

## Influência da adição de macrofibra polimérica no comportamento mecânico de concretos de alta resistência

Alex Macêdo Leite<sup>(1)</sup> y Alessandra Lorenzetti de Castro<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5313>

### RESUMO

O concreto simples possui um comportamento frágil. Esta deficiência pode ser minimizada com a adição de fibras ao concreto, o que promove um aumento da ductilidade do compósito, sendo ainda mais relevante em concretos com elevada resistência, cuja ruptura ocorre de forma catastrófica. Recentemente, macrofibras poliméricas vêm sendo utilizadas no reforço primário do concreto, assim como as fibras metálicas, com o seu desempenho no concreto estrutural tornando-se o escopo em pesquisas correntes. Desta forma, este artigo busca avaliar a influência da adição de macrofibra polimérica nas propriedades mecânicas de concretos de alta resistência. Para isto, foi realizado um estudo experimental, no qual foram adicionadas fibras metálicas e macrofibras poliméricas em teores de 1,0% e 2,0%, em volume, em um concreto com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 70 MPa. O comportamento mecânico dos concretos foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à compressão, Barcelona e de tenacidade à flexão. As amostras com macrofibras poliméricas apresentaram instabilidade pós-fissuração da matriz, devido à sua baixa rigidez. Enquanto no ensaio Barcelona as macrofibras poliméricas apresentaram redução da carga resistente com o aumento do deslocamento, no ensaio de tenacidade em prismas houve um aumento da capacidade resistente em maiores deslocamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** fibras metálicas; macrofibra polimérica; concreto de alta resistência; propriedades mecânicas; tenacidade.

### 1. INTRODUÇÃO

O concreto simples é considerado um material frágil e que possui capacidade resistente limitada após a fissuração de sua matriz cimentícia. Uma das formas de minimizar essa deficiência é por meio da adição de fibras. No momento em que se inicia a fissuração do concreto, as fibras atuam como ponte de transferência de tensão, dificultando a propagação das fissuras e oferecendo uma maior ductilidade e resistência pós-fissuração (1). Desta forma, o concreto com fibras vem sendo utilizado para diversas finalidades, principalmente

em elementos de grande área, nos quais a carga atuante é distribuída, sem esforços concentrados, como pisos, pavimentos, revestimentos de túneis, entres outros (2, 3).

Muitas vezes, busca-se utilizar o concreto de alta resistência com a finalidade de diminuir a área de seção transversal dos elementos estruturais. Porém, concretos de resistências mais elevadas possuem uma matriz cimentícia mais frágil, com ruptura ocorrendo de modo mais catastrófico. Com a adição de fibras, dificulta-se a ocorrência de uma ruptura catastrófica, impedindo que a amostra se desfaça em várias partes no momento da ruptura (4).

As fibras de aço são as mais utilizadas para reforço primário do concreto, devido à sua maior rigidez, proporcionando capacidade resistente pós-fissuração ao compósito. Já as fibras poliméricas são geralmente adotadas como reforço secundário, atuando no controle da fissuração por retração plástica do concreto (5). As macrofibras poliméricas possuem um maior comprimento quando comparadas às fibras poliméricas convencionais, atuando principalmente no reforço primário do concreto, como as fibras metálicas.

Por se tratar de uma fibra que surgiu no mercado mais recentemente, estudos relacionados ao comportamento de concretos com macrofibras poliméricas ainda são escassos, especialmente para aqueles de alta resistência. Assim, no presente estudo, foram analisadas as propriedades mecânicas de um concreto de alta resistência contendo teores de 1,0% e 2,0%, em volume, de macrofibra polimérica. As propriedades avaliadas foram a resistência à compressão, resistência à fissuração, tenacidade e a resistência residual à tração por meio do ensaio de duplo puncionamento, além da tenacidade e resistência à tração na flexão.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais**

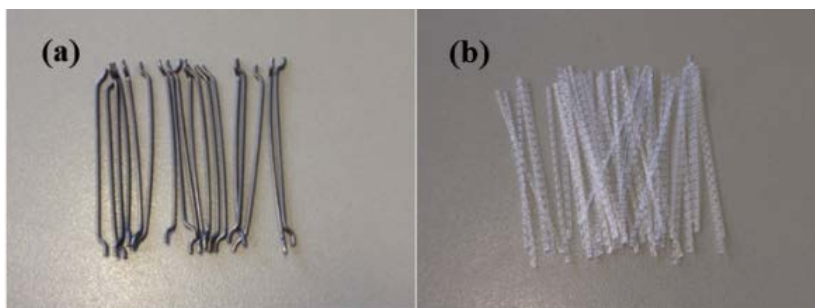
Na produção do concreto de alta resistência, foram utilizados cimento Portland composto com pozolana (CPII Z 32), areia natural com granulometria média e fina, brita de origem basáltica (dimensão máxima característica de 19 mm), sílica ativa e água (proveniente da rede de abastecimento local).

O traço em massa adotado para o concreto de referência (sem fibra) foi 1: 1,70: 1,80: 0,35, sendo a fração de agregado miúdo composta por 60% de areia média e 40% de areia fina, em massa. A sílica foi incorporada em substituição volumétrica ao cimento, no teor de 10%. Para se alcançar a consistência desejada (abatimento de 120 mm  $\pm$  20 mm), foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. O consumo de materiais do traço de concreto de referência é apresentado no Quadro 1.

Para a produção dos traços de concreto com fibras, foram utilizadas fibras de aço (Fig. 1a) e macrofibras poliméricas (Fig. 1b). Ambas as fibras foram adicionadas em teores de 1,0% e 2,0% em volume, o que corresponde, respectivamente, a dosagens de 78,5 kg/m<sup>3</sup> e 157 kg/m<sup>3</sup> para as fibras de aço e de 9 kg/m<sup>3</sup> e 18 kg/m<sup>3</sup> para as macrofibras poliméricas. As principais propriedades dos dois tipos de fibras estão dispostas no Quadro 2.

**Quadro 1.** Consumo de materiais para o traço de concreto de referência (sem fibra).

<i>Material</i>	<i>Consumo (kg/m<sup>3</sup>)</i>
Cimento	468,2
Brita	936,3
Areia média	530,6
Areia fina	353,7
Sílica ativa	38,7
Água	163,9
Aditivo superplastificante	3,0

**Figura 1.** Fibras utilizadas na pesquisa: (a) fibra de aço e (b) macrofibra polimérica.**Quadro 2.** Propriedades físicas e mecânicas das fibras (dados dos fabricantes).

<i>Propriedade</i>	<i>Fibra de aço</i>	<i>Macrofibra polimérica</i>
Comprimento (mm)	50	50
Fator de forma	45	75
Módulo de elasticidade (GPa)	210	7
Resistência à tração (MPa)	1115	550

## 2.2 Métodos de ensaio

Para avaliar a influência da adição de fibras no desempenho mecânico do concreto, realizou-se ensaios de resistência à compressão, Barcelona e de tenacidade à flexão. Todas as amostras foram submetidas à cura contínua, permanecendo na câmara úmida até os 28 dias de idade, quando foram retiradas e submetidas aos respectivos ensaios.

Os ensaios de resistência à compressão foram executados de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 5739:2007 (6). Para isso, foram ensaiados 5 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 mm x 200 mm, para cada mistura de concreto. Para o resultado final foi considerada a média corresponde aos resultados individuais obtidos nos corpos de prova, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

No ensaio Barcelona, corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 150 mm x 150 mm, foram submetidos ao duplo punção e, com um extensômetro de circunferência, foi medido o aumento do perímetro circunferencial (TCOD) de cada amostra durante a aplicação da carga. A partir deste ensaio, determinou-se a resistência à tração, a resistência residual à tração e a tenacidade dos concretos com fibras, sendo esta última obtida por meio da área sob a curva carga *versus* aumento perimetral ou carga *versus* deslocamento do pistão. O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento prescrito pela norma espanhola UNE 83515 (2010) (7).

No ensaio de tenacidade à flexão, adotou-se o procedimento prescrito pela norma japonesa JSCE-SF4 (1984) (8), sendo ensaiados prismas à flexão em um sistema aberto, com a velocidade de carregamento controlada pelo deslocamento do pistão. Assim, prismas com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm, com vão livre de 450 mm, foram submetidos ao ensaio de flexão a 4 pontos até se obter um deslocamento no meio do vão igual a 3 mm. Por meio da curva carga *versus* deslocamento, foram determinadas a resistência à tração na flexão e a resistência residual para os deslocamentos iguais a L/600 e L/150. Além disso, também foi possível calcular o fator de tenacidade à flexão.

Tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade à flexão foram utilizados 3 corpos de prova por mistura de concreto. Para o resultado final de cada ensaio foi considerada a média correspondente aos resultados individuais obtidos nos corpos de prova, bem como o coeficiente de variação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão para as diferentes misturas de concretos produzidas, realizados aos 28 dias de idade, estão dispostos no Quadro 3.

**Quadro 3.** Resultados do ensaio de resistência à compressão.

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Teor (%)</i>	<i>f<sub>cm28</sub> (MPa)</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Coefficiente de variação (%)</i>
Sem fibra	-	70,2	2,6	3,6
Fibra de aço	1,0	77,6	4,4	5,6
	2,0	83,1	2,4	2,8
Macrofibra polimérica	1,0	74,7	2,8	3,8
	2,0	65,2	2,4	3,7

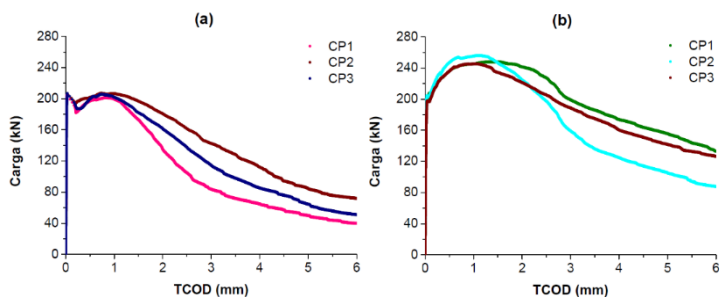
Nota:  $f_{cm28}$  = resistência média à compressão aos 28 dias.

Os valores de resistência à compressão das misturas apresentaram pequena variação com a adição de fibras. De acordo com Mehta e Monteiro (9), a utilização de baixos e moderados teores de fibra deve exercer pequena influência no valor da resistência à compressão do concreto, com sua principal contribuição ocorrendo na tenacidade do compósito. Enquanto a utilização de teores de 1,0% e 2,0% de fibra de aço resultaram no aumento da resistência

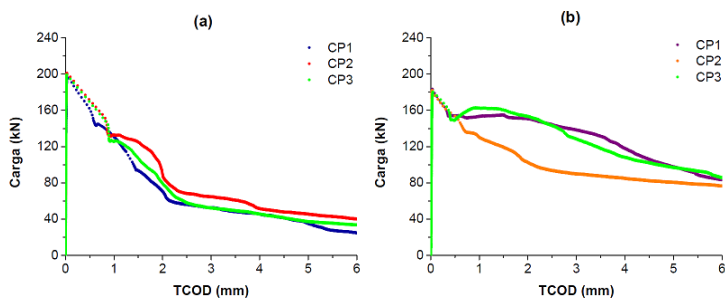
à compressão da ordem de, respectivamente, 10% e 18% em relação à mistura sem fibra, a adição de 1,0% de macrofibra polimérica ocasionou um pequeno aumento da resistência (7%), porém no teor de 2,0% ocorreu uma redução de 7% no valor da resistência.

### 3.2 Ensaio Barcelona

Os gráficos das curvas carga *versus* TCOD obtidos no ensaio Barcelona, referentes às amostras de concreto com fibras de aço, são apresentados na Fig. 2. Já na Figura 3 são exibidos os resultados das amostras de concreto contendo macrofibras poliméricas.



**Figura 2.** Curvas carga *versus* TCOD referentes às amostras de concreto com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.



**Figura 3.** Curvas carga *versus* TCOD referentes às amostras de concreto com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.

No concreto com 1,0% de fibra de aço (Fig. 2a), a capacidade resistente se manteve constante e aproximadamente igual à carga de ruptura da matriz até um TCOD de 1 mm. Com o aumento do TCOD, o compósito começou a apresentar redução da capacidade de suporte (*softening*). Além disto, foi observada uma pequena instabilidade no início da fissuração. Esta instabilidade, perceptível pelo distanciamento entre os pontos da curva, foi inexistente na mistura com 2,0% de fibra de aço (Fig. 2b), que apresentaram aumento da carga resistente pós-fissuração, caracterizando o comportamento *hardening*. Para valores maiores de TCOD houve redução da capacidade resistente.

Nas amostras de concreto com macrofibra polimérica verificou-se a ocorrência de instabilidade pós-pico e de comportamento *softening*, com redução da carga resistente pós-fissuração. A maior instabilidade aconteceu com a utilização de teores mais baixos de fibra. Tal fenômeno se manifestou até um TCOd de 1,0 mm e de 0,5 mm nas misturas com teores de 1,0% (Fig. 3a) e de 2,0% (Fig. 3b) de macrofibra polimérica, respectivamente.

O Quadro 4 contém os valores de resistência à tração ( $f_{ct}$ ), de tenacidade até um TCOd de 6,0 mm e de resistência residual referente ao TCOd de 6,0 mm ( $f_{ct,TCOD=6}$ ), obtidos no ensaio Barcelona, para as diferentes misturas de concreto.

**Quadro 4.** Resultados do ensaio Barcelona.

Tipo de fibra	Teor (%)	$f_{ct}$ (MPa)		Tenacidade (kN.mm)		$f_{ct,TCOD=6}$ (MPa)	
		Média	CV	Média	CV	Média	CV
Sem fibra	-	4,29	4,7	-	-	-	-
Fibra de aço	1,0	5,19	0,55	750,9	14,2	1,37	30
	2,0	6,29	2,18	1114,8	7,6	2,91	21
Macrofibra polimérica	1,0	5,03	0,47	467,9	8,5	0,83	23,61
	2,0	4,58	0,89	722,5	13,3	2,06	5,78

Nota: CV = coeficiente de variação, em %.

A resistência à tração da mistura com 2,0% de fibra de aço foi a mais afetada pela adição de fibras, sendo observado um comportamento *hardening*, com uma carga de pico superior à carga de ruptura da matriz cimentícia. Neste caso, houve um aumento de quase 50% no valor do  $f_{ct}$  quando comparado ao desempenho do concreto sem fibras.

A adição de 2,0% de fibra de aço e de macrofibra polimérica resultou em um aumento de tenacidade da ordem de 48,5% e de 54,4%, respectivamente, em relação ao concreto com 1,0% de cada fibra. Os valores de tenacidade obtidos para as misturas com 1,0% de fibra de aço e 2,0% de macrofibra polimérica ficaram próximos, o que pode indicar uma proporção de equivalência de desempenho entre os dois tipos de fibras para esta propriedade. Quando são analisados teores iguais das duas fibras, o concreto com macrofibra polimérica apresentou 62,3% e 64,8% do valor da tenacidade do concreto com fibra de aço para os teores de 1,0% e 2,0%, respectivamente.

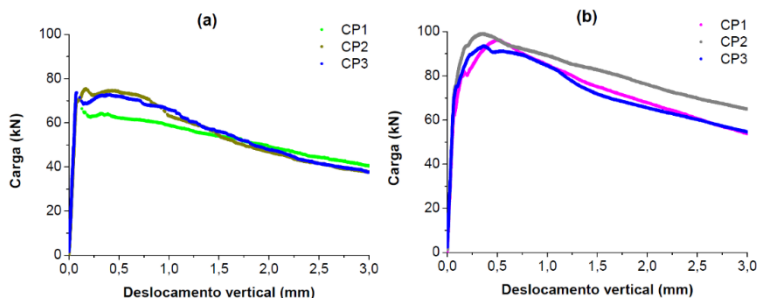
Houve um aumento de resistência residual da ordem de 112% para a fibra de aço e de 148% para a macrofibra polimérica quando dobrou-se o teor de fibras utilizado no concreto. Ao comparar resultados de resistência residual referentes a teores iguais para as duas fibras, verificou-se que o concreto com macrofibra polimérica apresentou 60,6% e 70,8% do valor da resistência residual da amostra que possuía fibra de aço para os teores de 1,0% e 2,0%, respectivamente. Desta forma, para maiores teores de fibras, a resistência residual oferecida pela macrofibra polimérica se aproxima da resistência obtida com a fibra de aço.

Pelo Quadro 4 é possível perceber que as amostras que apresentaram maiores valores de tenacidade não necessariamente possuíram maiores resistências residuais. O concreto com

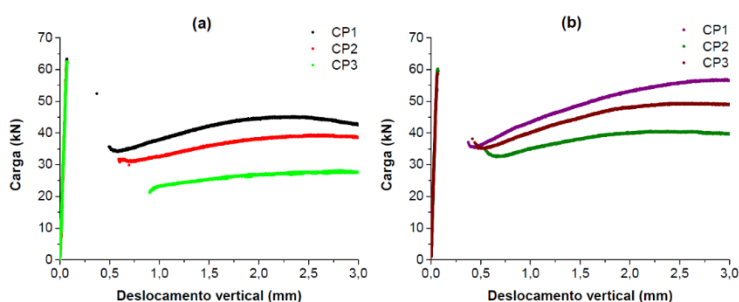
1,0% de fibra de aço, por exemplo, apresentou valor de tenacidade superior ao do concreto com 2,0% de macrofibra polimérica, apesar de possuir menor resistência residual. Como a tenacidade inclui toda a área sob a curva carga *versus* TCO, uma parcela significativa do seu valor é referente ao comportamento do compósito imediatamente após o início da fissuração. A maior contribuição das fibras de aço ocorre neste estágio e, à medida que a fissuração aumenta, estas fibras começam a escorregar e sua capacidade resistente diminui. Já as macrofibras poliméricas geralmente oferecem uma carga resistente superior às fibras de aço em maiores deformações, devido à sua menor rigidez (5).

### 3.3 Ensaio de tenacidade em prismas

As curvas carga *versus* deslocamento vertical obtidas no ensaio de tenacidade em amostras de concreto com fibra de aço e macrofibra polimérica estão dispostas na Fig. 4 e na Fig. 5, respectivamente.



**Figura 4.** Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.



**Figura 5.** Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.

As curvas referentes às amostras com teor de 1,0% de fibra de aço (Fig. 4a) 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 resistente, indicando um comportamento *softening*. Já no caso do concreto

com 2,0% de fibra de aço (Fig. 4b), a instabilidade foi inexistente e o compósito apresentou aumento da capacidade resistente (*hardening*) até um deslocamento vertical de 0,5 mm, a partir do qual começou a haver redução da carga resistente.

As amostras com teor de 1,0% de macrofibra polimérica (Fig. 5a) apresentaram a maior instabilidade pós-pico, a qual se estendeu até um deslocamento vertical de 1,0 mm em um dos prismas ensaiados. No concreto com 2,0% de macrofibra polimérica (Fig. 5b), o trecho de instabilidade foi encerrado no deslocamento de 0,5 mm. É interessante destacar que, após o fim da instabilidade, houve um aumento da carga resistente com o incremento de deslocamento (*slip-hardening*) nas duas misturas contendo macrofibra polimérica. Este resultado também foi obtido em concretos convencionais (com resistência à compressão inferior a 50 MPa) por Salvador e Figueiredo (5) e Monte, Toaldo e Figueiredo (10), os quais atribuíram este comportamento ao desfibrilamento das fibras.

A instabilidade observada em algumas amostras, tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade à flexão, ocorreu devido à utilização de um sistema aberto de controle de velocidade de carregamento. Quando são utilizados baixos teores de fibras ou fibras de menor rigidez, essa instabilidade é mais pronunciada (10).

É importante ressaltar que uma mesma mistura de concreto pode apresentar comportamentos distintos dependendo do ensaio realizado. As misturas contendo macrofibra polimérica, por exemplo, apresentaram apenas comportamento *softening* no ensaio Barcelona, enquanto no ensaio de tenacidade desenvolveram comportamento *slip-hardening*. Cada ensaio possui uma distribuição de deformações específica, o que influencia no desempenho do material (11).

No Quadro 5 são apresentados os valores de resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ), de fator de tenacidade ( $\bar{\sigma}_b$ ) à flexão e de resistência residual nos deslocamentos de 0,75 mm ( $\sigma_{600}^D$ ) e de 3,00 mm ( $\sigma_{150}^D$ ), obtidos no ensaio de tenacidade à flexão.

**Quadro 5.** Resultados do ensaio de tenacidade em prismas.

Tipo de fibra	Teor (%)	$f_{ct,f}$ (MPa)		$\bar{\sigma}_b$ (MPa)		$\sigma_{600}^D$ (MPa)		$\sigma_{150}^D$ (MPa)	
		Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
Sem fibra	-	7,97	2,49	-	-	-	-	-	-
Fibra de aço	1,0	9,79	3,01	7,28	2,36	8,91	7,89	5,14	4,29
	2,0	12,85	2,85	10,09	5,75	12,06	1,49	7,69	10,93
Macrofibra polimérica	1,0	8,36	0,80	5,00	16,74	4,23	10,55	4,83	21,23
	2,0	7,82	2,83	5,89	10,05	4,91	9,82	6,46	17,31

Nota: CV = coeficiente de variação, em %.

O valor da resistência à tração na flexão ficou praticamente inalterado com a adição de macrofibra polimérica. Já nas amostras com fibra de aço foram obtidas resistências à tração superiores à resistência do concreto sem fibras. Devido ao comportamento *hardening* no



início da fissuração, a amostra com 2,0% de fibra de aço apresentou uma resistência aproximadamente 60% maior do que o concreto sem fibras.

A adição do dobro da quantidade de fibras ocasionou um aumento do fator de tenacidade da ordem de 38,6% e de 17,8% para as fibras de aço e macrofibra polimérica, respectivamente, em relação ao resultado obtido com teor de 1,0% de fibras. Com isso, a utilização de um maior teor de fibras mostrou resultados mais eficazes quando o material adotado foi o aço. É importante destacar que, mesmo utilizando um menor teor de fibra de aço, foi obtido um fator de tenacidade superior ao da mistura com maior quantidade de macrofibra polimérica.

As fibras de aço ofereceram maiores resistências residuais em relação às macrofibras poliméricas, considerando iguais teores de fibra. Essa diferença foi mais significativa nas resistências referentes ao deslocamento vertical de 0,75 mm, já que a maior absorção de energia pelas fibras de aço acontece em deslocamentos mais baixos, enquanto que para as macrofibras poliméricas essa maior absorção ocorre em maiores deslocamentos (5).

Diferente da fibra de aço, que apresentou redução da resistência residual com o aumento do deslocamento, a macrofibra polimérica contribuiu para o aumento da resistência residual do compósito com o acréscimo de deslocamento, devido ao encruamento das fibras, como destacado anteriormente. O ganho de resistência residual para maiores deslocamentos foi mais significativo quando utilizado teor de 2,0% de macrofibra polimérica, que provocou um aumento de 31,6% da referida resistência, enquanto que com a adição de 1,0% desta fibra o acréscimo foi de 14,2%.

#### 4. CONCLUSÕES

Por meio dos ensaios de resistência à compressão, Barcelona e de tenacidade à flexão, foi possível verificar a influência da adição de macrofibra polimérica no comportamento mecânico do concreto de alta resistência. Enquanto houve um aumento da resistência à compressão com a adição de fibras de aço, esta resistência se manteve praticamente inalterada com a utilização de macrofibra polimérica.

Tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade, as amostras com macrofibra polimérica apresentaram instabilidade pós-pico. No concreto com fibra de aço a instabilidade foi menor ou inexistente. Houve pequena variação da resistência à tração com a adição de macrofibra polimérica. No entanto, a utilização de 2,0% de fibra de aço provocou aumento desta resistência devido ao comportamento *hardening* do compósito.

Foi possível obter valores de tenacidade próximos no ensaio Barcelona ao utilizar um teor de macrofibra polimérica igual ao dobro do teor de fibra de aço, indicando uma possível relação de correspondência de desempenho entre as fibras. Já no ensaio de tenacidade à flexão, a amostra com 2,0% de macrofibra polimérica apresentou fator de tenacidade inferior ao do concreto com 1,0% de fibra de aço.

No ensaio de tenacidade à flexão, concretos com macrofibra polimérica apresentaram aumento da resistência residual com o acréscimo de deslocamento, principalmente quando

foram utilizados elevados teores de fibra. Já com as fibras de aço houve redução da carga resistente em maiores deslocamentos, tanto no ensaio Barcelona quando no ensaio de flexão.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de pesquisa, e às empresas Grace Construction Products, Tecnosil e Belgo Bekaert Arames, pelo fornecimento de materiais utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Figueiredo, A. D., ‘Concreto com fibras de aço’, Boletim Técnico (BT/PCC/260) (Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000).
- [2] The Concrete Society, ‘Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete’ (Cromwell Press, Trowbridge, 2007).
- [3] The Concrete Society, ‘Guidance on the use of Macro-Synthetic-Fibre-Reinforced Concrete’ (Cromwell Press, Trowbridge, 2007).
- [4] Andrade, M. F., ‘Comparativa de la Tenacidad entre Hormigón convencional, Hormigón reforzado con Fibras de Acero y Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno’, Thesis (Máster en Ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales) (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013).
- [5] Salvador, R. P., Figueiredo, A. D., ‘Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço’, Revista Matéria 18 (2) (2013) 1273-1285.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ‘Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos’ (ABNT, Rio de Janeiro, 2007).
- [7] Asociación Española de Normalización y Certificación, ‘UNE 83515: Hormigones con fibras - Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – Método Barcelona’ (AENOR, Barcelona, 2010).
- [8] The Japan Society of Civil Engineers, ‘JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete’ (Concrete library of JSCE, Tokyo, 1984).
- [9] Mehta, K., Monteiro, P.J.M., ‘Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais’, 4ª ed. (Ibracon, São Paulo, 2014)
- [10] Monte, R., Toaldo, G. S., Figueiredo, A. D., ‘Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto’ Revista Matéria 19 (2) (2014) 132-149.
- [11] Prisco, M., Plizzari, G., Vandewalle, L., ‘Fibre reinforced concrete: new design perspectives’, Materials and Structures, Netherlands 42 (9) (2009) 1261-1281.