentando certa ductilidade [2].

A matriz cimentícia é um dos fatores que interfere no comportamento do concreto reforçado com fibras no estado endurecido. As propriedades da matriz afetam a aderência entre as fibras e a matriz, refletindo no desempenho do concreto pós-fissuração [2]. Assim, dependendo do tipo e do teor de fibra adicionada, e das propriedades da matriz cimentícia, o concreto reforçado com fibras pode manifestar comportamento *softening* ou *hardening* após a fissuração. O comportamento *softening* é marcado por deformações localizadas em uma única fissura e por uma redução da carga resistente pós-fissuração, enquanto que no comportamento *hardening* ocorre a formação de múltiplas fissuras e aumento da capacidade resistente após ruptura do concreto [3].

Atualmente existem fibras de diversos materiais disponíveis no mercado da construção civil: aço, polímero, vidro etc. As proprie-

dades do material que constitui as fibras, como módulo de elasticidade e resistência à tração, vão definir sua função no concreto. Fibras com elevado módulo de elasticidade e resistência à tração superior à da matriz devem atuar como reforço primário do concreto, proporcionando capacidade resistente após a fissuração da matriz. Já fibras que possuem baixo módulo de elasticidade e resistência à tração são mais utilizadas no controle da fissuração por retração plástica do concreto.

1.1 Justificativa e objetivo

Os dois principais tipos de fibras utilizadas como reforço primário do concreto são as fibras de aço e as macrofibras poliméricas. Enquanto a primeira é historicamente mais empregada para tal finalidade, visto que começou a ser comercializada primeiro, na década de 1970, e possui propriedades mais vantajosas (maior módulo de elasticidade e maior resistência à tração), a segunda tem uma comercialização e aplicação mais recente, na década de 2000[4], sendo alvo de vários estudos que buscam compreender melhor seu desempenho no concreto, principalmente em concretos de alta resistência.

Além disso, estudos envolvendo a influência da matriz cimentícia no desempenho do concreto reforçado com fibras ainda são limitados. Sabe-se que uma matriz mais resistente possuiu uma maior aderência com as fibras [2]. No entanto, pouco se conhece a respeito do impacto dessa maior aderência nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras. Com isso, o presente estudo busca avaliar a influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras, considerando o uso de fibras de aço e macrofibras poliméricas como elemento de reforço aos concretos de resistência convencional e de alta resistência.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

Para a produção dos concretos foi utilizado o cimento Portland composto com pozolana, com classe de resistência de 32 MPa (CPII Z 32). No concreto de alta resistência também foi utilizada sílica ativa derivada do processo de produção do silício metálico ou de ligas de ferro silício.

Como agregado miúdo foram utilizadas duas areias naturais, de origem quartzosa, classificadas como areia fina e areia média. O agregado graúdo empregado foi uma brita de origem basáltica, com dimensão máxima característica de 19 mm.

Em todas as concretagens foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local. Para se alcançar a consistência desejada foi empregado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. No caso das misturas com fibras foram utilizados dois tipos de fibras como reforço do concreto: fibras de aço e macrofibras poliméricas. As fibras de aço possuíam seção transversal circular e ancoragem nas extremidades; já as macrofibras poliméricas eram constituídas de polipropileno e possuíam seção transversal retangular, formato reto e com ranhuras na superfície, de maneira que a ancoragem ocorria ao longo do seu comprimento. Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades das fibras utilizadas,

Tabela 1

Propriedades físicas e mecânicas das fibras utilizadas na pesquisa

Propriedade	Tipo de fibras	
	Fibras de aço	Macrofibras poliméricas
Massa específica (g/cm ³)	7,85	0,95
Comprimento (mm)	50	50
Fator de forma	45	75
Módulo de elasticidade (GPa)	210	7
Resistência à tração (MPa)	1115	550

Tabela 2

Consumo de materiais (em kg/m³ de concreto) para os traços de concreto de referência (sem fibras) utilizados na pesquisa

Material	Tipo de concreto	
	Concreto convencional (CCR)	Concreto de alta resistência (CARR)
Cimento	382	468
Sílica ativa	—	39
Brita	1032	936
Areia média	528	531
Areia fina	358	354
Água	180	164
Superplastificante	1,5	3,0

de acordo com dados fornecidos pelos fabricantes.

2.2 Dosagem e produção dos concretos

Na presente pesquisa foram elaborados dois traços de concreto: um traço para um concreto convencional, com resistência média à compressão aos 28 dias de idade ($f_{cm,28}$) de 40 MPa; e outro para um concreto de alta resistência, com $f_{cm,28}$ de 70 MPa. Como a relação água/cimento foi mantida constante, a consistência desejada para todas as misturas foi alcançada pelo ajuste do aditivo superplastificante. O abatimento foi fixado em (120 ± 20) mm para os dois concretos.

O traço em massa adotado para o concreto convencional de referência (sem fibras) foi 1: 2,30: 2,70: 0,47. Já no concreto de alta resistência de referência (sem fibras) foi utilizado o traço em massa 1: 1,70: 1,80: 0,35, com a sílica incorporada no teor de 10% em substituição volumétrica ao cimento. O consumo de materiais para os traços de concreto é apresentado na Tabela 2. Em ambos os traços, o agregado miúdo foi composto por 40% de areia fina e 60% de areia média.

Para a produção das misturas de concreto convencional e de alta resistência com fibras, tanto as fibras de aço quanto as macrofibras poliméricas foram adicionadas no teor de 1,0%, em volume, o que corresponde às dosagens de 78,5 kg/m³ para as fibras de aço e de 9,5 kg/m³ para as macrofibras poliméricas. Dessa forma, no total foram produzidas 6 misturas de concreto, variando-se a matriz cimentícia e o tipo de fibra.

Para a produção dos concretos foi adotado o mesmo procedimento de mistura para todos os concretos. Ao final da mistura a consistência do concreto era verificada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, prescrito pela NBR NM 67:1998 [5]. Caso o valor do abatimento estivesse dentro do intervalo estabelecido, procedia-se com a moldagem dos corpos de prova. Caso contrário, o abatimento era ajustado pelo superplastificante. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova eram desmoldados, transferidos para câmara úmida e submetidos à cura contínua até os 28 dias de idade, quando foram realizados os ensaios mecânicos.

2.3 Métodos de ensaio

A resistência à compressão foi determinada de acordo com as especificações da NBR 5739:2007 [6], utilizando uma máquina de ensaio hidráulica. Para analisar a tenacidade dos concretos foram realizados os ensaios de flexão em prismas e de punção em placas, além do ensaio Barcelona.

O ensaio Barcelona, também conhecido como ensaio de duplo punção, foi realizado de acordo com as recomendações da norma espanhola UNE 83515:2010 [7], adotando-se uma velocidade de deslocamento do pistão da máquina de 0,5 mm/min. Para o ensaio de flexão em prismas, foi empregado o procedimento prescrito pela norma japonesa JSCE-SF4 [8], com velocidade de deslocamento do pistão da máquina igual a 0,15 mm/min. Para o ensaio de punção em placas, utilizou-se a recomendação europeia EFNARC [9], com velocidade de deslocamento do pistão da máquina igual a 1,5 mm/min.

Para o resultado final de cada ensaio foi considerada a média referente aos resultados individuais obtidos nos corpos de prova, assim como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

Para verificar a influência dos fatores que afetam as diversas propriedades do concreto, foram realizadas análise de variância (ANOVA) e testes t de Student. Todos os testes estatísticos foram realizados considerando um nível de confiança de 95%, sendo a ANOVA usada para avaliar a relevância da adição de diferentes tipos e teores de fibras nas propriedades do concreto e o teste t de Student realizado para investigar quais os fatores responsáveis pelas alterações em tais propriedades. Detalhes da análise estatística realizada podem ser encontrados em Leite [10].

3. Resultados e discussões

3.1 Resistência à compressão

O valor da resistência média à compressão aos 28 dias de idade ($f_{cm,28}$), referente a cada mistura de concreto produzida, é apresentado na Tabela 3. Os valores correspondem à média de cinco resultados individuais obtidos em corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência houve um aumento da resistência à compressão com a adição de fibras. Apesar de alguns estudos serem contraditórios quanto ao efeito da adição de fibras na resistência à compressão do concreto, alguns autores afirmam que o concreto de alta resistência reforçado com fibras geralmente apresenta resistência à compressão maior em relação ao concreto sem fibras [11; 12]. De acordo com o *fib Model Code 2010* [3], as propriedades elásticas e a resistência à compressão do concreto não são alteradas significativamente com a adição de fibras, desde que sejam utilizados baixos teores. Song e Hawang [13] verificaram um aumento crescente da resistência à compressão de um concreto de alta resistência com a adição de fibras de aço até o teor de 1,5% em volume. Para teores superiores, o valor da resistência à compressão começou a diminuir.

No concreto convencional a mistura com macrofibras poliméricas apresentou a maior resistência à compressão, enquanto que no

Tabela 3

Valores do ensaio de resistência à compressão dos concretos estudados

Tipo de concreto	$f_{cm,28}$ (MPa)	
	Média	CV
CCR	41,66	1,42
CC10FA	42,63	4,65
CC10PP	44,08	3,73
CARR	70,24	3,64
CAR10FA	77,60	5,63
CAR10PP	73,52	1,60
Superplasticizer	1,5	3,0

concreto de alta resistência foi a amostra com fibras de aço que manifestou um maior valor de tal resistência. Esta situação é diferente da que foi verificada por Monte [14], cujo concreto convencional com macrofibras poliméricas apresentou valor de resistência à compressão significativamente menor do que a mistura com fibras de aço. Segundo a análise estatística [10], houve uma variação significativa da resistência à compressão com a adição de fibras apenas no concreto de alta resistência, o que pode ter sido ocasionado pela maior aderência entre as fibras e a matriz neste tipo de concreto. Além disso, verificou-se que a adição de fibras de aço foi o fator responsável pela variação significativa da resistência à compressão nesses concretos. De acordo com Mehta e Monteiro [15], a utilização de baixos e moderados teores de fibras deve exercer pequena influência no valor da resistência à compressão do concreto, com sua principal contribuição ocorrendo na tenacidade do compósito. As misturas com fibras com valores de resistência à compressão superiores aos dos concretos de referência podem ter apresentado comportamento *hardening* após a ruptura da matriz, com aumento da capacidade resistente do compósito. Para confirmar esta hipótese, seria necessária a curva carga *versus* deslocamen-

to dos concretos sob compressão; no entanto, a máquina de ensaio utilizada não fornecia tal dado para análise.

3.2 Ensaio Barcelona

O ensaio Barcelona, também conhecido como ensaio de duplo punção, foi realizado considerando três corpos de prova cilíndricos (com 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura) para cada mistura de concreto produzida. Os gráficos das curvas carga *versus* aumento do perímetro circunferencial da amostra (TCOD) obtidos no ensaio do concreto convencional e de alta resistência com fibras de aço e com macrofibras poliméricas são apresentados na Figura 1.

Nas misturas de concreto com fibras de aço, tanto convencional (Figura 1a) quanto de alta resistência (Figura 1c), a carga resistente se manteve constante até determinado TCOD, a partir do qual começou a apresentar redução dessa carga, caracterizando o comportamento *softening*. Já os concretos com macrofibras poliméricas manifestaram comportamento *softening* imediatamente após a ruptura da matriz (Figuras 1b e 1d). O fenômeno de instabilidade pós-pico foi praticamente inexistente nas amostras com fibras de

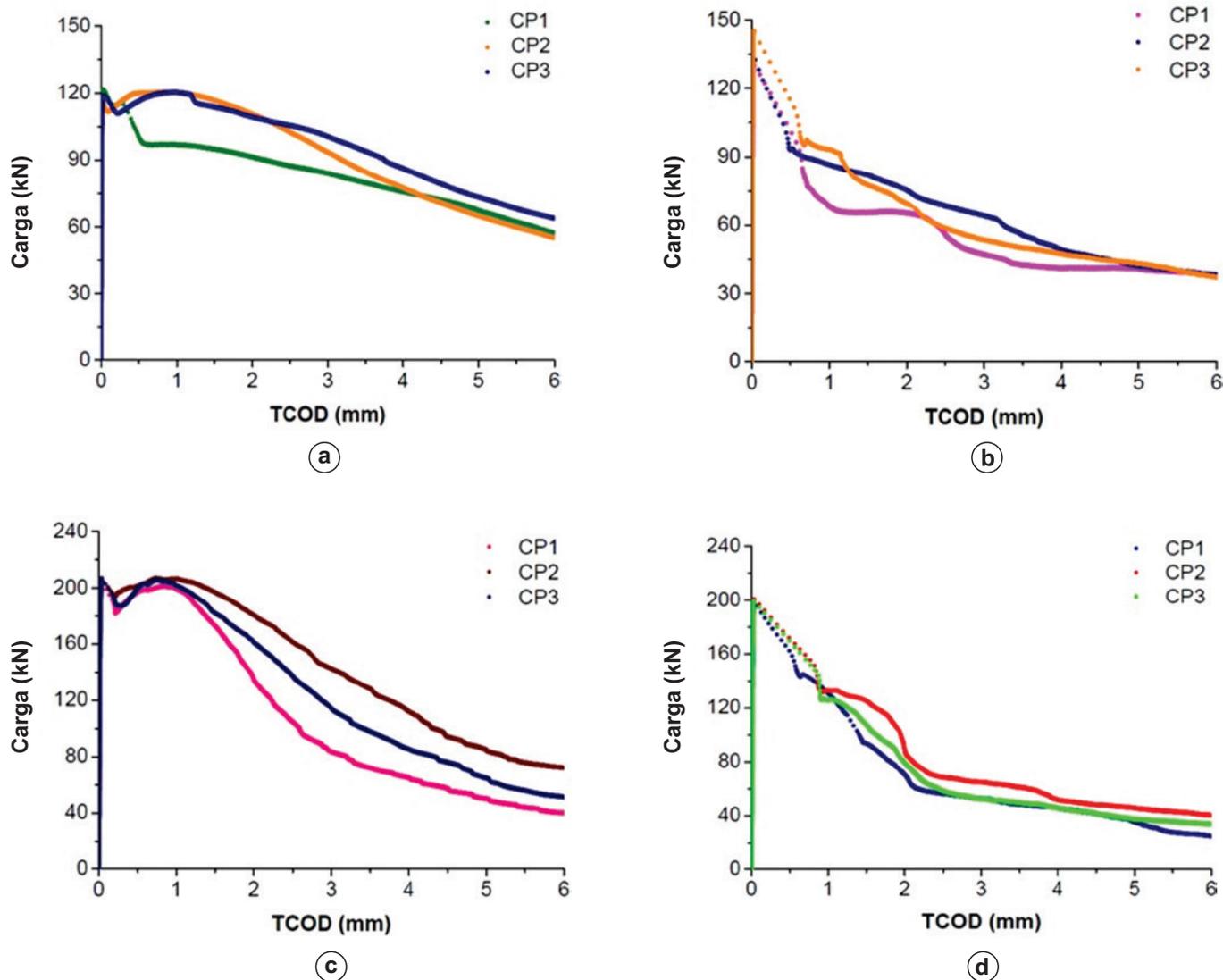


Figura 1 Ensaio Barcelona – curvas carga *versus* TCOD referentes às amostras de concreto convencional com (a) fibras de aço e (b) macrofibras poliméricas, e de concreto de alta resistência com (c) fibras de aço e (d) macrofibras poliméricas, com teor de fibras de 1%, em volume

Tabela 4

Resultados do ensaio Barcelona dos concretos estudados

Tipo de concreto	f_{ct} (MPa)		Tenacidade (J)		$f_{ct,TCOD=1,5}$ (MPa)		$f_{ct,TCOD=6}$ (MPa)	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
CCR	2,88	3,87	—	—	—	—	—	—
CC10FA	3,04	0,50	542,75	7,17	2,73	10,74	1,47	7,59
CC10PP	3,46	5,46	375,45	7,44	1,89	11,35	0,95	1,33
CARR	4,29	4,70	—	—	—	—	—	—
CAR10FA	5,19	0,55	750,90	14,20	4,63	6,57	1,37	30,00
CAR10PP	5,03	0,47	467,90	8,50	2,73	14,59	0,83	23,61

aço; já no concreto com macrofibras poliméricas foi observada tal instabilidade até valores de TCOd entre 0,5 mm e 1,0 mm.

Os resultados do ensaio Barcelona para todas as misturas de concreto estão dispostos na Tabela 4. Além da resistência à tração (f_{ct}) e da tenacidade até um TCOd de 6 mm, também é apresentada a resistência residual referente ao TCOd de 1,5 mm ($f_{ct,TCOD=1,5}$) e de 6 mm ($f_{ct,TCOD=6}$), correspondentes ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), respectivamente, conforme observado por Monte, Toaldo e Figueiredo [16].

As misturas de concreto com fibras apresentaram valores de resistência à tração maiores do que os concretos sem fibras. Tal variação ocorreu devido ao desempenho da matriz cimentícia, possuindo pouca influência das fibras neste aspecto, visto que nenhuma mistura apresentou comportamento *hardening*. No entanto, por meio da análise estatística [10], foi constatado que a adição de fibras modificou significativamente a resistência à tração dos concretos convencional e de alta resistência. Além disso, o tipo de fibra e a adição de macrofibras poliméricas adicionadas tiveram uma influência significativa na resistência à tração tanto do concreto convencional quanto do concreto de alta resistência. Por outro lado, no concreto convencional a adição de fibras de aço não provocou uma alteração significativa em tal resistência.

Com relação à tenacidade e à resistência residual no ELS e ELU, verificou-se que as amostras de concreto com fibras de aço, tanto convencional quanto de alta resistência, apresentaram valores destas propriedades superiores aos concretos com macrofibras

poliméricas (Tabela 4). De acordo com a análise estatística [10], houve uma variação significativa desses parâmetros com o tipo de fibras no concreto convencional, enquanto no concreto de alta resistência houve uma diferença significativa apenas na tenacidade e na resistência residual no ELS.

Tanto no concreto com fibras de aço quanto no concreto com macrofibras poliméricas foi verificado um acréscimo no valor da tenacidade e da resistência residual no ELS com a mudança da matriz cimentícia. Este aumento ocorreu devido à melhor aderência entre as fibras e a matriz cimentícia que acontece nos concretos de maiores resistências, conforme destacado por Figueiredo [2]. Devido a menor porosidade, a área de contato entre as fibras e a matriz no concreto de alta resistência é maior, contribuindo para a formação de uma ligação mais resistente, que reflete no comportamento mecânico do material [17].

De acordo com a análise estatística [10], a matriz cimentícia teve uma contribuição significativa para a tenacidade tanto do concreto com fibras de aço quanto do concreto com macrofibras poliméricas. Aumentando ainda mais a resistência do concreto, como utilização de um concreto de ultra-alta resistência, Abu-Lebdeh *et al.* [18] verificaram um aumento da absorção de energia em ensaios *pull-out*, indicando uma melhor aderência das fibras com a matriz. É interessante destacar que o concreto convencional com fibras de aço apresentou um valor de tenacidade superior e de resistência residual no ELS igual ao do concreto de alta resistência com macrofibras poliméricas, o que indica a menor eficiência destas fibras frente às fibras de aço mesmo melhorando as características da

Tabela 5

Teste *t* de *Student* para verificação da equivalência de desempenho entre as fibras considerando matrizes cimentícias diferentes

Método de ensaio	Parâmetro analisado	Tipo de concreto	Tipo de fibras	Teor de fibras	GL	<i>t</i>	<i>t</i> crítico	Diferença significativa?
Barcelona	Tenacidade	CC	Fibras de aço	1,0%	4	2,3294	2,7764	Não
		CAR	Macrofibras poliméricas	1,0%				
Flexão em prismas	Tenacidade	CC	Fibras de aço	1,0%	4	0,0192	2,7764	Não
		CAR	Macrofibras poliméricas	1,0%				
Flexão em prismas	Resistência residual no ELS	CC	Fibras de aço	1,0%	4	4,5327	2,7764	Sim
		CAR	Macrofibras poliméricas	1,0%				
Punção em placas	Carga máxima	CC	Fibras de aço	1,0%	4	-0,7869	2,7764	Não
		CAR	Macrofibras poliméricas	1,0%				
Punção em placas	Carga máxima	CC	Fibras de aço	1,0%	4	-0,5043	2,7764	Não
		CAR	Macrofibras poliméricas	1,0%				

matriz cimentícia e, conseqüentemente, a interação fibras-matriz. De acordo com o teste t de Student (Tabela 5), a diferença entre os valores de tenacidade é não significativa, o que sugere uma possível equivalência de desempenho entre as fibras alterando-se a matriz cimentícia na qual estão imersas.

Com a alteração do concreto convencional para o concreto de alta resistência foi observado uma redução da resistência residual no ELU tanto para a mistura com fibras de aço quanto com macrofibras poliméricas. Como há uma maior aderência entre as fibras e a matriz cimentícia no concreto de alta resistência, pode ter havido ruptura das fibras. A análise estatística indica que a alteração da matriz cimentícia é não significativa para este parâmetro.

3.3 Ensaio de flexão em prismas

O ensaio de flexão em prismas foi realizado considerando três corpos de prova prismáticos, com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm, para cada mistura de concreto produzida. A Figura 2 contém as curvas carga versus deslocamento vertical resultantes do ensaio de flexão em prismas de concreto convencional e de

alta resistência com fibras de aço e com macrofibras poliméricas. Para os concretos convencionais, no CC10FA (Figura 2a) predominou-se o comportamento *hardening* até o deslocamento vertical de 0,25 mm, quando começou a apresentar queda da carga resistente. Já no CC10PP (Figura 2b) foi verificado um comportamento inicial de *softening* e, após a redução da capacidade resistente devido à ruptura da matriz, tal concreto começou a apresentar um ganho da capacidade resistente com o aumento do deslocamento (*slip-hardening*). Este resultado também foi obtido em concretos convencionais (com resistência à compressão inferior a 50 MPa) avaliados por Monte, Toaldo e Figueiredo [16] e Salvador e Figueiredo [19], os quais atribuíram este comportamento ao desfibrilamento das fibras. Analisando o concreto convencional, apenas a amostra com macrofibras poliméricas apresentou instabilidade pós-pico.

No caso dos concretos de alta resistência, as curvas referentes ao CAR10FA (Figura 2c) apresentaram uma pequena instabilidade após a ruptura da matriz. Neste caso, a carga resistente pós-fissuração ficou aproximadamente constante e igual à carga de ruptura da matriz até o deslocamento vertical de 0,75 mm. Para valores de deslocamentos superiores, houve redução da carga

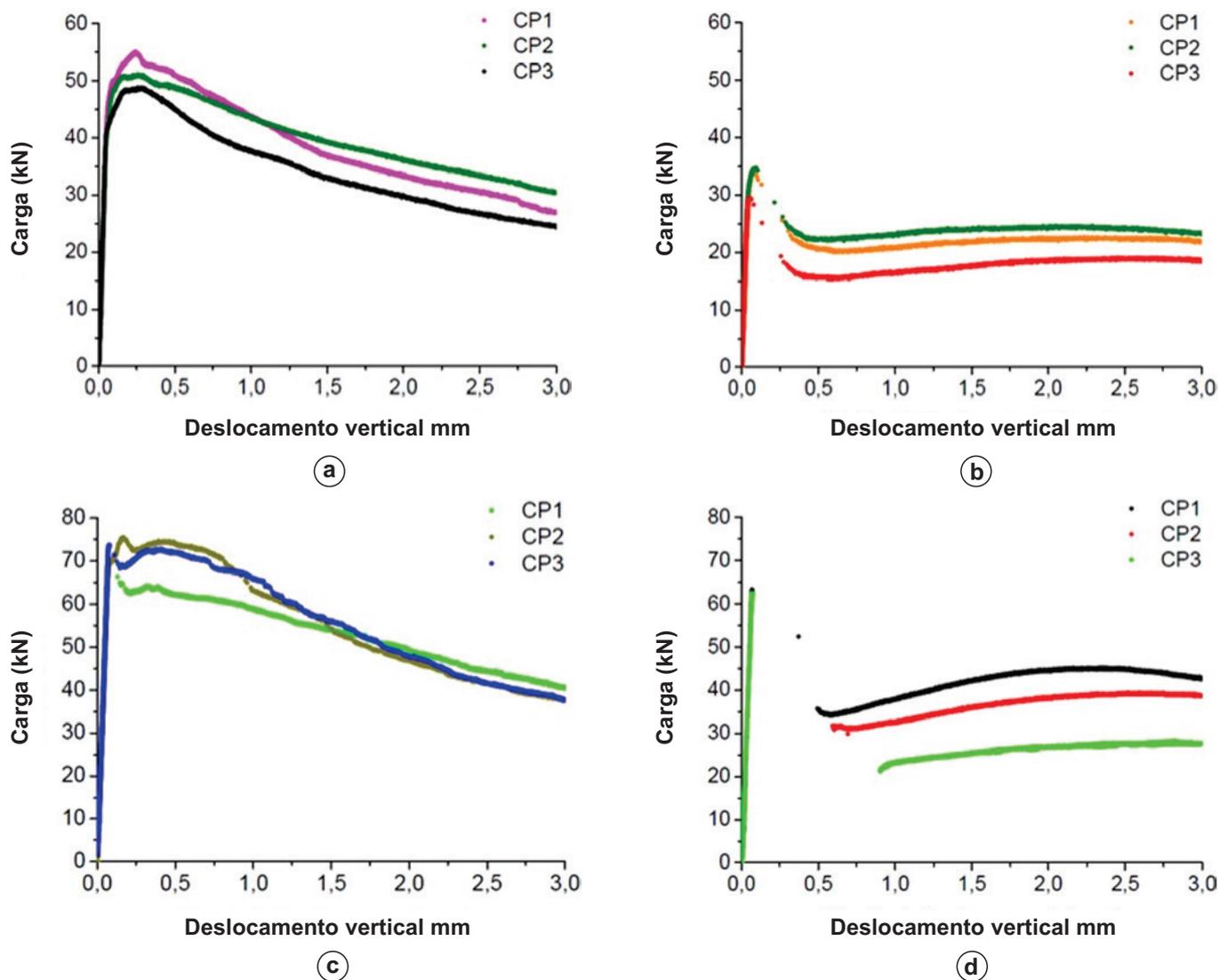


Figura 2

Ensaio de flexão em prismas – curvas carga versus deslocamento vertical referentes às amostras de concreto convencional com (a) fibras de aço e (b) macrofibras poliméricas, e de concreto de alta resistência com (c) fibras de aço e (d) macrofibras poliméricas, com teor de fibras de 1%, em volume

resistente, indicando um comportamento *softening*. As amostras do CAR10PP (Figura 2d) apresentaram a maior instabilidade pós-pico, a qual se estendeu até um deslocamento vertical de 1,0 mm em um dos prismas. É interessante destacar que, após o fim da instabilidade, houve um aumento da carga resistente com o incremento de deslocamento (*slip-hardening*) na mistura contendo macrofibras poliméricas.

Os resultados do ensaio de flexão em prismas para cada mistura de concreto estão dispostos na Tabela 6. Tais resultados incluem resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), fator de tenacidade ($\bar{\sigma}_b$) e resistência residual nos deslocamentos de 0,75 mm (σ_{600}^D) e de 3,00 mm (σ_{150}^D).

Na maioria dos concretos foi verificado um aumento da resistência à tração na flexão com a adição de fibras. No entanto, apenas a mistura CC10FA manifestou um comportamento *hardening*, com acréscimo da capacidade resistente após a ruptura da matriz. De acordo com a análise estatística [10], a adição de fibras provocou alterações significativas na resistência à tração tanto do concreto convencional quanto do concreto de alta resistência. Além disso, verificou-se que tanto o tipo quanto a presença de fibras tiveram uma influência significativa no valor de tal resistência. O concreto CC10FA, que manifestou comportamento *hardening*, apresentou um valor de resistência à tração na flexão 35,9% superior ao concreto de referência (CCR). Isto ocorreu devido ao fato de se ter utilizado um volume de fibras superior ao volume crítico.

O concreto de alta resistência com fibras de aço apresentou um valor de resistência à tração na flexão 22,8% superior ao concreto de alta resistência sem fibras (CAR). As fibras de aço com ancoragem nas extremidades têm uma contribuição mais relevante na resistência à tração na flexão comparadas a outros tipos de fibras, uma vez que a utilização de adições minerais promove uma maior aderência entre a matriz e as fibras de aço, refletindo no aumento de tal resistência. A adição de fibras sintéticas tem um maior efeito na absorção de energia e no controle da fissuração do que na carga máxima de suporte do concreto [12].

Com relação ao fator de tenacidade e à resistência residual no ELS e ELU, verificou-se que tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência, as misturas com fibras de aço apresentaram valores destas propriedades superiores às misturas com macrofibras poliméricas. A análise estatística dos resultados [10] confirmou a influência significativa do tipo de fibra no fator de tenacidade e resistência residual no ELS dos concretos convencional e de alta resistência, enquanto que a alteração da resistência residual no ELU foi considerada não significativa.

Com a alteração da matriz cimentícia de concreto convencional para concreto de alta resistência, os valores de tenacidade e de resistência residual (ELS e ELU) tiveram maiores aumentos percentuais no concreto com macrofibras poliméricas do que no concreto com fibras de aço. Segundo a análise estatística [10], a variação nos valores de tais propriedades devido à mudança da matriz cimentícia é considerada significativa tanto para o concreto com fibras de aço quanto para o concreto com macrofibras poliméricas. O aumento da resistência da ligação fibras-matriz provoca alterações consideráveis na resistência à tração na flexão e na energia absorvida do concreto reforçado com fibras [20; 21].

Os valores do fator de tenacidade e da resistência residual no ELS do concreto convencional com fibras de aço foram maiores do que os do concreto de alta resistência com macrofibras poliméricas. O teste t de *Student* (Tabela 5) indica que os resultados de fator de tenacidade são estatisticamente equivalentes, enquanto que a diferença entre os resultados de resistência residual no ELS é considerada significativa.

3.4 Ensaio de punção em placas

O ensaio de punção em placas foi realizado considerando três placas, com dimensões em planta de 600 mm x 600 mm e 100 mm de espessura, para cada mistura produzida. Na Figura 3 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento central obtidas no ensaio de placas de concreto convencional e de alta resistência reforçado com fibras de aço e com macrofibras poliméricas.

No concreto convencional com fibras de aço (Figura 3a) foi observado um aumento da capacidade resistente (*hardening*) após a ruptura da matriz. O aumento da carga resistente foi observado até o deslocamento central de 2,5 mm, a partir do qual foi observada a redução da carga. O fenômeno de instabilidade foi pouco perceptível neste concreto. Já no concreto convencional com macrofibras poliméricas (Figura 3b) o comportamento predominante foi de *slip-hardening*, sendo possível verificar sucessivas quedas e incrementos da capacidade resistente até o deslocamento central de 7,5 mm, a partir do qual iniciou-se a redução da carga. Em apenas uma das amostras do concreto CC10PP (Figura 3b) foi verificada instabilidade pós-pico.

Para o concreto de alta resistência, para a mistura produzida com fibras de aço (Figura 3c) foi verificado o comportamento *hardening*, com aumento da carga resistente até o deslocamento central de aproximadamente 5 mm. Após atingir a carga máxima, houve redução da capacidade resistente até o deslocamento final.

Tabela 6

Resultados do ensaio de tenacidade em prismas dos concretos estudados

Tipo de concreto	$f_{ct,f}$ (MPa)		$\bar{\sigma}_b$ (J)		σ_{600}^D (MPa)		σ_{150}^D (MPa)	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
CCR	5,07	1,34	—	—	—	—	—	—
CC10FA	6,89	6,05	5,01	7,72	5,97	8,26	3,64	11,17
CC10PP	4,37	8,66	2,87	14,39	2,59	16,87	2,82	11,70
CARR	7,97	2,49	—	—	—	—	—	—
CAR10FA	9,79	3,01	7,28	2,36	8,91	7,89	5,14	4,29
CAR10PP	8,36	0,80	5,00	16,74	4,23	10,55	4,83	21,23

Tabela 7

Resultados do ensaio de tenacidade em placas dos concretos estudados

Tipo de concreto	Carga máxima (kN)		Tenacidade (J)	
	Média	CV	Média	CV
CCR	46,32	25,75	—	—
CC10FA	102,37	2,11	1679,83	2,59
CC10PP	68,27	13,13	1277,61	18,72
CARR	83,17	8,42	—	—
CAR10FA	171,66	11,48	2481,19	9,95
CAR10PP	107,23	9,77	1795,41	21,98

A instabilidade pós-pico foi inexistente neste concreto. Já a amostra de alta resistência com macrofibras poliméricas (Figura 3d) apresentou oscilações no valor da carga resistente após a ruptura da matriz cimentícia, sendo predominante o comportamento de *slip-hardening*. Figueiredo [2] atribui estas oscilações à formação de múltiplas fissuras que ocorre em pequenos deslocamentos e cuja quantidade se estabiliza em determinado momento. Neste concreto, a carga máxima foi atingida com o deslocamento central de aproximadamente 7,5 mm e houve a ocorrência de instabilidade pós-pico. Com relação aos valores de carga máxima, os resultados obtidos no ensaio de tenacidade em placas são apresentados na Tabela 7. Verifica-se que a adição de fibras provocou aumento no valor da carga máxima dos concretos, com predominância de comportamento *hardening* e *slip-hardening*. De acordo com a análise estatísti-

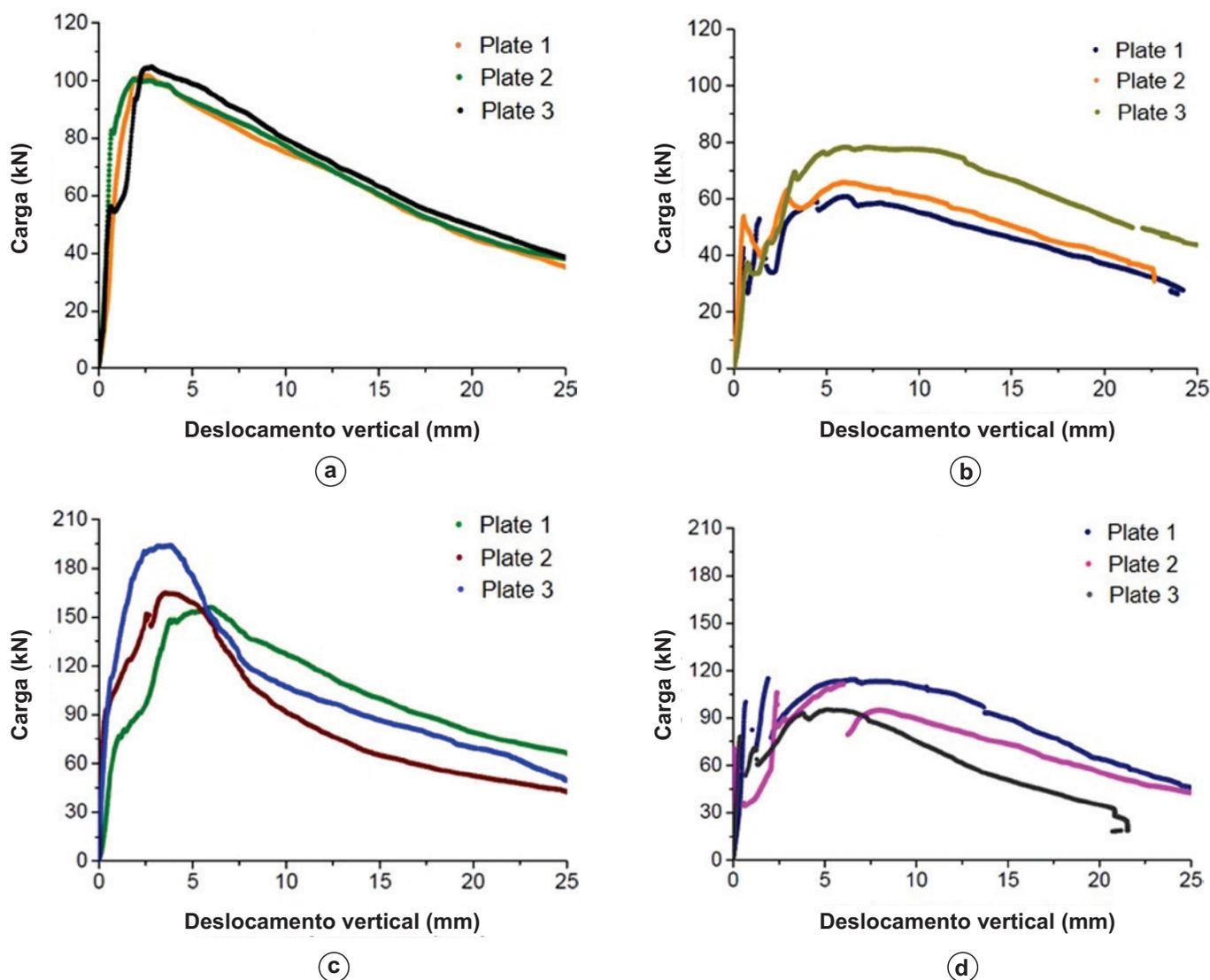


Figura 3

Ensaio de punção em placas – curvas carga versus deslocamento central referentes às amostras de concreto convencional com (a) fibras de aço e (b) macrofibras poliméricas, e de concreto de alta resistência com (c) fibras de aço e (d) macrofibras poliméricas, com teor de fibras de 1%, em volume

ca [10], a adição de fibras provocou alterações significativas no valor da carga máxima dos concretos convencional e de alta resistência. As amostras com fibras de aço e com macrofibras poliméricas manifestaram comportamento *hardening* e *slip-hardening*, respectivamente, o que contribuiu para apresentarem uma carga máxima superior a dos concretos de referência (CCR e CARR). Além disso, verificou-se que a variação da carga máxima do concreto com adição de fibras de aço é considerada significativa tanto para o concreto convencional quanto para o concreto de alta resistência. Já a adição de macrofibras poliméricas teve uma influência significativa da carga máxima apenas do concreto de alta resistência.

O concreto com fibras de aço apresentou carga máxima superior a do concreto com macrofibras poliméricas em ambas as matrizes cimentícias analisadas. A análise estatística dos dados indica uma influência significativa do tipo de fibras no valor da carga máxima do concreto [10].

Com relação à tenacidade, assim como a carga máxima, os valores dessa propriedade obtidos na mistura com fibras de aço foram maiores do que os da mistura com macrofibras poliméricas tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência (Tabela 7). No entanto, de acordo com a análise estatística [10], houve uma diferença significativa entre o desempenho das duas fibras apenas no concreto convencional.

O aumento percentual da tenacidade devido à mudança da matriz cimentícia foi mais relevante para o concreto com fibras de aço do que para o concreto com macrofibras poliméricas. De acordo com a análise estatística [10], a alteração da matriz cimentícia teve uma influência significativa no valor da tenacidade apenas para o caso do concreto com fibras de aço.

Devido ao efeito *hardening*, tanto a carga máxima quanto a tenacidade do concreto convencional com fibras de aço ficou próximo dos valores dessas propriedades obtidos no concreto de alta resistência com macrofibras poliméricas. O teste t de *Student* (Tabela 5) confirma que tais resultados são estatisticamente equivalentes, sugerindo uma equivalência de desempenho entre as fibras com a alteração da matriz cimentícia.

4. Conclusões

Neste artigo foi avaliada a influência da matriz cimentícia nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com diferentes tipos de fibras. Assim, foram analisadas misturas de concretos convencional e de alta resistência, sem fibras e contendo fibras de aço ou macrofibras poliméricas.

A trabalhabilidade desejada não foi obtida na maioria das misturas de concreto convencional com fibras, mesmo com o aumento do teor de aditivo superplastificante. Com a alteração da matriz cimentícia para um concreto de alta resistência e com maior teor de argamassa na mistura, foi possível alcançar a consistência requerida, indicando que, em alguns casos, torna-se necessário modificar a matriz cimentícia, e não apenas adicionar aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade da mistura.

Quanto à resistência à compressão, somente o concreto de alta resistência apresentou variação significativa dessa propriedade de mecânica com a adição de fibras, sendo a adição de fibras de aço o fator responsável por tal variação. No concreto de alta

resistência há uma maior aderência entre as fibras e a matriz, o que pode ter ocasionado tal resultado.

Tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade em placas não houve alteração do padrão de comportamento das misturas com a mudança da matriz cimentícia. Apenas no ensaio de tenacidade em prismas, o concreto reforçado com fibras de aço deixou de apresentar comportamento *hardening* para apresentar comportamento *softening* com alteração da matriz cimentícia. Além disso, as misturas apresentaram comportamentos diferentes de acordo com o ensaio realizado. Enquanto no ensaio Barcelona o comportamento predominante foi de *softening*, no ensaio de tenacidade predominaram os comportamentos de *hardening* e *slip-hardening*. Os valores de resistência à tração e de carga máxima apresentaram variações significativas com a adição de fibras, inclusive no caso das misturas que manifestaram comportamento *softening*. Isto pode ter sido provocado pelo prejuízo na homogeneidade decorrente da adição de fibras.

A tenacidade, tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de flexão em prismas, teve uma alteração significativa com a mudança da matriz cimentícia dos concretos com fibras. No caso do ensaio de tenacidade em placas, apenas a mistura com fibras de aço apresentou um aumento significativo de tenacidade ao utilizar um concreto de alta resistência.

As resistências residuais no ELS do ensaio Barcelona e de tenacidade em prismas apresentaram influência significativa da matriz cimentícia. Com relação à resistência residual no ELU, apenas no ensaio de flexão foi verificada variação significativa dessa propriedade, indicando que a alteração da matriz cimentícia no concreto reforçado com fibras pode não ser eficaz no aumento da resistência residual em maiores deslocamentos dependendo do ensaio realizado.

É importante destacar que foram obtidos valores de tenacidade estatisticamente equivalentes para o concreto convencional com fibras de aço e o concreto de alta resistência com macrofibras poliméricas. Tais resultados sugerem uma equivalência de desempenho entre as fibras, além de indicar uma menor eficiência das macrofibras poliméricas frente às fibras de aço neste aspecto.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de pesquisa, e às empresas Votorantim Cimentos, Grace Construction Products, Tecnosil e Belgo Bekaert Arames, pelos materiais utilizados na pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- [1] DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, v.42, n.9, 2009, p.1261-1281.
- [2] FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras, São Paulo, 2011, Tese (Livro-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 248 p.
- [3] INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE – FIB. Model Code 2010: First complete draft – Bulletin 55. Germany: Document Competence Center Siegmund Kästl e.K., 2010, 292 p.

- [4] THE CONCRETE SOCIETY. Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete. Trowbridge: Cromwell Press, 2007. 76 p.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. – NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. – NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007.
- [7] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN – AENOR. Hormigones con fibras - Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – Método Barcelona. – UNE 83515, Barcelona, 2010.
- [8] THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – JSCE. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. – JSCE-SF4, Tokyo, 1984.
- [9] EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES – EFNARC. European Specification for Sprayed Concrete. Farnham, 1996.
- [10] LEITE, A. M. Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais. São Carlos, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 257 p.
- [11] MENDOZA, C. J.; AIRE, C.; DAVILA, P. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, v.2, n.2, 2011, p.5-47.
- [12] AFROUGHSABET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. Journal of Materials Science, v. 51, n. 14, 2016, p. 6517-6551.
- [13] SONG, P.S; HAWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fibre-reinforced concrete. Construction and Building Materials, v.18, n.9, 2004, p. 669-673.
- [14] MONTE, R. Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos. São Paulo, Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 159 p.
- [15] MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais, São Paulo: Ibracon, 4ed, 2014. 751 p.
- [16] MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. Revista Matéria, v.19, n.2, 2014, p. 132-149.
- [17] BUTTIGNOL, T. E. T; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. Ibracon Structures and Materials Journal, v. 10, n. 4, 2017, p. 957-971.
- [18] ABU-LEBDEH, T.; HAMOUSH, S.; HEARD, W.; ZORNIG, B. Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. Construction and Building Materials, v.25, n.1, 2011, p. 39-46.
- [19] SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibras de aço. Revista Matéria, v.18, n.2, 2013, p. 1273-1285.
- [20] GRAY, R. J.; Johnston, C. D. The influence of fibre-matrix interfacial bond strength on the mechanical properties of steel fibre reinforced mortars. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v.9, n.1, 1987, p. 43-55.
- [21] ABBAS, Y. M.; KHAN, M. I. Fiber–Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review. Arabian Journal for Science and Engineering, v.41, n.4, p. 1183-1198.