

Compósitos cimentícios com fibras de polipropileno: avaliações no estado fresco e endurecido

Cementitious composites with polypropylene fibers: evaluations in the fresh and hardened state

Reginaldo Virgílio da Silva¹, Oswaldo Cascudo², Edgar Bacarji²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Engenharia, Av. Universitária N° 1440, Setor Leste Universitário, CEP: 74605-010, Goiânia, GO, Brasil.

²Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Av. Universitária, Qd. 86, Área 1488 – St. Leste Universitário, CEP: 74605-220, Goiânia, GO, Brasil.
e-mails: rvseng@gmail.com, ocascudo@ufg.br, edgar@ufg.br

RESUMO

O concreto é um material largamente utilizado em todo o mundo. Algumas de suas particularidades são a fissuração e a baixa resistência à tração. Assim, a adição de fibras pode ser uma alternativa viável, a fim de se minimizar a ocorrência destes efeitos. O presente estudo investigou as vantagens e desvantagens da adição de fibras de polipropileno (PP) nos materiais cimentícios e, por fim, apresentou os resultados e considerações de um estudo experimental sobre as propriedades dos compósitos de microconcreto no estado fresco e endurecido. Foram usados dois tipos de fibras: uma curta com 12 milímetros de comprimento (microfibras), e outra de 54 milímetros (macrofibras). Os teores de fibras, em relação ao volume do microconcreto, foram de 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4% para a microfibra e de 0,3%, 0,4% e 0,5% para a macrofibra e para os híbridos. Estes últimos foram compostos por 30% de microfibras e 70% de macrofibras. Parte do cimento foi substituída por sílica ativa (SA) e cinza volante (CV), nas proporções de 7,5% para cada uma delas, em massa. A proporção ligante:agregados foi de 1:3, em massa. Para os agregados, foi adotada a relação de 30% de areia natural e 70% de areia artificial, em massa. Quanto ao efeito das microfibras, estas apresentaram resultados satisfatórios para adições de 0,1% no compósito com adição de microfibras e em todas as composições híbridas nas idades de 28 e 91 dias., tanto no estado fresco como no endurecido. Quanto às macrofibras, estas ocasionaram discreta redução no abatimento e na absorção, constância no percentual de ar aprisionado e melhora nos resultados no estado endurecido para os teores de 0,4% e 0,5%, em relação à mistura de referência (sem fibras).

Palavras-chave: Microconcreto. Compósito cimentício. Microfibras. Macrofibras. Polipropileno.

ABSTRACT

The concrete is a material widely used worldwide. Some of its particularities are cracking and low tensile strength. Thus, the addition of fibers can be a viable alternative, in order to minimize the occurrence of these effects. The present study has investigated the advantages and disadvantages of the addition of polypropylene fibers in cementitious materials and, finally, presented the results and considerations of an experimental study on the properties of microconcrete composites in the fresh and hardened state. Two types of fibers were used: a short one 12 mm long (microfibers), and another one 54 mm (macrofibers). The fiber content, in relation to the microconcrete volume, was 0.1%, 0.2%, 0.3% and 0.4% for microfiber, and 0.3%, 0.4% and 0.5% for macrofiber and hybrids. The latter were composed of 30% microfibers and 70% macrofibers. Part of the cement was replaced by silica fume (SF) and fly ash (FA), in the proportions of 7.5% for each one, by weight. The binder: aggregate ratio was 1:3 by weight. For aggregates, the ratio of 30% natural sand and 70% artificial sand, by weight, was adopted. As for the effect of the microfibers, they presented satisfactory results for additions of 0.1% in the composite with the addition of microfibers and in all the hybrid compositions at the ages of 28 and 91 days, both in the fresh and in the hardened state. As for the macrofibers, they caused a slight reduction in the slump and absorption, consistency in the percentage of trapped air and improvement in the results in the hardened state for the contents of 0.4% and 0.5%, in relation to the reference mixture (without fibers).

Keywords: Microconcrete. Cementitious composite. Microfibers. Macrofibers. Polypropylene.

1. INTRODUÇÃO

O concreto, devido ao seu comportamento plástico e propriedades mecânicas, apresenta vantagens que o torna aplicável nas diversas áreas da engenharia. Sua baixa resistência à tração e comportamento frágil na ruptura impõem o uso de armaduras passivas ou ativas, o que dá ao concreto armado, inúmeras vantagens em relação a outros materiais, como aço, por exemplo. Outro aspecto relativo ao concreto diz respeito à dimensão máxima característica do seu agregado graúdo, o que demanda cobrimentos geralmente superiores a 25 mm. Assim, não obstante a vasta aplicabilidade do concreto, percebe-se que existe uma lacuna no mercado de um compósito que tenha um proporcionamento com baixo ou nenhum percentual de agregados graúdos, com boas propriedades mecânicas e com comportamento dúctil, inclusive diante de solicitações de tração, conforme demonstrado por PASCHALIS e LAMPROPOULOS [1], cujo material foi desenvolvido para utilização como reforço estrutural. As referidas características podem ser alcançadas com o compósito de microconcreto de alto desempenho. Pode-se definir o microconcreto como sendo um concreto no qual se tem o proporcionamento de agregados graúdos de dimensões inferiores às de concretos convencionais. Neste caso, a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados pode variar conforme objetivo da aplicação ou da pesquisa.

Conforme MANO [2], os compósitos são definidos como materiais multifásicos e de classificação heterogênea, em escala microscópica e macroscópica. São o resultado de uma combinação racional, entre um componente descontínuo, que proporciona a principal resistência ao esforço, e outro contínuo, que age como meio de transferência dos esforços. Segundo MEHTA e MONTEIRO [3], pode-se dizer que os compósitos são materiais cimentícios com adições que não combinam quimicamente com os demais elementos da mistura, e são adversos aos componentes tradicionais, formando assim uma nova fase no concreto. Podem ser considerados compósitos, os concretos com adição de algum tipo de fibra, e compósitos híbridos as misturas que têm seu proporcionamento com mais de um tipo de fibra.

Os efeitos da inserção de fibras de polipropileno (PP) em concretos com agregados normais têm sido estudados por vários pesquisadores. Na sequência deste parágrafo, constam alguns dos principais e mais recentes trabalhos desenvolvidos no tema, com ênfase dada ao escopo e objetivos dessas pesquisas experimentais. SUN e XU [4], KAKOOEI *et al.* [5] e BAGHERZADEH *et al.* [6] avaliaram os efeitos da adição da fibra de PP nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. NILI e AFROUGHSABET [7] avaliaram, predominantemente, a resistência ao impacto de concretos com sílica ativa (SA). CORINALDESI e MORICONI [8] avaliaram o comportamento do concreto autoadensável com adições minerais no estado fresco e endurecido. Quanto ao comportamento à tração, mais especificamente, podem-se citar os trabalhos de BEIGI *et al.* [9] e YAO e ZHONG [10]. Quanto à avaliação conjunta dos efeitos oriundos da incorporação das fibras e pozolanas nos compósitos cimentícios, podem-se citar os trabalhos de ZHANG *et al.* [11], ASLANI e NEJADI [12], ALHOZAIMY *et al.* [13], MEDINA *et al.* [14], SIVAKUMAR e SANTHANAM [15], TOUTANJI *et al.* [16], AFROUGHSABET e OZBAKKALOGLU [17], ZHANG e LI [18], FELEKOĞLU *et al.* [19]. Considerando propriedades mais específicas, GEORGIOU e PANTAZOPOULOU [20] avaliaram a ductilidade dos compósitos; ZHANG *et al.* [11] avaliaram tenacidade; ZHAO *et al.* [21] avaliaram a fluência; SIVAKUMAR e SANTHANAM [15] avaliaram a retração plástica; LIU *et al.* [22] avaliaram a flexão; e, finalmente, POTHISIRI *et al.* [23] e UYSAL e TANYILDIZI [24] avaliaram o comportamento de compósitos sob elevadas temperaturas.

Com base, então, nos trabalhos citados anteriormente, obtidos a partir de revisão sistemática da literatura, pôde-se construir a Tabela 1, que reúne e consolida os principais resultados e avanços conquistados no campo dos materiais compósitos com fibras de PP. Apesar desses avanços, GEORGIOU e PANTAZOPOULOU [20] e VARHEN *et al.* [25] ressaltam haver ainda carências de estudos e de conhecimentos no assunto, notadamente quanto à aplicação das fibras de PP em argamassas estruturais e microconcretos.

O microconcreto, por não possuir agregados graúdos, pode ter o cobrimento da armadura diminuído, sendo possível o uso de seções transversais de menor espessura. Pode, ainda, ser utilizado na execução de reforços, recuperações estruturais e proteções térmicas, a fim de aumentar a diversificação de produtos oferecidos na indústria da construção, por meio do oferecimento de ganho de competitividade ao seu segmento. Tais aspectos tornam o microconcreto com uso de fibras um material atraente, cujo comportamento ainda demanda pesquisas.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de fibras de PP em microconcretos cimentícios estruturais (com DMC limitado a 4,8 mm), no que tange a propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Efeitos individualizados atribuídos à ação das microfibras ou à ação das macrofibras, exclusivamente, assim como efeitos sinérgicos decorrentes de misturas contendo os dois tipos de fibras (sistemas híbridos), foram alvo da análise e investigação. O estudo propõe, então, uma discussão sobre o impacto desses vários sistemas compósitos em aspectos gerais da trabalhabilidade da mistura fresca, bem como na propriedade mecânica de resistência à compressão e no comportamento elástico do material (conso-

ante a avaliação do módulo de elasticidade).

Tabela 1: Influência da adição de fibras de PP aos materiais cimentícios com base na revisão literária.

Comportamento dos Concretos Proporcionados pela Adição de Fibras de Polipropileno			
	VANTAGENS	DESVANTAGENS	
Melhoria	da resistência à flexão	Aumento	da fluência devido ao baixo módulo de elasticidade da fibra
	da tenacidade		da sensibilidade à carbonatação quando o proporcionamento possui adição de sílica ativa
	da resistência ao impacto		
	da ductilidade		
	da durabilidade		
	da resistência à tração a longo prazo		
Influência das adições minerais	Cinza volante: proporciona melhoria friccional entre a matriz e a fibra	Desliza	diante do esforço de tração ou flexão aplicado ao compósito
	Sílica ativa: redução da permeabilidade e contribuição para dispersão das fibras		
Redução	da formação de fissuras e microfendas	Redução	da resistência à tração na idade de 28 dias
	da profundidade de carbonatação		da trabalhabilidade
	da retração plástica		da velocidade de espalhamento
	do risco de <i>spalling</i> (lascamento), deslocamento e fissuração, quando submetido a temperaturas elevadas		
Viabilidade	do uso de fibras advindas de processo de reciclagem de polímeros		gradual do módulo de elasticidade
	de realização de misturas híbridas		
Aspecto, formato e comprimento da fibra influenciam			

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentam-se, na sequência, os materiais constituintes dos microconcretos e suas caracterizações básicas, bem como os métodos empregados para a obtenção dos resultados.

2.1 Caracterização das fibras de polipropileno

Na Figura 1 podem ser vistos os aspectos das microfibras e macrofibras de PP, e como elas se diferenciam nos quesitos de comprimento e espessura. Na Tabela 2 são apresentadas as especificações das fibras empregadas na pesquisa experimental.



Figura 1: Imagens das macrofibras (a) e microfibras (b) de PP.

Tabela 2: Especificações técnicas das macro e microfibras de polipropileno.

Especificações	Macrofibra	Microfibra
Matéria-prima	Copolímero de polipropileno virgem	Copolímero de polipropileno virgem
Densidade Específica (kg/dm ³)	0,91	0,91
Comprimento (mm)	54	12
Diâmetro (µm)	480	12
Fator de forma	112	-
Quantidade de fibras por quilo (unidades/kg)	113 000	810 000 000
Resistência à tração (MPa)	660 a 760	-
Módulo de elasticidade (GPa)	5,0	-
Área superficial específica (m ² /kg)	-	366
Deformação na ruptura (%)	-	25
Ponto de fusão (°C)	-	160
Ponto de ignição (°C)	-	365

Dados obtidos na ficha técnica do material fornecida pelo fabricante.

2.2 Caracterização dos agregados

Foram utilizados agregados miúdos de origem natural e artificial, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 7211: 2019 [26]. O agregado natural utilizado foi uma areia lavada, extraída de leito de rio, essencialmente quartzosa. E o agregado artificial foi uma areia residuária da britagem de rochas, especificamente da britagem de um granulito, que é uma rocha metamórfica comum na região do entorno de Goiânia-GO, onde se realizou a pesquisa.

Os resultados da caracterização dos agregados natural e artificial, com os respectivos métodos de ensaios empregados, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização física dos agregados natural e artificial utilizados.

Ensaio	Método	Areia Natural	Areia Artificial
Massa específica aparente (g/cm ³)	ABNT NBR 16916 (2021)	2,62	2,65
Massa unitária (g/cm ³)	ABNT NBR 16972 (2021)	1,67	1,60

Dimensão máxima característica (mm)	ABNT NBR NM 248 (2003)	4,75	4,75
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248 (2003)	2,83	3,16

Caracterização do cimento Portland e das adições minerais

Para a confecção dos microconcretos foi utilizado um cimento Portland CP II F-40. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento são apresentadas na Tabela 4, as quais obedecem aos requisitos da ABNT NBR 16697: 2018 [27].

Tabela 4: Características físicas, químicas e mecânicas do Cimento CP II F-40.

Característica ou Propriedade Determinada		Método de Ensaio	Resultado	Exigência segundo a NBR 16697 (2018)
Massa específica (kg/dm ³)		NBR 16605/2017	3,09	-
Finura	resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579/2013	0,3	≤ 10,0
	resíduo na peneira 400 (%)	NBR 12826/2014	1,9	-
	área específica <i>Blaine</i> (cm ² /g)	NBR 16372/2015	4516	≥ 2800
Tempos de pega	início de pega (min)	NBR 16607/2018	160 min	≥ 60
	fim de pega (min)		200 min	≤ 600
Água da pasta de consistência normal (%)		NBR 16606/2018	29,1	-
Expansibilidade a quente (mm)			0	≤ 5,0
Resistência à compressão	7 dias (MPa)	NBR 7215/2019	38,2	≥ 25,0
	28 dias (MPa)		40,0	≥ 40,0
	90 dias (MPa)		40,7	-
Componentes químicos	perda ao fogo (%)	NBR NM 18/2012	5	≤ 6,5
	resíduo insolúvel (%)	NBR NM 15/2012	1,3	≤ 2,5
	óxido de magnésio - MgO (%)	NBR NM 11-2/2012	2,5	≤ 6,5
	trióxido de enxofre SO ₃ (%)	NBR NM 16/2012	2,8	≤ 4,0

As adições minerais pozolânicas, sílica ativa (SA) e cinza volante (CV), têm suas caracterizações básicas apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5: Características físico-químicas da sílica ativa.

Característica ou Propriedade Determinada		Método de Ensaio	Resultado	Exigência segundo a NBR 13956-1/2012
Área superficial específica - B.E.T. (m ² /g)		ASTM C-1069	19,5	15,0 ≤ B.E.T. ≤ 30,0
Formato da partícula		Espectrometria de Fluorescência de raio X	esférico	-
Diâmetro médio (µm)			0,2	-
Óxido de magnésio - MgO (%)			1,13	-
Dióxido de silício - SiO ₂ (%)			90,99	-
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃ (%)			1,78	-
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)			0,54	-
Óxido de cálcio - CaO (%)			0,39	-
Perda ao fogo (%)			2,66	≤ 10,0
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio - Na ₂ O	Análise Química - Espectrometria	0,33	-
	Óxido de potássio - K ₂ O		2,39	-
	Equivalente alcalino em Na ₂ O		1,9	-

Elementos majoritários (%)	SiO ₂ , MgO, Fe ₂ O ₃ .	93,9	> 70
----------------------------	--	------	------

Dados obtidos na ficha técnica do material fornecida pelo fabricante.

Tabela 6: Características físico-químicas da cinza volante.

Característica ou Propriedade Determinada	Método de Ensaio	Resultado	Exigência segundo a NBR 12653/2015
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	Espectrometria de Fluorescência de raios X	25,86	
Óxido de cálcio - CaO (%)		1,56	
Óxido de Ferro III – Fe ₂ O ₃ (%)		5,04	
Óxido de potássio – K ₂ O (%)		2,74	
Óxido de magnésio - MgO (%)		0,77	
Óxido de manganês II - MnO (%)		< 0,05	
Óxido de sódio – Na ₂ O (%)		0,46	< 1,5%
Óxido de fósforo V – P ₂ O ₅ (%)		0,07	
Óxido de silício IV – SiO ₂ (%)		61,11	
Óxido de titânio – TiO ₂ (%)		1,13	
Óxido de bário - BaO (%)		< 0,1	
Óxido de cobalto III – Co ₂ O ₃ (%)		< 0,1	
Óxido de cromo III – Cr ₂ O ₃ (%)		< 0,1	
Óxido de chumbo II - PbO (%)		< 0,1	
Óxido de estrôncio - SrO (%)		< 0,1	
Óxido de zinco - ZnO (%)		< 0,1	
Óxido de Zircônio e Óxido de háfnio – ZrO ₂ +HfO ₂ (%)		< 0,1	
Perda ao fogo (%)	0,81	< 6,0%	
Densidade real (g/cm ³)	Gravimétrico – Pícnômetro	2,26	
Cor	Visual	Cinza claro	
Aspecto		Sólido (pó)	
pH (1:1) em água	Potenciométrico	11,32	
Líquidos livres	Volumétrico	Ausente	
Umidade	Gravimétrico NBR NM 24/2003	a 42°C	0,15
		a 105°C	0,28
Análise Química Qualitativa			
Elementos majoritários (%)	Al, Si, Fe.	92,01	> 75%
Elementos em pequeno percentual (%)	Ca, K, Ti.	5,43	
Elementos traços (%)	P, S, Cl, Mn, Ni, Cu, Ga, Ge, Rb, Sr, Nb, Ce, Ti, Th.	2,56	

Dados obtidos na ficha técnica do material fornecida pelo fabricante.

2.3 Proporcionamento e mistura dos microconcretos e cura dos corpos de prova

Foram produzidos microconcretos com uma relação ligante:agregados de 1:3 (em massa), inicialmente sem a incorporação das fibras de PP, sendo este o microconcreto de referência. A obtenção dessa mistura de referência seguiu procedimentos básicos de dosagem prescritos no método IPT/EPUSP [28], de modo a atender aos requisitos de resistência e de consistência. Após a definição do traço de referência, a sílica ativa e a cinza

volante foram incorporadas em substituição parcial do cimento em proporções em massa iguais a 7,5% para cada uma delas (totalizando 15%).

Foram adotados, em relação ao volume da mistura cimentícia, os teores de 0,3%, 0,4% e 0,5% para as adições de macrofibras, sendo respectivamente intitulados: MA0,3; MA0,4 e MA0,5. Estes teores também foram adotados para as misturas híbridas, sendo, respectivamente, assim referenciados: H10,3; H10,4 e H10,5. Os compósitos híbridos foram compostos por 30% de adição de microfibras e 70% de adição de macrofibras. Para as adições de microfibras de PP, foram adotados os seguintes teores: 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4%, tendo-se as seguintes siglas: M10,1; M10,2; M10,3 e M10,4. A relação água/ligante foi definida previamente no estudo de dosagem, baseada em requisitos mecânicos e nas propriedades dos microconcretos no estado fresco, tendo-se como premissa básica a ausência de segregação e exsudação. Os proporcionamentos, em massa, das misturas são apresentados na Tabela 7.

Foi utilizado o aditivo superplastificante *Tec-Flow 7000* (produzido pela fabricante Grace), à base de solução de policarboxilato modificado, cuja adição foi variável a fim de se obterem misturas trabalháveis com abatimentos acima de 130 mm. A faixa de variação empregada do aditivo nas diversas misturas foi de 0,9% a 1,1% em relação à massa total de ligantes. O teor de aditivo variou com o intuito de se buscar abatimentos similares.

Tabela 7: Proporcionamentos de mistura (traços) dos microconcretos, expressos em consumo dos materiais (em kg/m³).

Proporcionamentos	Consumo (kg/m ³)								
	Cimento	SA	CV	Areia natural	Areia artificial	Aditivo	Água	Microfibra	Macrofibra
REF	434,50	38,34	38,34	460,06	1073,47	4,60	240,25	-	-
MA0,3	433,83	38,28	38,28	459,35	1071,83	4,59	239,88	-	2,73
MA0,4	433,61	38,26	38,26	459,12	1071,28	4,59	239,76	-	3,64
MA0,5	433,39	38,24	38,24	458,88	1070,73	4,59	239,64	-	4,55
M10,1	433,86	38,28	38,28	459,39	1071,90	5,61	239,90	0,91	-
M10,2	433,63	38,26	38,26	459,14	1071,32	5,61	239,77	1,82	-
M10,3	433,40	38,24	38,24	458,89	1070,74	5,61	239,64	2,73	-
M10,4	433,17	38,22	38,22	458,66	1070,20	5,61	239,52	3,64	-
H10,3	433,62	38,26	38,26	459,13	1071,30	5,10	239,77	0,82	1,91
H10,4	433,40	38,24	38,24	458,89	1070,75	5,10	239,64	1,09	2,55
H10,5	433,18	38,22	38,22	458,66	1070,21	5,10	239,52	1,37	3,19

Em que: SA = sílica ativa e CV = cinza volante.

2.4 Métodos

Para melhor entendimento do comportamento do microconcreto diante da adição das fibras de polipropileno, no estado fresco, procedeu-se a uma avaliação da consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme prescrições da ABNT NBR 16889: 2020 [29].

A determinação da massa específica, no estado fresco, seguiu os procedimentos da ABNT NBR 9833: 2008 [30], e o ensaio para determinação do teor de ar foi realizado pelo método pressométrico, conforme a ABNT NBR 16887: 2020 [31].

Para a confecção dos microconcretos, cada proporcionamento seguiu o mesmo roteiro de mistura: primeiramente foi realizada a pesagem de todos os materiais conforme a quantidade necessária para a realização de cada traço; em seguida, a betoneira foi umidificada, iniciando-se a adição dos materiais, primeiramente os agregados (areia natural e areia artificial), e 50% do volume de água. Estes componentes foram misturados por cerca de um minuto; em seguida, no próximo minuto, foram adicionados os ligantes e o restante da água, na qual o aditivo superplastificante foi diluído. Após a colocação de todos os constituintes, eles foram misturados por mais doze minutos sendo que, para os proporcionamentos que tiveram a adição de fibras, estas foram adicionadas três minutos antes de finalizar o tempo máximo estipulado de mistura. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio, sendo retirados 6 horas antes da realização dos ensaios. Por fim, para serem submetidos aos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, os corpos de prova tiveram suas bases retificadas.

No estado endurecido, a resistência à compressão axial foi determinada nas idades de 7, 28 e 91 dias, conforme a ABNT NBR 5739: 2018 [32]. O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a

ABNT NBR 8522-1: 2021 [33], empregando-se extensômetros analógicos, com aplicação de carga até 30% da tensão de ruptura do material. Os ensaios foram realizados nas idades de 28 e 91 dias. Para esses ensaios de avaliação das propriedades mecânicas e elásticas do material, foram considerados sempre três corpos de prova para cada uma das misturas analisadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se os resultados da pesquisa experimental, acompanhados de uma discussão contendo as principais considerações referentes aos diferentes sistemas compósitos com fibras de PP no microconcreto. Inicialmente são apresentados os resultados das misturas no estado fresco e, em seguida, os resultados no estado endurecido, com ênfase na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

3.1 Resultados no estado fresco

Após a realização da mistura dos proporcionamentos, foi medido o espalhamento de cada mistura e determinada sua massa em recipiente de volume conhecido. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8: Propriedades no estado fresco.

Propriedade	REF	MA0,3	MA0,4	MA0,5	MI0,1	MI0,2	MI0,3	MI0,4	HI0,3	HI0,4	HI0,5	Método
Abatimento (mm)	250	230	240	230	235	185	175	145	210	195	134	NBR 16889 (2020)
Massa específica (kg/dm ³)	2,26	2,26	2,26	2,26	2,21	2,11	2,00	1,99	2,18	2,16	2,19	NBR 16887 (2020)
Teor de ar (%)	2,0	2,0	2,2	2,2	4,0	7,0	10,0	10,0	4,4	4,6	4,6	

Na Figura 2 são apresentadas imagens das misturas após o ensaio de abatimento do tronco de cone, onde é possível analisar qualitativamente o comportamento das misturas. Como se vê pelos resultados de abatimento dados na Tabela 8 e ilustrados na Figura 2, a adição de fibras de PP no microconcreto afeta sua trabalhabilidade. A seguir, nas Figuras 3 e 4, observando-se o comportamento do microconcreto diante da adição dos teores de 0,3%; 0,4% e 0,5% de macrofibras de PP, em que o teor de aditivo superplastificante foi o mesmo do traço de referência, verificou-se uma tendência de redução do abatimento em torno de 10 mm a 20 mm e um discreto aumento no teor de ar. Apesar dessas alterações, a macrofibra manteve a mistura ainda trabalhável, no nível da trabalhabilidade da mistura de referência, com leves aumentos da consistência. A massa específica dos proporcionamentos com adição de macrofibras ficaram iguais aos valores encontrados no microconcreto de referência.

A incorporação de um novo insumo na mistura (a macrofibra), mesmo se mantendo fixa a relação água/materiais secos (incluindo a fibra na contabilização dos constituintes secos), impacta em leve mudança da área específica do conjunto das partículas sólidas globais das misturas, em comparação ao microconcreto de referência. As alterações reológicas em termos de redução da fluidez (aumento da consistência) são esperadas nesses casos, uma vez que o aumento da superfície específica implica em maior necessidade de pasta ligante para envolver todas as partículas sólidas de agregados e fibras, sem prejuízo da trabalhabilidade. Como o volume de pasta ligante foi mantido fixo, a repercussão no sentido do menor abatimento se justifica, porém, como comentado, não foram registradas alterações de grande monta, a ponto de haver comprometimento da trabalhabilidade das referidas misturas com macrofibras.

Os traços com adição de microfibras (MI0,1; MI0,2; MI0,3 e MI0,4) receberam uma adição de 1,1% de aditivo superplastificante (em relação à massa de cimento), enquanto no proporcionamento de referência foi adicionado um teor de 0,9% de aditivo superplastificante, conforme explicado no item 2.4. Mesmo assim, houve uma redução no abatimento, que foi proporcional ao aumento de adição de microfibras, e que alcançou um percentual de redução de 42% para a mistura MI0,4 em relação à mistura de Referência (Figura 3). Para as adições de 0,3% e 0,4% de microfibras, pode-se observar um aumento expressivo no teor de ar (Figura 4), alcançando o valor máximo de 10% para as misturas MI0,3 e MI0,4. Salienta-se que a mistura de referência

apresentou um teor de ar de 2%.

O teor de ar aprisionado nos microconcretos com microfibras refletiu-se na massa específica no estado fresco. Houve uma redução desta propriedade de forma proporcional ao teor de fibras adicionado, alcançando uma redução em torno de 12% para a adição de 0,4% de microfibras em relação à mistura de referência (Figura 5).



Figura 2: Mistura de referência (a); misturas com adição de macrofibras nos percentuais de 0,3% (b); 0,4% (c) e 0,5% (d); misturas com adição de microfibras nos percentuais de 0,1% (e); 0,2% (f); 0,3% (g) e 0,4% (h); e misturas híbridas nos percentuais de 0,3% (i); 0,4% (j) e 0,5% (k).

Conforme se vê na Figura 3, a mistura híbrida apresentou perda da trabalhabilidade de forma proporcional ao aumento da adição de fibras, tendo-se, para o valor crítico (HI0,5), uma redução percentual de 46,4%, em relação ao microconcreto de referência. Quanto ao teor de ar, foram obtidos valores de até 4,6% para as misturas HI0,4 e HI0,5. Este índice representa um aumento de 130% em relação à mistura de referência (Figura 4). É importante salientar que a mistura híbrida foi composta por 30% de microfibras e 70% de macrofibras; logo, apesar do teor inferior de microfibras, estas influenciaram de forma negativa os compósitos no estado fresco.

Os compósitos com macrofibras apresentaram maior abatimento do que os compósitos com adição de microfibras (Figura 3). Em relação ao teor de ar também ficou nítido que a mistura com adição de macrofibras apresentou melhor resultado, tendo em vista que não ocasionou em aumento desse percentual de ar da mistura, diferentemente do que ocorreu com os traços com adição de microfibras, os quais apresentaram elevado teor de incorporação de ar (Figura 4). Observou-se que as macrofibras não afetaram a massa específica (estado fresco) dos proporcionamentos, diferentemente do ocorrido com os microconcretos com microfibras que tiveram redução das massas, proporcionais aos teores adicionados (Figura 5) e em função do maior teor de ar dessas misturas (Figura 4).

A perda de trabalhabilidade pode ser revertida com a adição de um teor mais elevado de aditivo superplastificante. SIVAKUMAR e SANTHANAM [15], ASLANI e NEJADI [12] e BEIGI *et al.* [9] relataram perda da trabalhabilidade devida à adição das fibras de PP, o que pode demandar maior percentual de aditivo superplastificante de forma compensatória. SIVAKUMAR e SANTHANAM [15] atribuem a redução da trabalhabilidade ao fato de as fibras (especialmente as microfibras) causarem um “empolamento”, o que ocasiona em um aprisionamento da água livre necessária ao adequado amassamento da mistura plástica. O efeito mais acentuado das microfibras em relação às macrofibras sobre as propriedades analisadas deve-se ao fato de a primeira ter uma maior quantidade de fibra por quilograma do material, como se observa na Tabela 1, bem como sua provável maior área superficial em relação à segunda, o que potencializa o efeito de alteração da consistência (comentado anteriormente para o caso da macrofibra).

PIERRE *et al.* [34] concluíram que em argamassas com adição de microfibras de aço, o teor de ar normalmente fica entre 20% e 40% em relação ao volume da pasta no compósito. Os pesquisadores explicaram que o fenômeno ocorre em virtude de as microfibras aumentarem a viscosidade da mistura, formando assim uma rede de partículas semelhantes a agulhas em torno dos vazios de ar retidos, o que evita a fuga destes. WANG *et al.* [35] afirmaram que a incorporação de fibras pode gerar considerável aprisionamento de ar na mistura, principalmente em argamassas, e que pode chegar a um teor de 10% do volume da argamassa, concluindo que esse ar retido é prejudicial às propriedades mecânicas dos compósitos e pode afetar negativamente a sua durabilidade.

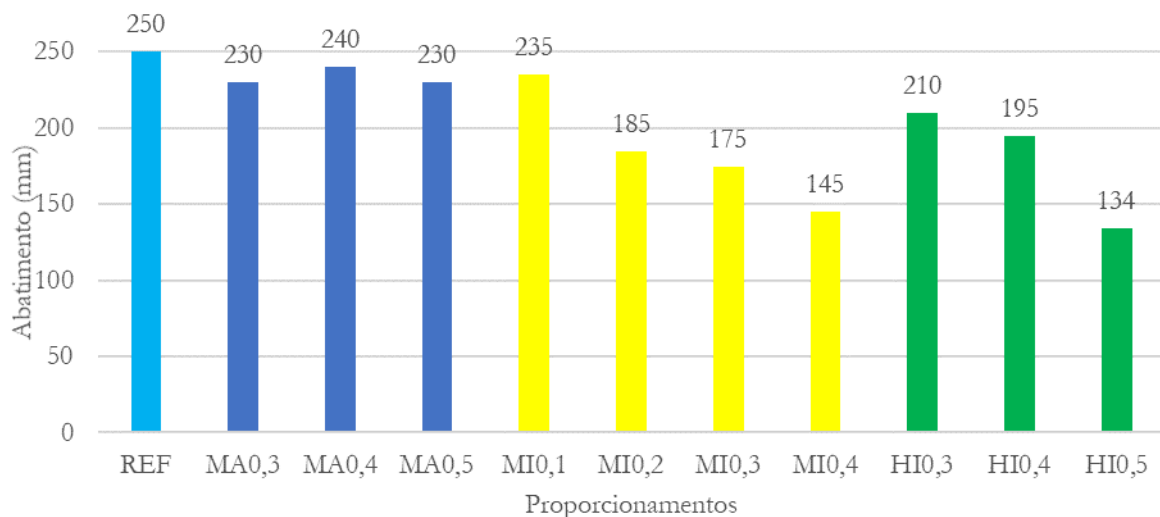


Figura 3: Abatimento dos microconcretos.

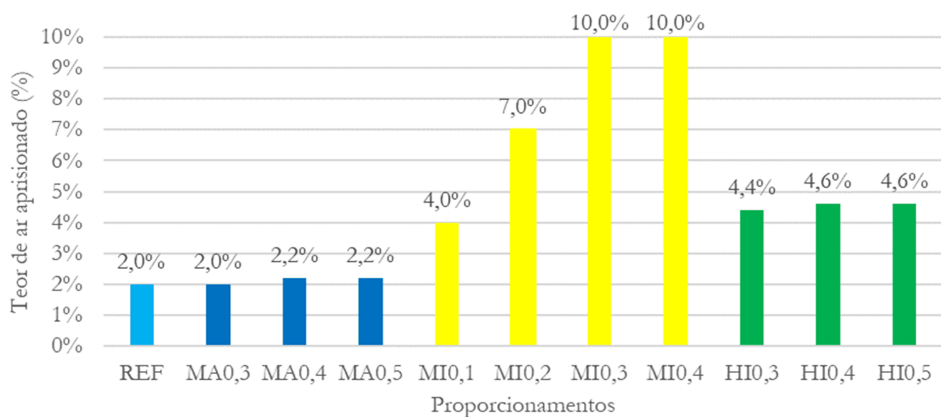


Figura 4: Teor de ar aprisionado.

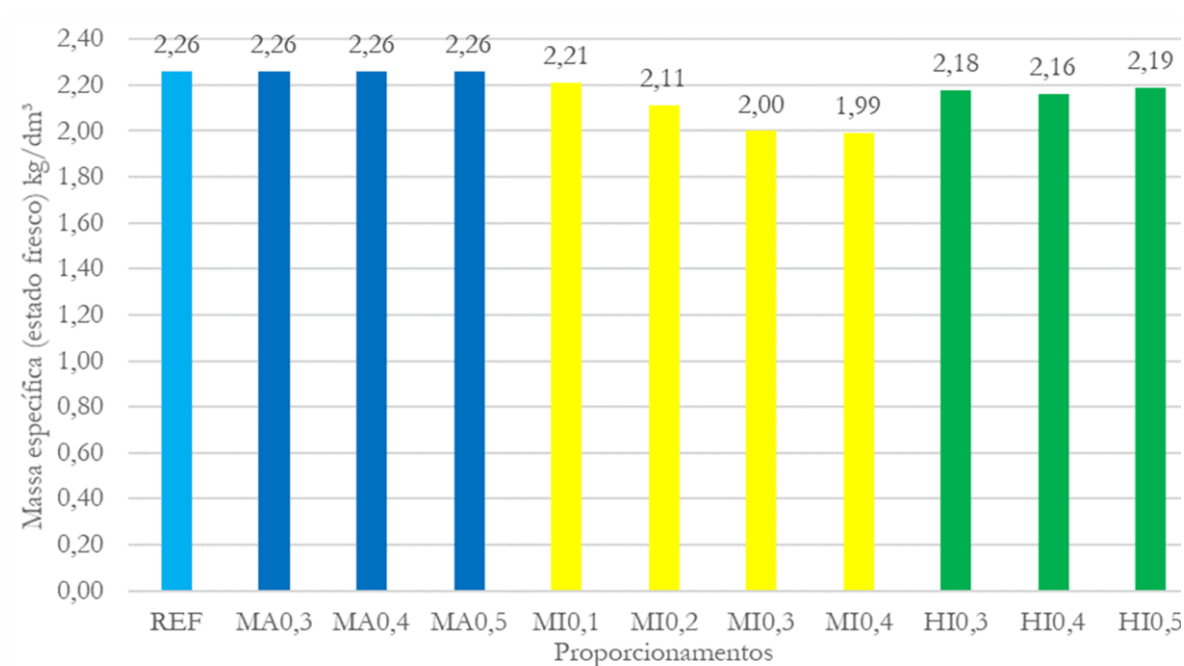


Figura 5: Massa específica dos microconcretos no estado fresco.

3.2 Resultados no estado endurecido

3.2.1 Resistência à compressão

Quanto aos resultados de resistência à compressão axial aos 7 dias (Tabela 9), observou-se, em relação ao microconcreto de referência, que a maioria dos valores foi inferior, com exceção dos microconcretos MA04, MA0,5; HIO,3 e HIO,5, que apresentaram aumento. Nessa idade inicial de 7 dias, na qual a pasta de cimento não está completamente hidratada e consolidada, a adição de macrofibras, promoveu um aumento da resistência à compressão, a partir da adição de 0,4% (MA0,4). Como ela não possui as dificuldades operacionais de homogeneização verificadas no caso das microfibras (neste caso podendo gerar uma microestrutura muito complexa e heterogênea), a inserção dessas fibras maiores na matriz de cimento em uma etapa ainda preliminar de cura muito provavelmente ajudou a reforçar a matriz cimentícia. No caso em questão, houve, aos 7 dias, um indicativo de aumento de resistência conforme o aumento do teor de macrofibras. Mesmo a mistura MA0,3, cujo valor médio foi um pouco inferior ao valor médio da referência, não se pode afirmar que essa mistura apresentou, necessariamente, uma redução de resistência, já que o seu desvio padrão (igual a $\pm 5,14$ MPa) coloca a faixa de dispersão de valores individuais para além do valor médio de REF. Ressalta-se também que a adição das microfibras, nos teores maiores (MIO,3 e MIO,4) apresentaram queda em torno de 27%

em relação aos microconcretos MIO,1 e MIO,2, conforme a Figura 6b. As misturas híbridas expressam um comportamento intermediário entre aqueles verificados para as macrofibras e para as microfibras isoladamente. Aos 7 dias, as misturas HIO,3 e HIO,5 (com os dois tipos de fibra) apresentaram resistência superior à mistura de referência, e percebe-se comportamento melhor da mistura com 0,3% de fibras (HIO,3) em comparação com as misturas HIO,4 e HIO,5. Certamente, as fibras em maiores teores, especialmente as microfibras, causaram dificuldades operacionais as quais se refletiram negativamente na microestrutura e, por conseguinte, nas propriedades mecânicas. No caso das misturas híbridas, aos 7 dias, vê-se nitidamente uma mistura de comportamento ótimo de resistência, que foi a mistura HIO,3.

Os resultados de 28 e 91 dias são bastante similares entre si, principalmente para os compósitos avaliados separadamente (macro e microfibras). Nas misturas com macrofibras, os resultados se mostraram discretamente superiores em relação à mistura de referência. (Figura 6a e Tabela 9). Nas misturas com microfibras (Figura 6b), no entanto, há um comportamento interessante. Percebe-se que as microfibras (nos valores praticados neste trabalho), podem agregar valor no sentido de potencializar a resistência à compressão. Porém, há um teor ótimo, verificado na mistura MIO,1, na qual este teor, muito provavelmente, permitiu uma boa dispersão das fibras e uma boa homogeneização. Estando bem dispersas na matriz, as microfibras fornecem superfície para melhorar a coesão no estado plástico (melhorando a capacidade de retenção de água do sistema), assim como gera superfície para desenvolver pontos de nucleação, contribuindo assim para densificar a microestrutura, ao mesmo tempo em que exerce a ação de reforçar a matriz cimentícia. Na idade de 91 dias, na mistura MIO,1, há um acréscimo de cerca de 19% de resistência em relação à mistura de referência, como se pode ver na Tabela 9 e Figura 6b. Porém, o mesmo bom desempenho não foi visto para as demais misturas. Na Figura 6b, é possível observar que os valores médios de resistência caem significativamente abaixo do valor de referência (exceto a mistura MIO,2, que se mostrou discretamente superior a ela), de maneira que, aos 91 dias, por exemplo, o valor de MIO,3 reduz 37% em relação a REF e sua diferença em relação a MIO,1 é de 47%.

Nas misturas híbridas, os resultados aos 28 dias apresentaram discreto acréscimo em relação à mistura de referência, especialmente os traços HIO,3 e HIO,4. Aos 91 dias, são ainda mais perceptíveis os acréscimos de resistência em relação a REF para os três traços (HIO,3, HIO,4 e HIO,5). Os resultados são mais altos para a mistura HIO,3 e decrescem suavemente nos demais teores de fibras (HIO,4 e HIO,5), mas ainda assim se mantêm mais elevados em relação à mistura de referência. Esses aumentos aos 91 dias podem ter sido resultado de efeitos sinérgicos das pozolanas empregadas nos traços (sílica ativa e cinza volante) nos sistemas contendo fibras, o que potencializou a ocorrência de reações pozolânicas após 28 dias, produzindo melhorias na microestrutura, as quais colaboraram para os aumentos de resistência. Para os microconcretos híbridos em relação ao microconcreto de referência, na idade de 91 dias, foram verificados aumentos da resistência à compressão de cerca de 19%, 16% e 13%, respectivamente para os teores de fibras de 0,3%, 0,4% e 0,5% (Figura 6c).

Tabela 9: Propriedades no estado endurecido – valores médios (os dados entre parênteses representam o desvio padrão).

Proporcionamentos	Resistência à Compressão (MPa)			Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
	7 dias	28 dias	91 dias	91 dias	91 dias	28 dias	91 dias
REF	38,01 ± (2,43)	49,02 ± (1,80)	50,08 ± (3,78)	4,49 ± (0,34)	9,69 ± (0,69)	29,35 ± (2,12)	29,80 ± (0,76)
MA0,3	36,29 ± (5,14)	52,29 ± (4,29)	54,07 ± (1,56)	5,21 ± (0,25)	11,07 ± (0,51)	37,00 ± (6,31)	36,9 ± (0,29)
MA0,4	40,11 ± (6,48)	49,32 ± (4,08)	59,91 ± (1,71)	4,41 ± (0,30)	9,56 ± (0,69)	28,52 ± (0,20)	29,00 ± (5,39)
MA0,5	44,27 ± (4,19)	53,14 ± (4,10)	56,91 ± (7,38)	4,72 ± (0,13)	10,24 ± (0,26)	29,0 ± (2,17)	32,00 ± (2,17)
MIO,1	34,33 ± (2,19)	56,62 ± (3,63)	59,63 ± (2,75)	3,93 ± (0,13)	8,46 ± (0,23)	30,90 ± (1,60)	29,30 ± (0,50)
MIO,2	34,59 ± (2,64)	33,91 ± (2,93)	53,86 ± (4,14)	4,96 ± (0,52)	10,14 ± (0,9)	24,60 ± (2,71)	25,90 ± (0,42)
MIO,3	24,11 ± (0,65)	29,92 ± (0,34)	31,49 ± (2,23)	7,12 ± (0,52)	13,40 ± (0,87)	21,02 ± (0,82)	26,30 ± (5,10)
MIO,4	26,31 ± (1,57)	36,84 ± (1,73)	34,63 ± (7,25)	6,68 ± (0,09)	12,87 ± (0,20)	23,29 ± (1,95)	27,30 ± (0,97)
HIO,3	45,96 ± (2,10)	53,67 ± (0,81)	59,42 ± (2,53)	4,40 ± (0,48)	9,55 ± (1,22)	29,30 ± (2,04)	28,60 ± (0,29)
HIO,4	36,80 ± (2,26)	52,58 ± (1,42)	58,02 ± (0,27)	4,25 ± (0,10)	9,01 ± (0,22)	29,40 ± (0,20)	28,20 ± (0,43)
HIO,5	40,79 ± (1,91)	51,14 ± (2,06)	56,47 ± (0,09)	4,41 ± (0,2)	9,34 ± (0,41)	26,45 ± (1,18)	25,30 ± (0,41)

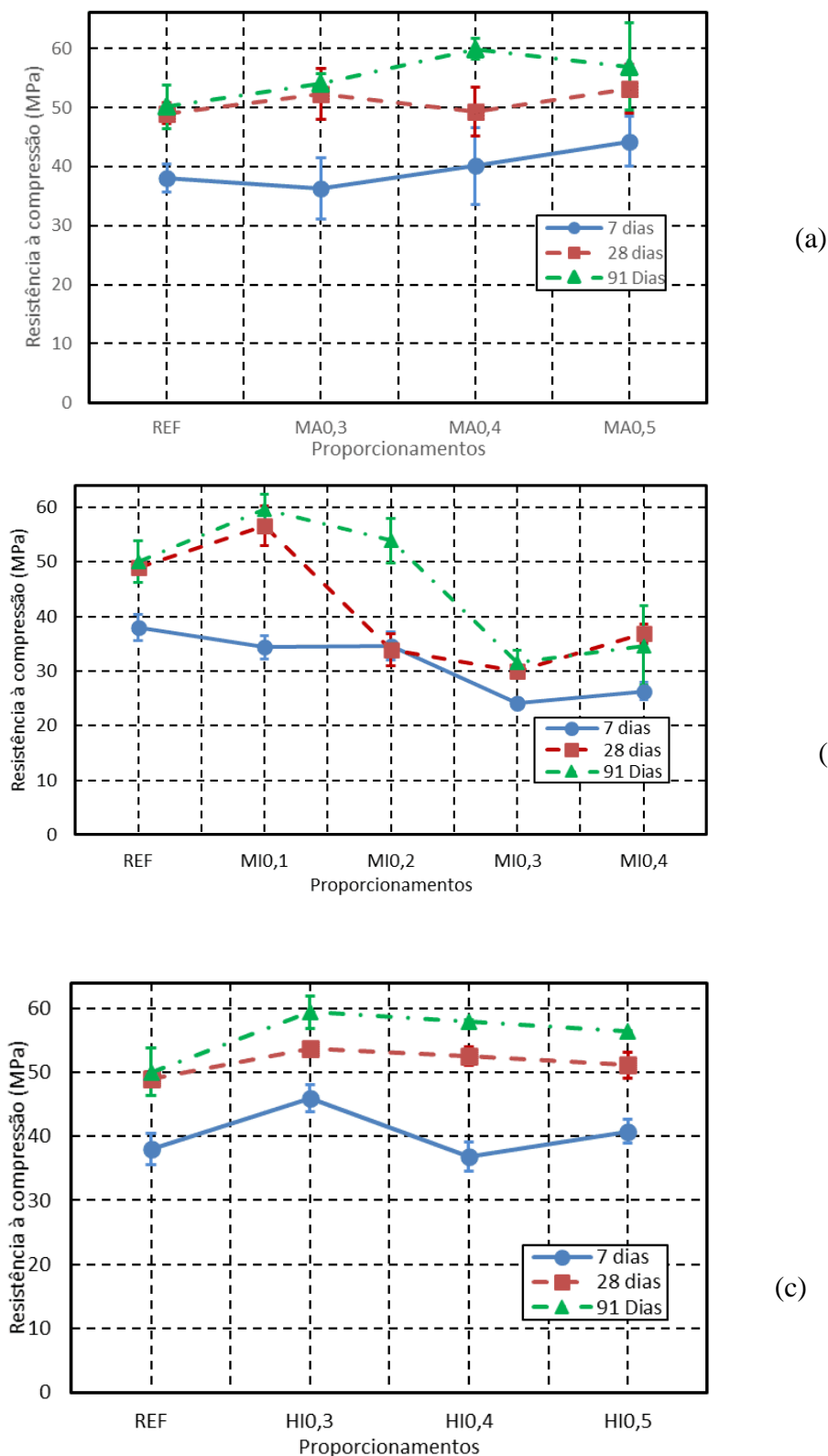


Figura 6: Resistência à compressão axial do microconcreto de referência, aos 7, 28 e 91 dias. Microconcreto com adição de macrofibras (a), microfibras (b) e composição híbrida (c).

Sumarizando os resultados de resistência à compressão nas três idades, percebeu-se que, de forma geral, os microconcretos com macrofibras apresentaram aumento de sua resistência mecânica, ou seja, a adição de fibras foi benéfica para a resistência à compressão, especialmente nas porcentagens de 0,4% e 0,5%. Quanto às misturas com microfibras, os mais altos resultados de resistência foram observados nas adições

iniciais (0,1%, e 0,2%), tendo-se redução nos teores subsequentes (0,3% e 0,4%). Em relação aos microconcretos híbridos, houve aumento de resistência nas idades de 28 e 91 dias para todos os teores, tendo-se um discreto destaque para os microconcretos com o menor teor de fibras (0,3%).

A adição isolada das macrofibras, seja pelos teores praticados no presente trabalho, seja pelas características intrínsecas dessas macrofibras (fator de forma, comprimento, espessura, geometria etc.), ou por essas duas razões em conjunto, proporcionaram aumento da resistência mecânica aos microconcretos. Já as microfibras produziram efeitos mais intensos nas matrizes cimentícias, tanto no sentido de melhorar, quanto no sentido de piorar o comportamento mecânico. Houve, contudo, com protagonismo das microfibras, um efeito sinérgico ao se produzirem as misturas híbridas. Isto é verdade, já que nestas misturas foram alcançados resultados em patamares mais elevados do que aqueles verificados nos sistemas analisados isoladamente, assim como em todas essas misturas híbridas, todos os valores estiveram acima da mistura de referência (aos 28 e 91 dias), sem quedas importantes de resistência nos teores mais altos (como se verificou no estudo apenas com microfibras). Nas misturas híbridas, houve destaque para o microconcreto HI0,3, mas a mistura HI0,4 produziu um resultado de resistência próximo a esse compósito com 0,3% de fibras.

Os resultados com o teor ótimo de fibras auxiliam no sentido de densificar a matriz cimentícia. As fibras adequadamente dispersas propiciam superfície específica adicional para aumentar o quantil de água adsorvida no material em estado plástico (fresco), contribuindo assim para uma maior capacidade de retenção de água e, dessa forma, cooperando para uma autocura do sistema cimentício, o que agrega valor na redução do fenômeno de retração plástica e na microfissuração inicial da matriz. Essa superfície específica adicional favorece a que pontos de nucleação aconteçam na hidratação do cimento, ajudando à concepção de uma microestrutura mais homogênea e densa. Contudo, há claramente um teor ótimo, acima do qual o efeito passa a ser negativo. Com maiores teores, muito provavelmente ocorre o “empolamento” ou o “empelotamento” dessas fibras na mistura fresca, sem que haja sua adequada dispersão no sistema (como discutido no item 2.1). Isto aprisiona água, com prejuízos da trabalhabilidade, ao mesmo tempo que produz uma microestrutura heterogênea, com muitos vazios e defeitos. Para corrigir e melhorar a trabalhabilidade, esses sistemas contendo mais fibras demandam mais aditivo plastificante, o que contribui com um maior percentual de incorporação de ar (como visto na Tabela 8). O resultado é uma microestrutura mais heterogênea e com um maior índice de vazios, ou seja, mais porosa e, conseqüentemente, apresentando maiores valores de absorção de água, como visto na Tabela 9. O efeito imediato desse quadro piorado na estrutura interna do material é uma perda nas suas propriedades mecânicas. Com efeito, uma constatação importante extraída do presente trabalho é que a adição de teores acima de 0,2% de microfibras (nas condições de estudo deste programa experimental) ultrapassa o limite máximo para uma adequada homogeneização das partes constituintes.

WANG, BANTHIA e ZHANG [35] observaram que o uso de um aditivo redutor de retração pode aumentar a capacidade de umedecimento das fibras e reduzir o teor de ar incorporado nas argamassas, de modo que esta pode ser uma alternativa para minimizar a incorporação de ar nos microconcretos com adição superior a 0,1% de microfibras. Outros pesquisadores, como SUN e XU [4] e NILI e AFROUGHSAKET [7], utilizaram microfibras de PP semelhantes às estudadas no presente estudo e verificaram aumento da resistência à compressão para teores próximos de 0,1%. No trabalho de SUN e XU [4], eles confirmaram a densificação da microestrutura do concreto com teores dessa ordem de grandeza, atribuindo a este fato o ganho de resistência à compressão no concreto. GOLFETTO et al. [36] identificaram que as microfibras elevam de forma significativa a resistência à compressão do concreto, tendo atribuído essa melhoria à amarração das microfissuras e à atuação das fibras como pontos de nucleação. XIE et al. [37] complementaram a argumentação dessa melhoria em razão do preenchimento e da modificação da interface da matriz cimentícia com os agregados. Ainda em relação à resistência à compressão, BLAZY, J. e BLAZY, R. [38] ressaltaram que a viabilidade do uso de fibras de polipropileno depende de suas propriedades físicas (forma, dimensão, comprimento, diâmetro e esbeltez), em conjunto com a dosagem ideal. A compatibilização de todas essas características, que resulta em otimização da mistura, é determinante para a obtenção de valores mais elevados de resistência mecânica do compósito.

3.2.2 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade estático tangente inicial aos 28 e 91 dias dos microconcretos podem ser vistos na Tabela 9 e Figura 7.

Entre os microconcretos com adição de macrofibras, os resultados de módulo de elasticidade se mostraram similares, a exceção do MA0,3 que apresentou o resultado de módulo de elasticidade superior aos demais, nas duas idades. Observa-se que, neste caso, ao se analisar os valores de absorção total de água, não há indícios de uma porosidade menor, que implique numa possível densificação da microestrutura deste concreto. Antes, a presença da macrofibra, nesta proporção, pode ter restringido as deformações proporcionando,

assim, um maior valor do Módulo.

Já entre os microconcretos com adição de microfibras, em ambas as idades (28 e 91 dias), o MIO,1 apresentou resultado similar ao de referência; os demais, tenderam a uma redução desta propriedade. Quanto aos microconcretos híbridos, as misturas HIO,3 e HIO,4 apresentaram resultados similares à referência, mas há uma queda para o microconcreto HIO,5.

De forma geral, os melhores resultados registrados nos compósitos foram nos menores teores de fibra, a saber: MA0,3 para as misturas com macrofibra, MIO,1 para as misturas com microfibra, e HIO,3 e HIO,4 para as misturas híbridas. Também de forma geral, constatou-se para esses diferentes sistemas um comportamento de teor ótimo (registrado nesses menores teores), assim como foi visto para a resistência à compressão. Contudo, para esta análise do módulo de elasticidade, não se verificou contribuição dos sistemas compostos com fibras no sentido de aumentar o módulo de elasticidade. Com exceção do MA0,3, todos os demais microconcretos com fibras ou igualaram ou reduziram o módulo (em comparação a REF). Sabe-se da literatura que para aumentar, de fato, a rigidez dos sistemas cimentícios, existe uma contribuição realmente efetiva do tipo de agregado, bem como da relação agregado/cimento (menores volumes de pasta implicam em maior módulo), assim como colaboram para isso a redução da relação água/cimento, a incorporação de uma adição mineral como a sílica ativa e realização efetiva de cura. As fibras com alto módulo de elasticidade, como por exemplo as fibras de aço, podem promover aumento do módulo de elasticidade do compósito, mas as de polipropileno (como as que foram empregadas neste trabalho) não sugerem aumentos de rigidez, o que de fato foi verificado. Como houve um efeito potencializador dessas fibras em microconcretos no tocante à resistência a compressão, associado a um efeito densificador da microestrutura, ponderou-se sobre a possibilidade desse aspecto se refletir, também, em termos do aumento do módulo. Porém, alterar a rigidez desses sistemas cimentícios, numa escala muito menos sensível (ao nível de GPa), é uma ação que exige maior esforço técnico. É preciso efetivamente incorporar ou aumentar fases rígidas no sistema, como agregados duros e rígidos, ou fibras de aço, dentre outras ações (como mencionado), não esperando que fibras de baixo módulo possam alavancar solitariamente essa propriedade.

Finalmente, os resultados e discussão aqui apresentados, tanto nas propriedades no estado fresco, quanto no estado endurecido, subsidiam e atualizam o estado da arte resumido e apresentado na Tabela 1, no âmbito do microconcreto com incorporação de fibras de PP.

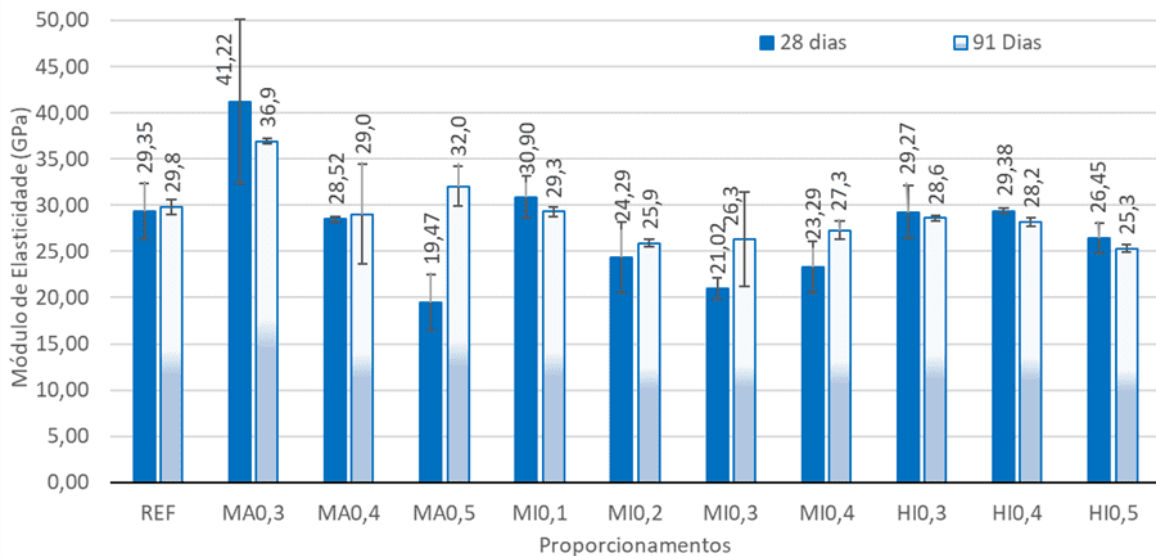


Figura 7: Módulo de elasticidade dos microconcretos aos 28 e 91 dias.

4. CONCLUSÕES

Após o programa experimental envolvendo os microconcretos com fibras de PP, têm-se as seguintes conclusões:

- A trabalhabilidade foi influenciada pela adição das fibras em todos os teores praticados na

pesquisa, tanto com as fibras isoladas como nas misturas híbridas. As perdas mais expressivas ocorreram diante da adição das microfibras, tanto na adição individual como na híbrida. Tal resultado deve-se à elevada área específica das microfibras, causando relevantes alterações na reologia do microconcreto;

- As macrofibras não afetaram a massa específica (estado fresco) dos proporcionamentos, diferentemente do ocorrido com os microconcretos com microfibras que tiveram redução nos valores dessa propriedade, proporcionais aos teores adicionados, em função dos maiores teores de ar aprisionado e incorporado nestas misturas;
- Nas misturas com macrofibras, os resultados de resistência à compressão a 28 e 91 dias tiveram melhora, mostrando que essas fibras, nos teores praticados, proporcionaram melhora do arranjo da argamassa, de modo a promover maior resistência à ação do esforço de compressão axial;
- As microfibras contribuíram para aumentar a resistência à compressão, havendo um teor ótimo no percentual de 0,1%. Muito provavelmente, este teor permitiu uma boa dispersão das fibras e uma boa homogeneização, o que favoreceu à obtenção de uma microestrutura mais homogênea e densa. Na idade de 91 dias, nessa mistura com 0,1% de microfibras, há um acréscimo de cerca de 19% na resistência à compressão em relação à mistura de referência;
- Com 0,2% e, principalmente, com 0,3% e 0,4% de microfibras, as resistências caem de forma relevante (notadamente nesses dois últimos teores). Nestes compósitos, há prejuízos quanto à dispersão das fibras e quanto à homogeneidade da mistura cimentícia, o que se reflete na concepção de uma microestrutura heterogênea, com muitos vazios e defeitos;
- Nas misturas híbridas, aos 28 dias, os resultados de resistência não mostraram alterações importantes em relação à mistura de referência. No entanto, aos 91 dias, foram significativos os acréscimos em relação a REF (notadamente o traço HI0,3). Esses aumentos podem ter sido resultado de efeitos sinérgicos das pozolanas empregadas nos traços (sílica ativa e cinza volante) nos sistemas contendo fibras, o que potencializou a ocorrência de reações pozolânicas após 28 dias, produzindo melhorias na microestrutura;
- Quanto à análise do módulo de elasticidade, não se verificou contribuição dos sistemas compostos com fibras no sentido de aumentar os valores dessa propriedade. Com exceção do microconcreto com 0,3% de macrofibra, todas as demais misturas (com fibras) ou igualaram ou reduziram o módulo (em comparação a REF);
- Apesar das fibras terem potencializado a resistência à compressão (em algumas situações), alterar a rigidez desses sistemas cimentícios, numa escala muito menos sensível (ao nível de GPa), não foi possível. Fibras de polipropileno (de baixo módulo) têm uma ação agregadora até o nível da resistência mecânica, mas se mostram impotentes para impactar o módulo de elasticidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda equipe do laboratório de materiais da UFG pelo apoio na realização dos ensaios, bem como às empresas Grace Brasil LTDA e Neomatex Comércio de Fibras e Têxteis Técnicos LTDA, pelo apoio com fornecimento do aditivo superplastificante e das fibras de PP, respectivamente. O Prof. Oswaldo Cascudo agradece, também, ao CNPq pela concessão de bolsa de pesquisador.

6. REFERÊNCIAS

- [1] PASCHALIS, S. A., LAMPROPOULOS, A. P. “Developments in the use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete as strengthening material”, *Engineering Structures*, v. 233, p. 111914, 2021.
- [2] MANO, E. B., *Polímeros como materiais de engenharia*. 2º Reimpressão 1º ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 2000.
- [3] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 2º ed., São Paulo, Ibracon, 2014.
- [4] SUN, Z., XU, Q. “Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete”, *Materials Science and Engineering A*, v. 527, n. 1-2, pp. 198–204, Jul. 2009.
- [5] KAKOOEI, S., AKIL, H. M., JAMSHIDI, M., *et al.* “The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, pp. 73-77, Aug. 2012.

- [6] BAGHERZADEH, R., SADEGHI, A.-H., LATIFI, M. "Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete", *Textile Research Journal*, v. 82, n. 1, pp. 88-96, 2012.
- [7] NILI, M., AFROUGHSABET, V. "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 6, pp. 927-933, Jan. 2010.
- [8] CORINALDESI, V., MORICONI, G. "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions", *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, pp. 596-601, Mar. 2011.
- [9] BEIGI, M. H., BERENJIAN, J., OMRAN, O. L., *et al.* "An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete", *Materials and Design*, v. 50, pp. 1019-1029, Mar. 2013.
- [10] YAO, W., ZHONG, W. "Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete", *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, v. 22, n. 1, pp. 52-55, Feb. 2007.
- [11] ZHANG, P., LI, Q., ZHANG, H. "Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 30, n. 16, pp. 1349-1358, 1 ago. 2011.
- [12] ASLANI, F., NEJADI, S. "Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression", *Composites Part B: Engineering*, v. 53, pp. 121-133, Apr. 2013.
- [13] ALHOZAIMY, A. M., SOROUSHIAN, P., MIRZA, F. "Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials", *Cement and Concrete Composites*, v. 18, n. 2, pp. 85-92, Oct. 1996.
- [14] MEDINA, N. F., BARLUENGA, G., HERNÁNDEZ-OLIVIAIRES, F. "Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement", *Construction and Building Materials*, v. 96, pp. 556-566, Aug. 2015.
- [15] SIVAKUMAR, A., SANTHANAM, M. "A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete", *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 7, pp. 575-581, Mar. 2007.
- [16] TOUTANJI, H., MCNEIL, S., BAYASI, Z. "Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 7, pp. 961-968, May 1998.
- [17] AFROUGHSABET, V., OZBAKKALOGLU, T. "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, v. 94, pp. 73-82, Jun. 2015.
- [18] ZHANG, P., LI, Q. "Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume", *Composites Part B*, v. 45, n. 1, pp. 1587-1594, 2013.
- [19] FELEKOĞLU, B., TOSUN, K., BARADAN, B. "Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites", *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 11, pp. 1023-1032, Jul. 2009.
- [20] GEORGIIOU, A., PANTAZOPOULOU, S. "Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites", *Construction and Building Materials*, v. 125, pp. 1216-1228, Sep. 2016.
- [21] ZHAO, Q., YU, J., GENG, G., *et al.* "Effect of fiber types on creep behavior of concrete", *Construction and Building Materials*, v. 105, pp. 416-422, Dec. 2015.
- [22] LIU, Z., WORLEY, R., DU, F.; HUSTON, D., *et al.* "Measurement of stress-time avalanches inside polypropylene fiber reinforced concrete beams during flexure", *Construction and Building Materials*, v. 270, p. 121428, 2021.
- [23] POTHISIRI, T., CHOU, S., SEKTHEERA, C. "Effect of polypropylene fibers and wire mesh on fire performance of precast concrete walls", *ACI Structural Journal*, v. 113, n. 2, pp. 393-403, Mar. 2016.
- [24] UYSAL, M., TANYILDIZI, H. "Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network", *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, pp. 404-414, Jul. 2011.
- [25] VARHEN, C., DILONARDO, I., ROMANO, R. C. O., *et al.* "Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcrete", *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 375-386, 2016.
- [26] ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação", Rio de Janeiro, RJ, 2009. Versão corrigida: 2019, 9 p.
- [27] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos", Rio de Janeiro, RJ, 2018. 12 p.
- [28] HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. *Manual de dosagem do concreto*. PINI: São Paulo (1992).
- [29] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone", Rio de Janeiro, RJ, 2020, 5p.
- [30] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico", Rio de Janeiro, RJ, 2008. Versão corrigida 2009. 7 p.

- [31] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 16887: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico”, Rio de Janeiro, RJ, 2020, 18 p.
- [32] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, RJ, 2018, 9 p.
- [33] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação”, Rio de Janeiro, RJ, 2021, 24 p.
- [34] PIERRE, P., PLEAU, R., PIGEON, M. “Mechanical properties of steel microfiber reinforced cement pastes and mortars”, *Journal of Materials*, p. 317-324. 1999.
- [35] WANG, J., BANTHIA, N., ZHANG, M. “Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites”, *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 4, p. 443-450, 2012.
- [36] GOLFETTO, J. M., PADILHA, F., SCHIMELFENIG, B., *et al.* Experimental study of the influence of the addition of polypropylene microfibers and cure on the surface hardness of concrete floors. *Revista Matéria*, v. 24, n. 3, p. 1–7, 2019.
- [37] XIE, C., CAO, M., KHAN, M., *et al.* Review on different testing methods and factors affecting fracture properties of fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 273, p. 121766, 2021.
- [38] BLAZY, J., BLAZY, R. “Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces” *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, n. 10, p. e00549, 2021.

ORCID

Reginaldo Virgilio da Silva

<https://orcid.org/0000-0002-6645-7316>

Oswaldo Cascudo

<https://orcid.org/0000-0003-1879-6396>

Edgar Bacarji

<https://orcid.org/0000-0003-2954-2260>