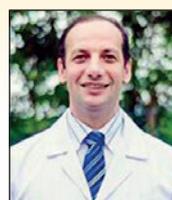


Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended

Avaliação do impacto de dois tipos de fibras de aço, simples e espaciais, nas propriedades do concreto, quando inseridas separadamente ou de forma combinada



A. L. BAUER^a
andersonbauer1995@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7633-618X>

H. EHRENBRING^a
hzamis@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0002-0339-9825>

D. SCHNEIDER^a
diegosch@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0002-8810-460X>

U. C. M. QUININO^a
uquinino@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0002-6488-9828>

B. TUTIKIAN^a
bftutikian@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0003-1319-0547>

Abstract

The brittle behavior of concrete can be compensated by the addition of reinforcements, providing benefits such as improved crack control, residual strength and increased flexural strength. It is usual to apply mono fibers to concrete, but their positioning in the matrix may not be homogeneous, consequently increasing the susceptibility to fracture planes with fewer reinforcements. This study aimed to evaluate the use and behavior of simple (mono) and space (3D) steel fibers (SE), in order to achieve a more homogeneous mixture, increase the effectiveness of fibers in restricting cracks and improve mechanical properties. The fresh-state was assessed through slump and VeBe tests, whereas the hardened-state tests comprised axial compressive strength, flexural strength and the flexural toughness factor. The volume content of simple and space fibers varied from 0 to 0.93%. Based on the results, it can be stated that space and simple fiber contents improved rheological and mechanical properties of the composite in isolated (0.29%) and hybrid (0.64%) combinations, since their overall performance exceeded the other mixtures'. However, space fibers caused considerable workability losses compared to the conventional concrete, hindering its casting and harming its hardened-state properties.

Keywords: fiber-reinforced concrete, space fiber, simple fibers, hybrid mixtures.

Resumo

O comportamento frágil de concretos pode ser compensado com a inserção de reforços, proporcionando benefícios no que tange ao controle de fissuração, ganho de tenacidade, aumento da resistência à tração, entre outros. Comumente, aplicam-se fibras isoladas em concretos, porém o seu posicionamento na matriz pode não ser homogêneo e, conseqüentemente, facilita-se o surgimento de planos de ruptura com baixo número de reforços. Assim, o trabalho em questão teve como objetivo avaliar a aplicação e comportamento de fibras simples e espaciais em aço, a fim de proporcionar uma mistura mais homogênea, aumentar a área de atuação da fibra na contenção de fissuras e melhorias nas propriedades mecânicas. Os ensaios no estado fresco foram de consistência do compósito, por meio do abatimento do tronco de cone e do VeBe, e, no estado endurecido, avaliou-se a resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade. Variou-se o teor de adição das fibras uni (simples) e espaciais, em volume, de 0 até 0,93%. Com base nos resultados, pode-se afirmar que os teores de fibras espaciais e simples foram benéficos às propriedades reológicas e mecânicas do compósito na combinação isolada (0,29%) e híbrida (0,64%), dado que demonstraram desempenho geral superior às demais misturas. Entretanto, as fibras espaciais acarretam consideráveis perdas da trabalhabilidade, comparado ao concreto tradicional sem fibras, dificultando o seu lançamento e, conseqüentemente, propriedades no estado endurecido.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras, fibra espacial, fibras simples, misturas híbridas.

^a Unisinis, itt Performance, São Leopoldo, RS, Brazil.

1. Introdução

O concreto é um material de comportamento frágil e depende de outros componentes que permitam alterar sua forma de ruptura [1]. Assim, as armaduras metálicas são especificadas para prover aumentos na resistência à tração. Porém, este tipo de reforço atua de forma concentrada, sendo ineficiente na mitigação de fissuras localizadas, impactando na durabilidade do sistema. A adição de fibras no concreto tem o intuito de suprir tais deficiências, uma vez que se espera torná-lo um material isotrópico, melhorando seu comportamento, quando submetido às ações mecânicas e aumentando a área de combate à nucleação de fissuras [2].

Conforme Ibrahim et al. [3], a utilização de fibras de aço como reforço da matriz de concreto traz uma série de benefícios no estado endurecido, como o aumento da capacidade de carga, da energia de ruptura, bem como proporciona um maior controle de fissuração e, por sua vez, um aumento na vida útil do compósito. Já no estado fresco, há a criação de uma malha interna formada pelas próprias fibras, a qual interfere na movimentação dos agregados no interior da mistura. Essa ação pode prejudicar os processos de moldagem e o adensamento do compósito nas fôrmas, tendo as microfibras como elementos que dificultam a homogeneização dos agregados graúdos com o restante dos materiais [4, 5].

Salienta-se que fibras incorporadas à matriz atuam como pontes de transferência de tensões e, na medida em que limitam a abertura dos planos de ruptura, atenuam a propagação da anomalia, aumentando a energia de ruptura à tração e alterando a forma de fragilização do compósito para o estado pseudo-dúctil [6]. A vasta literatura atual aborda as vantagens do emprego de diferentes tipos de fibras simples [7, 8, 9], sendo essas distribuídas separadamente ao longo da matriz e, conseqüentemente, atuando individualmente em direção única. A mobilidade dos reforços no interior da matriz caracterizará a direção que cada um atuará. Na área de engenharia aeroespacial, pesquisas têm desenvolvido conjuntos estruturais capazes de atuarem em várias direções, a fim de agregar a resistência mecânica de outros compósitos [10, 11], no entanto, ainda não ocorreu a inserção desse tipo de reforços em matrizes cimentícias. Mesmo que os resultados identificados sejam atrativos, ainda há uma lacuna acerca do desempenho do concreto com adição de fibras espaciais, as quais

são caracterizadas por um arranjo específico estruturado com fibras simples atuantes em 3 direções. Tem-se uma expectativa que este novo modelo de reforço possa aumentar o número e/ou eficiência das fibras no plano de fratura, uma vez que o seu posicionamento é mais bem controlado e o conjunto, teoricamente, é mais efetivo. Assim, é possível assegurar que o plano de ruptura tenderá a ser interceptado pelas fibras espaciais independentemente da localização, visto que o conjunto tem a união rígida entre fibras formatadas ortogonalmente entre si, contribuindo como reforço em 3 direções e elevando a resistência do plano de fratura da matriz.

Também foram desenvolvidos estudos em torno do emprego de fibras bidirecionais, a exemplo do concreto têxtil [12, 13], que traz uma série de vantagens em relação ao concreto convencional e armado. Algumas dessas vantagens são o ótimo comportamento na tração, à compressão e elevada durabilidade, visto que a matriz possui baixa relação a/c ($< 0,30$) e as fibras empregadas não necessitam de proteção contra corrosão, permitindo a redução do peso das estruturas [14]. Outro benefício desses compósitos é a possibilidade de conformação geométrica das peças.

Para obter um aproveitamento ainda maior, pode ser realizada a combinação de duas ou mais fibras em uma mesma matriz, a fim de potencializar o desempenho do compósito. Esta combinação de fibras é também conhecida como hibridização. Comumente, são variados os tipos de material em cada reforço, bem como a geometria dos mesmos. No entanto, há ainda a necessidade de se conhecer a melhor forma de combinar o efeito de fibras que atuam em diferentes direções, de modo a alcançar a sinergia máxima e, assim, proporcionar um comportamento otimizado [2, 15].

Quinino [2] explica que a hibridização de microfibras de polipropileno e metálicas, trabalhando em conjunto e nas proporções adequadas, resultam em uma melhora de desempenho da matriz, uma vez que as microfibras de polipropileno retardam a formação de microfissuras, podendo restringir possíveis deslocamentos diferenciais no interior do compósito durante a formação e propagação de fissuras, enquanto as macrofibras metálicas têm a função de “costurar” as fissuras, retardando sua abertura e extensão.

Banthia e Sappakittipakorn [16] também obtiveram resultados promissores ao avaliar a hibridização de matrizes com dois tipos de fibras metálicas, ambas ondulares, variando apenas o fator de

Tabela 1

Teor de adição de fibras de aço nos traços dos compósitos utilizados na pesquisa

Misturas	Teor de adição		Tipo de fibra			
			Simples		Espacial	
	kg/m ³	% em volume	kg/m ³	% em volume	kg/m ³	% em volume
MR	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
M1	10	0,14%	10	0,14%	0	0,00%
M2	20	0,29%	20	0,29%	0	0,00%
M3	40	0,52%	10	0,14%	30	0,38%
M4	50	0,67%	20	0,29%	30	0,38%
M5	60	0,78%	10	0,14%	50	0,64%
M6	70	0,93%	20	0,29%	50	0,64%
M7	30	0,38%	0	0,00%	30	0,38%
M8	50	0,64%	0	0,00%	50	0,64%

forma, mantendo-se o comprimento das fibras, demonstrando efeitos benéficos nas propriedades mecânicas do concreto.

Com esse propósito, foi elaborado o programa experimental para avaliar a influência no estado fresco e as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias com a incorporação de fibras simples e espaciais em proporções variadas, de maneira individual e com hibridização entre as fibras.

2. Programa experimental

O programa experimental da pesquisa está voltado à análise do comportamento físico de uma matriz cimentícia padrão quando reforçada com fibras de aço simples e espaciais. Os compósitos estudados foram constituídos de um concreto convencional de resistência à compressão característica de 25 MPa, sendo sua dosagem estabelecida por meio do método de Tutikian e Helene [17]. Moldou-se 9 misturas distintas, uma do concreto referência sem fibra (MR) e as oito restantes com fibras simples e espaciais (M1 – M8). As características no estado fresco foram avaliadas pelo método do tronco de cone e VeBe. As propriedades mecânicas analisadas, resistência à compressão axial, à tração na flexão e o fator de tenacidade, foram testadas aos 28 dias. A Tabela 1 apresenta o teor de adição, em volume com compensação de massa, de fibras de aço em cada uma das misturas estudadas.

A escolha dos teores de adição teve como base os consumos médios usuais, estando na faixa de 10 a 70 kg/m³, conforme constata as pesquisas de Banthia e Sappakittipakorn [16], Boulekbaiche et al. [18] e Quinino [2]. Nas misturas denominadas M3, M4, M5 e M6 houve a hibridização dos tipos de reforços, variando um teor de fibras simples com as espaciais. Ambas fibras em simples ou espaciais eram de aço e apresentavam ancoragem nas extremidades, o que contribui para o desempenho do compósito, pelo fato de diminuir o potencial de desprendimento do reforço à matriz cimentícia, à medida em que se elevam as tensões de tração. Os itens a seguir apresentam os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento dessa pesquisa.

2.1 Materiais utilizados

Em todas as misturas utilizou-se cimento Portland tipo III, especificado pela ASTM C150:2018 [19]. A densidade do material correspondeu a 3,04 g/cm³ e área superficial equivalente a 4936 cm²/g. O agregado miúdo quartzoso utilizado possuía dimensão máxima dos grãos de 4,8 mm e módulo de finura de igual a 2,22. A massa específica desse material foi avaliada conforme ASTM C128:2015 [20], obtendo um valor equivalente a 2,63 g/cm³. Quanto a massa unitária, identificou-se o valor de 1,54 g/cm³, conforme os procedimentos prescritos pela ASTM C29:2017 [21]. Já para o agregado graúdo natural, os valores encontrados para a dimensão máxima e módulo de finura foram 19,0 mm e 6,86, respectivamente. A sua massa específica correspondeu a 2,69 g/cm³, de acordo com os métodos da ASTM C127:2015 [22]. A massa unitária da brita foi determinada de acordo com a ASTM C29:2017 [21], tendo como resultado 1,45 g/cm³.

A composição granulométrica dos agregados naturais foi realizada seguindo os parâmetros prescritos na ASTM C33:2018 [23] e ASTM C136:2014 [24]. A distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo é apresentada na Figura 1.

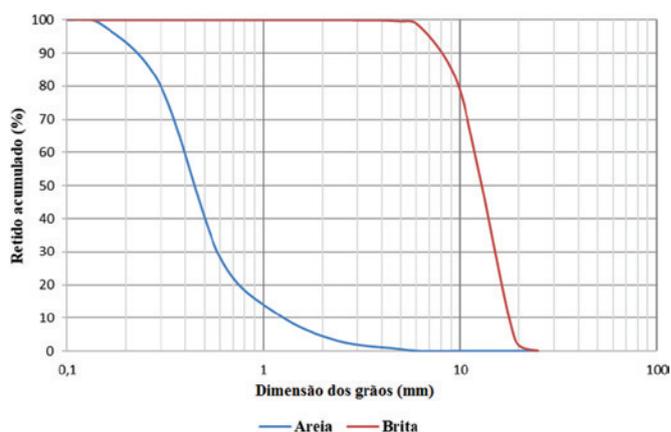


Figura 1
Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo

Foram adotadas fibras simples (Figura 2-a) de comprimento de 60 mm, devido a compatibilidade com o agregado graúdo, garantindo assim o bom desempenho da fibra como reforço estrutural do concreto [25]. Estas fibras apresentam ainda diâmetro de 0,75 mm, o que resulta em um fator de forma de 80. Já as fibras espaciais (Figura 2-b) tem comprimento de 80 mm e diâmetro de 1,8 mm, tendo um fator de forma igual à 44. A fibra simples tem resistência de 1000 MPa, bem como os filamentos utilizados na produção da fibra espaciais. Salienta-se que as fibras espaciais são novos reforços, na forma de arranjos, os quais, para essa pesquisa, foram manualmente produzidos para viabilizar a sua avaliação, uma vez que ainda não são comercializados no mercado. Utilizaram-se 3 fibras por arranjo, interligadas com solda e orientadas à 90°. Essa ortogonalidade entre as fibras se manteve durante as operações de mistura, lançamento e adensamento do concreto. As dimensões dessas fibras necessitaram ser maiores que as fibras simples em virtude de obter uma soldagem satisfatória. Todavia, os filamentos aplicados nas fibras espaciais são classificados como tipo A e classe I (A-I), conforme as definições da ABNT NBR 15530:2007 [26]. A nomenclatura técnica adotada nesse trabalho para distinguir as fibras foi “simples” e “espaciais” de maneira a

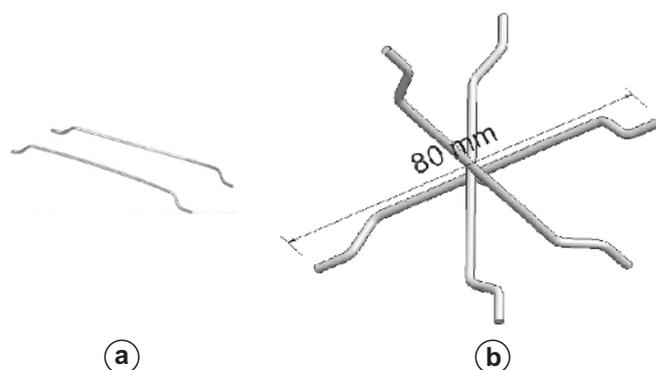


Figura 2
Formato das fibras (a) simples e (b) espaciais

Tabela 2
Classificação de consistência pelo ensaio de VeBe

Classificação	Abatimento (mm)	VeBe (s)
Extremamente seco	–	32 a 18
Muito rígido (mantém formato)	–	18 a 10
Rígido	0 a 25	10 a 5
Pouco fluido	25 a 75	5 a 3
Fluido	75 a 125	3 a 0
Muito fluido	125 a 190	–

Fonte: Adaptado de ACI 211.R3-02 [30]

distinguir o modo de atuação de cada fibra, simples e espacial, respectivamente.

2.2 Método de dosagem e processo de mistura

A dosagem do concreto referência teve como objetivo atingir a resistência à compressão de 25 MPa, adotando o consumo de cimento igual a 280 kg/m³ e relação água/cimento da mistura equivalente a 0,66. A proporção referencial praticada foi de 1: 2,51: 3,43 (cimento: areia: brita). As misturas contaram com a mesma matriz cimentícia de base, alterando o tipo de reforço aplicado. O teor de adição das fibras foi determinado em função da massa de reforços por metro cúbico, partindo de 10 até 70 kg/m³. O abatimento da matriz referência foi fixado para atingir a classe S160 (160 ≤ a < 220 mm) e comportamento fluido para o ensaio VeBe, bem como para os concretos reforçados com fibras. É importante ressaltar que, no decorrer da homogeneização dos materiais, não foi possível visualizar a formação de grumos, ou seja, aglomeração localizada de fibras. A Tabela 2 ilustra os parâmetros de

classificação da fluidez de matrizes cimentícias utilizados como referência nesta pesquisa.

2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, foram moldados dois corpos de prova cilíndricos por mistura, tendo dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme especifica a ASTM C192:2016 [27]. Posteriormente, as amostras permaneceram por 24 horas em temperatura ambiente, cobertas por uma placa de vidro. Passado o período, foram desmoldadas e dispostas em uma câmara de cura com temperatura de 21 ± 2°C e umidade de 95 ± 3%, onde permaneceram até a idade de ensaio. Para os ensaios de tração na flexão e o fator de tenacidade, as dimensões adotadas das amostras são recomendadas pela norma JSCE – SF4:1984 [28], sendo moldados dois corpos de prova prismáticos, com dimensões de 150x150x500 mm. O processo de moldagem foi realizado conforme as recomendações da ASTM C192:2016 [27]. Posteriormente, o procedimento de cura seguiu os mesmos requisitos dos corpos de prova cilíndricos.

2.4 Concreto no estado fresco

A análise da consistência do concreto ocorreu pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e o ensaio dinâmico de VeBe. O primeiro é regido pela ASTM C143:2015 [29], já o segundo é especificado pela ACI 211.3R-02:2009 [30] e DNIT 064:2004 [31].

2.5 Concreto no estado endurecido

2.5.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão simples foi avaliada seguindo as

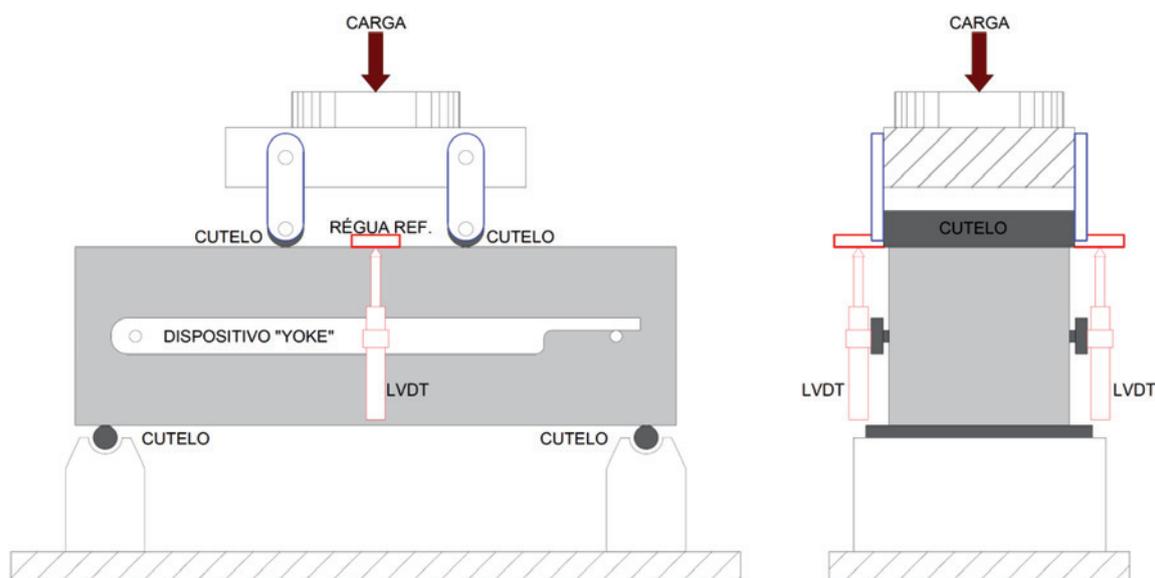


Figura 3
Configuração de ensaio – flexão em quatro pontos

Fonte: JSCE-SF4 (1984); adaptado pelos autores

Tabela 3

Resultados do estado fresco das misturas

Misturas	Fibra de aço (kg/m ³)		Total (kg/m ³)	Combinação	Abatim. (mm)	VeBe (s)
	Espacial	Simples				
MR	0	0	0	–	170	1,5
M1	0	10	10	E0+M10	170	1,4
M2	0	20	20	E0+M20	130	1,6
M3	30	10	40	E30+M10	20	5,31
M4	30	20	50	E30+M20	40	3,19
M5	50	10	60	E50+M10	20	4,56
M6	50	20	70	E50+M20	20	4,63
M7	30	0	30	E30+M0	50	4,32
M8	50	0	50	E50+M0	20	4,34

recomendações da ASTM C39:2018 [32]. Os corpos de prova foram retificados para melhor distribuição do carregamento de ensaio, sendo submetidos ao ensaio com uma prensa hidráulica com capacidade de 2000 kN. A velocidade de aplicação de carga foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, até o rompimento. A idade ensaiada foi de 28 dias, sendo ensaiados 2 corpos de prova por mistura, totalizando 18 amostras.

2.5.2 Fator de tenacidade e resistência à tração na flexão equivalente

Para os ensaios de tração na flexão e tenacidade, a norma utilizada foi a japonesa JSCE-SF4:1984 [28]. Com relação à tração na flexão, a configuração do ensaio consiste em apoiar a viga em dois cutelos e aplicar o carregamento através de outros dois cutelos, posicionados na parte superior da viga, no terço médio do vão, como apresentado na Figura 3. O método especificado pela norma prevê que o vão de ensaio deve apresentar três vezes a altura do corpo de prova, sendo assim, as dimensões foram de 450 mm de comprimento, 150 mm de altura e 150 mm de largura. A prensa utilizada foi uma Shimadzu de 2000 kN, sendo a aplicação

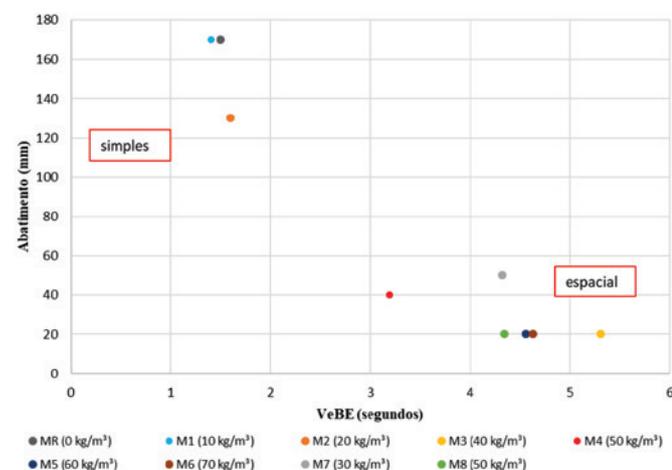
da carga efetuada por deslocamento prescrito, aos 28 dias, sendo 2 corpos de prova por mistura, totalizando 18 amostras.

3. Resultados e discussões

3.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos durante os ensaios do concreto no estado fresco.

Analizando os resultados, é possível perceber que, com a inserção das fibras, a consistência do compósito diminuiu, e os valores foram condizentes aos encontrados por Abbass et al. [33], Akcay e Tasdemir [34] e Banthia et al. [15]. Velasco [35] afirmou que o concreto com inserção de fibras tende a perder a consistência e fluidez, sendo mais notável à medida que o teor de fibras é acrescido. Essa perda de consistência fica ainda mais evidente nas misturas com a presença das fibras espaciais, visto que os valores para o ensaio de VeBe aumentaram em 184,7% e 200,7%, para as misturas com 30 kg/m³ e 50 kg/m³ de fibras espaciais, respectivamente. Os índices demonstram que as fibras espaciais superaram a resistência ao cisalhamento da mistura no estado fresco, dificultando a dispersão das partículas e necessitando de alternativas que promovam fluidez para seu manuseio. Nessas condições, recomenda-se o uso de adensamento mecânico por meio de dispositivos adequados [36], ou ainda, interferir na composição da

**Figura 4**

Relação entre ensaio de abatimento e VeBe

Tabela 4

Resistência potencial à compressão de cada compósito

Mixture	Teor de fibras (kg/m ³)	f_c (MPa)
MR	0	36,4 ± 2,5
M1	10	32,3 ± 3,1
M2	20	30,2 ± 2,8
M3	40	33,1 ± 3,3
M4	50	35,4 ± 3,5
M5	60	31,4 ± 2,9
M6	70	29,7 ± 3,2
M7	30	30,6 ± 1,9
M8	50	26,9 ± 2,6

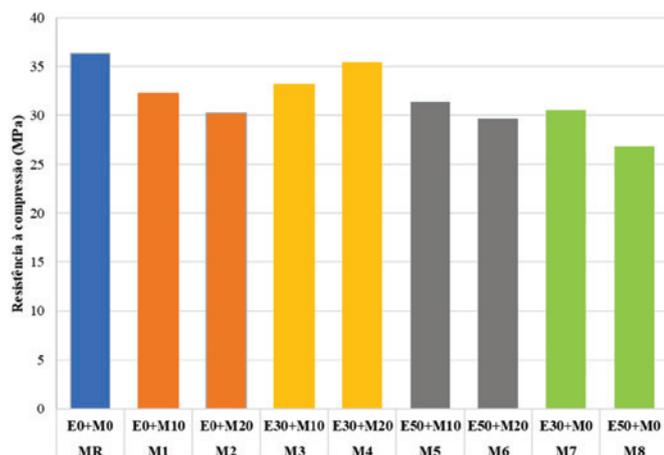


Figura 5
Resistência potencial à compressão axial

matriz cimentícia. Essa adequação na mistura volta-se ao aumentando do seu teor de argamassa, a fim de facilitar a mobilização dos materiais inseridos no concreto, por meio da lubrificação, diminuindo o atrito interno entre partículas e possibilitando um adequado adensamento do concreto reforçado com fibras (CRF).

Tal comportamento pode ser justificado pela baixa mobilidade dos compósitos com fibras espaciais, dado que as mesmas são formadas por um conjunto de três fibras simples interligadas entre si e, conseqüentemente, o esforço necessário para movimentá-las é maior do que para apenas uma fibra simples. Assim, tem-se uma mistura estruturada, que limita a fluidez da matriz.

A Figura 4 apresenta uma comparação dos resultados dos ensaios do concreto no estado fresco. Pode-se constatar que as fibras espaciais exercem uma influência considerável na trabalhabilidade da matriz do concreto, podendo ser apontada uma redução média de 174% com base nas matrizes estudadas. Esse comportamento é percebido no ensaio VeBe, tanto para as misturas com 30 kg/m³, quanto para as misturas contendo 50 kg/m³ de fibras espaciais. Também são identificados moderados decrementos ao se hibridizar as fibras. Percebe-se que, dentre as misturas com fibras espaciais, a matriz M4 apresentou os melhores resultados, enquanto a matriz M3, contendo 40 kg/m³, apresentou piores resultados,

Tabela 6
Resistência média de tenacidade

Misturas	Teor de fibra (kg/m ³)	Tenacidade		
		Carga (kN)	FT (MPa)	Eficiência (kg/m ³ .MPa)
MR	0	22,69 ± 0,87	0,00 ± 0	-
M1	10	26,35 ± 0,72	0,84 ± 0,23	11,9
M2	20	28,32 ± 1,87	1,30 ± 0,59	15,4
M3	40	26,58 ± 2,02	1,56 ± 0,16	25,6
M4	50	26,83 ± 1,27	2,58 ± 0,13	19,4
M5	60	26,75 ± 2,43	2,47 ± 0,51	24,3
M6	70	30,09 ± 2,81	2,96 ± 0,63	23,6
M7	30	27,33 ± 2,75	1,70 ± 1,20	17,6
M8	50	24,69 ± 0,16	2,26 ± 0,30	22,1

Tabela 5
Resistência média à tração na flexão

Misturas	Teor de fibras (kg/m ³)	f _t (MPa)
MR	0	3,03 ± 0,12
M1	10	3,52 ± 0,09
M2	20	3,78 ± 0,25
M3	40	3,54 ± 0,27
M4	50	3,58 ± 0,17
M5	60	3,57 ± 0,33
M6	70	4,01 ± 0,39
M7	30	3,64 ± 0,37
M8	50	3,30 ± 0,02

tados, devido a dificuldade de adensamento. Já as misturas M8, M5 e M6, contendo 50 kg/m³ de fibras espaciais, demonstraram comportamento semelhantes entre si.

3.2 Resistência à compressão

A Tabela 4 apresenta os resultados potenciais obtidos no ensaio de compressão axial de cada mistura estudada. Esses valores correspondem às maiores resistências atingidas pelos compósitos e são acompanhados de seu respectivo desvio-padrão. Os ensaios foram realizados aos 28 dias, juntamente com os corpos de prova prismáticos ensaiados para a resistência à tração na flexão. Observa-se que nenhuma das misturas com presença de fibras apresentou valor superior ao traço referência, indicando que a adição desses elementos não contribuiu para o aumento da resistência à compressão, como já havia sido ressaltado por [33, 34, 36, 37]. Também, notou-se que o desvio-padrão das misturas com fibras foi superior ao da matriz referência, devido a instabilidade inerente a esse processo de inclusão. A incorporação de fibras ocasionou reduções médias de 14,3%. Analisando as misturas não hibridizadas, percebe-se que as fibras apresentaram redução na resistência à compressão em até 17,0% para as misturas com fibras simples, enquanto as misturas com fibras espaciais tiveram reduções maiores, nas proporções de 15,9% a 26,1%, referente às matrizes M7 e M8, respectivamente. Todavia, a hibridização atenuou estes decréscimos, dado que as misturas M3 e M4, contendo 30 kg/m³ de fibras

espaciais, apresentaram reduções de 8,8%, 2,5%, respectivamente. Já as misturas M5 e M6, contendo 50 kg/m³ de fibras espaciais, apresentaram reduções de 13,7% e 18,4%, respectivamente. Novamente, observou-se o bom desempenho da mistura M4. Nota-se ainda que as misturas hibridizadas, contendo 50 kg/m³ de fibras espaciais, demonstraram as maiores perdas de resistência à compressão. Os resultados de resistência à compressão estão apresentados graficamente na Figura 5.

3.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados para os ensaios de tração na flexão são demonstrados na Tabela 5.

Na Tabela 5 é possível constatar que a mistura M6, a qual contém 70 kg/m³, apresentou o melhor desempenho, demonstrando um ganho de resistência à tração na flexão de 32,3% em relação ao

concreto referência. Quinino [2] explica que, quanto maior o teor de fibras, maior será a quantidade de filamentos que atuam diretamente no plano de fratura como ponte de transferência de tensão e, conseqüentemente, proverá maior resistência à matriz. Pode-se destacar a mistura M2, que contém uma concentração de fibras 3,5 vezes menor do que a matriz M6, mostrou um incremento de resistência de 24,8%, apenas 7,5% menos que a mistura M6. Este fato evidencia que as fibras de aço, em formato simples, apresentam performance mais eficiente no que tange a resistência à tração por flexão, visto que a matriz M2 demonstrou, salvo a mistura M6, o maior valor de resistência a tração na flexão. Foi observado um aumento da resistência proporcionalmente ao aumento do teor de fibras, conforme os estudos de Jang e Yun[38], Khaloo et al. [39], Lee, Cho e Choi [40], Pająk e Ponikiewski [41] e Ehrenbring et al. [42] demonstraram. Observa-se ainda que o desempenho à tração foi semelhante entre as misturas M3, M4 e M5, matrizes híbridas, atingindo um ft médio

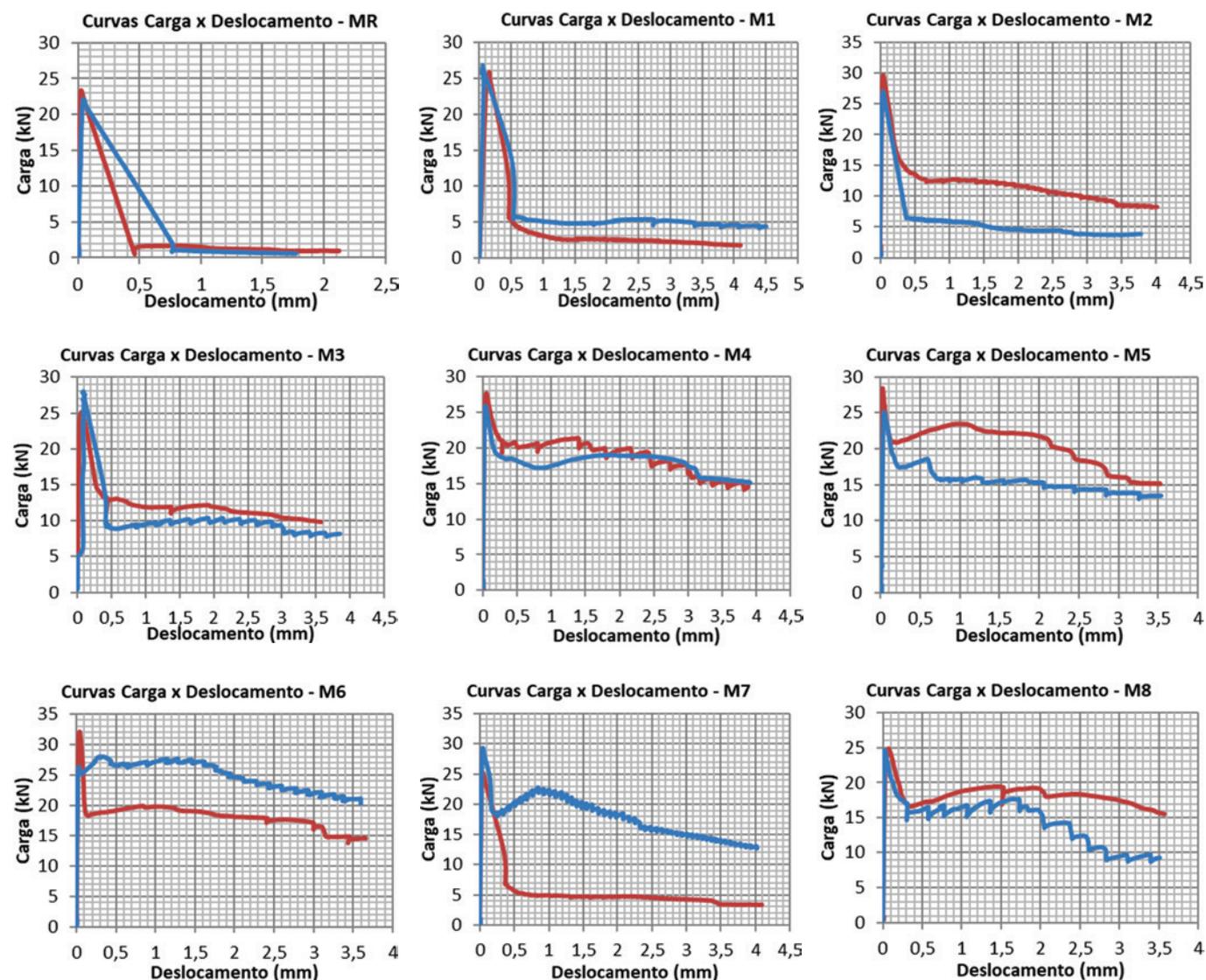


Figura 6
Curvas Carga x Deslocamento

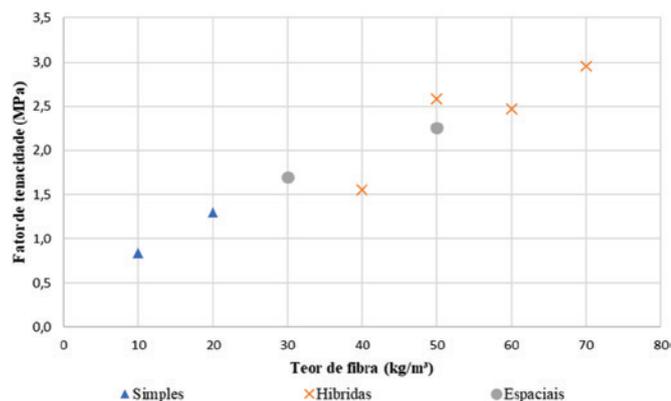


Figura 7

Aumento do teor de fibras e o aumento fator de tenacidade

de 3,55 MPa. Dentre estes compósitos híbridos, destaca-se o compósito M3, por apresentar o melhor aproveitamento das fibras. É interessante ressaltar que as misturas M2 e M7, com baixos teores de adição, alcançaram os maiores valores à tração, 3,78 MPa e 3,64 MPa, respectivamente. Pode-se entender que os altos teores da pesquisa prejudicaram a moldagem e distribuição das fibras nas amostras, refletindo nas propriedades mecânicas, de acordo com Pacheco et al. [43].

3.4 Tenacidade

O comportamento da tenacidade dos compósitos é apresentado na Tabela 6 e Figura 6, quando submetidos ao ensaio de flexão para determinação da resistência à flexão equivalente. Estão apresentadas as curvas dos dois corpos de prova para cada mistura, sendo utilizado os resultados médios para os cálculos.

Após a realização dos ensaios, notou-se que a matriz referênciada (MR) apresentou um fator de tenacidade nulo, o que já era esperado. Esse resultado foi atingido, uma vez que essa matriz não recebeu reforços e apresentou ruptura frágil devido a sua baixa capacidade de deformação com o acréscimo de tensões durante o ensaio. É perceptível o acréscimo da área sob as curvas após a incorporação de fibras, sendo mais notável este comportamento para as misturas contendo os maiores teores de incorporação. As misturas híbridas (M3, M4, M5 e M6) obtiveram comportamento distinto, sendo que a M6 obteve o maior fator de tenacidade, equivalente a 2,96 MPa. Já a matriz M3 apresentou o menor fator de tenacidade entre as híbridas, todavia o teor de maior eficiência (25,6 kg/m³.MPa).

Com base nas curvas carga x deslocamento é possível extrair a área sob elas, e calcular o valor da resistência à flexão equivalente, aplicando a formulação da norma Japonesa JSCE – SF4:1984 [28]. A Tabela 6 expressa os resultados obtidos na análise da tenacidade das misturas.

O fator de tenacidade, que relaciona a quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova, como nas pesquisas de Banthia et al. [15], Lee, Cho e Choi [40] e Carrillo, Cárdenas Pulido e Aperador [44], demonstrou aumentos gradativos conforme o teor de fibras foi incrementado. Avaliando a melhoria desta propriedade em rela-

ção a matriz M1, constata-se aumentos nas proporções de 54,8% para a mistura M2 e 251,8% para a mistura M6, tendenciando a melhoria do desempenho à medida que a matriz recebe maior teor de fibras. Entretanto, percebe-se que as misturas com menores teores de fibras (M1, M2 e M7) obtiveram os melhores aproveitamentos, visto que estas apresentaram eficiência superiores as demais, dado que é necessária uma menor quantidade de fibras por unidade de resistência (MPa).

A mistura M4, a qual apresentou o segundo maior índice de tenacidade, mas a menor eficiência, de 19,4 kg/m³.MPa, entre o grupo das misturas híbridas. Destaca-se a mistura M3, tendo a maior eficiência da pesquisa. Esse comportamento demonstrou que a mistura M3 apresentou maior eficiência na transferência e absorção de esforços, o que está associado ao seu posicionamento dentro da matriz, propiciando um maior número de fibras que atuam no plano de ruptura e, consequentemente, geram uma melhor distribuição das tensões, como indetificou Gil et al. [45] em sua pesquisa.

Ainda, foi percebido o aumento da tenacidade à medida que o teor de fibras aumentou, como era esperado. A Figura 7 ilustra a correlação entre o fator de tenacidade e o teor de fibras incorporado. É possível perceber um comportamento linear crescente à medida que a concentração de fibras aumenta, apresentando apenas uma descontinuidade da matriz M3 (40 kg/m³). Observou-se que as fibras espaciais apresentaram melhores índices, porém, ainda inferiores do que as misturas híbridas.

4. Conclusões

Com base nos resultados e discussões apresentadas nesse artigo, foi possível verificar que a adição de fibras espaciais em concretos trouxe melhoras na resistência à tração na flexão e no índice de tenacidade, porém, prejudicaram a trabalhabilidade das misturas e resistência à compressão. A matriz M4, uma mistura híbrida com 30 kg/m³ de fibras espaciais e 20 kg/m³ de fibras simples, demonstrou o melhor desempenho geral dentre as matrizes estudadas, denotando a boa compatibilização obtida desta matriz com os teores de fibras, espaciais e simples, empregados na hibridização.

5. Referências bibliográficas

- [1] YOO, D.-Y. et al. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, v. 157, p. 62–70, 1 dez. 2016.
- [2] QUININO, U. C. M. Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras. 2015. Thesis (Civil Engineering PhD) – Civil Engineering Graduate Program, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.
- [3] IBRAHIM, M. A. et al. Effect of Material Constituents on Mechanical and Fracture Mechanics Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Materials Journal*, v. 114, n. 3, p. 453- 465, 2017.
- [4] FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, 18 (2015), n. 6, pp. 1284-1290.

- [5] EHREBRING, H. Z. Comportamento de concreto reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas. 2017. 165 s. Thesis (Civil Engineering Master's) – Civil Engineering Graduate Program, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.
- [6] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2.Ed., Modern Concrete Technology Series, Taylor&Francis, 2007.
- [7] GÜNEYISI, E. et al. Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, v. 56, p. 83–91, 01 Jan. 2014.
- [8] WU, Z. et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 103, p. 8–14, 30 Jan. 2016.
- [9] YOO, D.-Y.; PARK, J.-J.; KIM, S.-W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type. *Composite Structures*, v. 174, p. 263–276, 15 Aug. 2017.
- [10] PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. *Polímeros*, v. 10, n. 2, p. 100–109, June. 2000.
- [11] RIBEIRO, J. L. P.; GREGORI, M. L.; PARDINI, L. C. Predição das propriedades elásticas de compósitos termoestruturais com reforço multidirecional. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 13, n. 1, p. 33–48, Mar. 2008.
- [12] DU, Y. et al. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading. *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 88–100, 01 May 2017.
- [13] WILLIAMS PORTAL, N.; NYHOLM THRANE, L.; LUNDGREN, K. Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation. *Materials and Structures*, v. 50, n. 1, p. 1–14, Aug. 2017.
- [14] COLOMBO, I. G. et al. Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. *Materials and Structures*, v. 46, n. 11, p. 1933–1951, 2013.
- [15] BANTHIA, N. et al. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, v. 48, p. 91–97, 01 Apr. 2014.
- [16] BANTHIA, N.; SAPPAKITTIPAKORN, M. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 9, p. 1366–1372, 01 Sept. 2007.
- [17] TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Ch. 12. P. 415-452.
- [18] BOULEKBACHE, B. et al. Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 253–262, 15 Nov. 2016.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Portland Cement. C150/C150M, ASTM, Pennsylvania, 2018.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. C128, ASTM, Pennsylvania, 2015.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. C29/C29M, ASTM, Pennsylvania, 2017.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. C127, ASTM, Pennsylvania, 2015.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Concrete Aggregates. C33/C33M, ASTM, Pennsylvania, 2018.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C136/C136M, ASTM, Pennsylvania, 2014.
- [25] FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. Thesis (habilitation) – Civil Construction Engineering Department, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15530: Fibras de Aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. C192/C192M, ASTM, Pennsylvania, 2016.
- [28] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. No 3 June 1984. p.58-61.
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. C143/C143M, ASTM, Pennsylvania, 2015.
- [30] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (ACI 211.3R-02). ACI Committee 211. Detroit, USA, 2009.
- [31] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIA. DNIT 064: Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.
- [32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. C39/C39M, ASTM, Pennsylvania, 2018.
- [33] ABBASS, W.; KHAN, M. I.; MOURAD, S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 168, p. 556–569, 2018.
- [34] AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 287–293, 2012.
- [35] VELASCO, R.V. Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço:

- propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. Thesis (Civil Engineering PhD) – Civil Engineering Graduate Program, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [36] TABATABAEIAN, M. et al. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 497–509, 2017.
- [37] PRATHAP, P.; NARESH KUMAR, T.; NARAYANA, S. M. V. Evaluation of Mechanical Properties of Concrete using Silica fume and Steel fibers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 8, n. 5, p. 332–338, 2017.
- [38] JANG, S. J.; YUN, H. D. Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete. *Composite Structures*, v. 185, p. 203–211, 01 Feb. 2018.
- [39] KHALOO, A. et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 179–186, 31 Jan. 2014.
- [40] LEE, J.-H.; CHO, B.; CHOI, E. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content. *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 222–231, 01 May 2017.
- [41] PAJAÇ, M.; PONIKIEWSKI, T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 397–408, 01 Oct. 2013.
- [42] EHRENBRING H. Z.; DE MEDEIROS QUININO, U. C.; OLIVEIRA, L. F. S.; TUTIKIAN, B. F. Experimental method for investigating the impact of the addition of polymer fibers on drying shrinkage and cracking of concrete. *Structural Concrete*, 2019; 20 pp. 1064–1075. <https://doi.org/10.1002/suco.201800228>
- [43] PACHECO, F.; CHRIST, R.; GIL, A. M.; TUTIKIAN, B. F. Aplicação de MEV e microtomografia 3D na investigação da distribuição de fibras em compósitos cimentícios avançados. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, São Paulo, v. 9, n. 6, p. 824-841, Dec. 2016.
- [44] CARRILLO, J.; CÁRDENAS PULIDO, J.; APERADOR, W. Flexural mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under corrosive environments. *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 32, n. 2, p. 59–72, 2017.
- [45] GIL, A. M.; KHAYAT, K. H.; TUTIKIAN, B. F. An experimental approach to design self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, v. 229, n. 30, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116939>