

Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e adição de fibras de aço e de vidro AR

Mechanical behavior analysis of concrete with recycled aggregate and addition of steel and AR glass fiber

Bruna O. Furian¹ , Lia L. Pimentel¹ ,
Nádia C. S. Forti¹ , Ana Elisabete P. G. A. Jacintho¹ 

¹Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Rua Prof. Dr. Euryclides de Jesus Zerbini, 1546, Parque das Universidades, 13087-571, Campinas, SP, Brasil.

e-mail: anajacinto@puc-campinas.edu.br; bruno_furian@hotmail.com; lialp@puc-campinas.edu.br; nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br

RESUMO

A extensa utilização do concreto no mundo provoca a geração de grandes quantidades de resíduos, vinculada a sua produção e utilização. Hoje, esse resíduo é subestimado, porém em alguns países o seu uso como agregado reciclado é permitido na produção de novos concretos. Estudos apontam que o agregado reciclado no concreto pode diminuir algumas das suas características mecânicas. Visando mitigar este problema, propõe-se o estudo do comportamento deste compósito com resíduos, adicionando fibras. O objetivo desse trabalho foi a análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com agregado reciclado e fibras de aço e de vidro do tipo AR. Foram executados dois traços base, o de referência com agregado natural e o traço com 30% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. A partir destes dois traços base foram produzidos concretos com porcentagens, em volume, de 0,25%, 0,38% e 0,50% de fibras, tanto de aço, como de vidro AR, totalizando 14 traços. Foram determinadas a resistência à compressão axial, resistência à tração, módulo de elasticidade, capacidade de absorção de água e massa específica. Os resultados obtidos foram analisados com auxílio da análise de variância (ANOVA). Foi possível verificar que a resistência à compressão, aos 28 dias, tende a aumentar quanto maior o teor de fibra, principalmente com o uso de agregado reciclado. Quando se aumenta o teor de fibras de aço ocorre aumento no módulo de elasticidade, sendo que esse comportamento não é observado para o concreto com a fibra de vidro AR. Para os ensaios de absorção e massa específica, o tipo de agregado não influencia de maneira significativa no comportamento dos concretos estudados.

Palavras-chave: Concreto; Agregado reciclado; Fibra de aço; Fibra de vidro AR; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The extensive use of concrete in the world causes the generation of large amounts of waste, linked to its production and use. At present, this waste is little used, however in some countries its use as a recycled aggregate is allowed in the production of new concrete. Studies indicate that the use of the recycled aggregate may reduce some mechanical characteristics of the concrete. In order to mitigate this problem, it is proposed the study of the behavior of this composite with fibers. The objective of this work was to analyze the mechanical behavior of concrete produced with recycled aggregate and steel and AR glass fibers. For the development of the research, two proportions of mixtures were executed, the reference with natural aggregate and the mixture with 30% of natural aggregate replacement by the recycled aggregate. From these, two mixtures were produced with percentages by volume addition of 0.25%, 0.38% and 0.50% of fiber, both of steel fiber and AR glass fiber, totaling 14 concretes. The axial compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, water absorption capacity and specific mass were determined. The results were analyzed with the aid of analysis of variance (ANOVA). With this, it was possible to verify that the compressive strength, at 28 days, tends to increase with the increase of the fiber content, mainly with the use of recycled aggregate. When the steel fiber content increases, there is

an increase in the modulus of elasticity, and this behavior is not observed for the concrete with AR glass fiber. For absorption and specific mass tests, the type of aggregate does not significantly influence the behavior of the concretes of this research.

Keywords: Concrete; Recycled aggregate; Steel fiber; Glass fiber; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente, o concreto é um dos materiais mais consumidos e isso ocorre devido a sua versatilidade, sendo bem maleável para moldagem de qualquer formato e após endurecido possui alta resistência à compressão [1]. Para a produção do concreto é necessária a extração de matérias primas, como, areia, brita, além do consumo de cimento.

A produção do concreto e a extração dos materiais utilizados em sua mistura geram sérios impactos ambientais. Além disso, a construção civil gera grande quantidade de resíduos provenientes da construção e demolição, sendo que muitas vezes o descarte desse material ocorre em locais impróprios, aumentando a poluição [2, 3]. Com isso é importante e necessário que ocorram mudanças na indústria da construção civil visando a sustentabilidade. Uma dessas mudanças poderia ser o aumento do uso de resíduos da construção na fabricação de novos concretos.

A utilização do agregado reciclado de concreto gera algumas mudanças, geralmente negativas, em suas propriedades, como por exemplo o aumento da capacidade de absorção de água, redução da massa específica, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade [4–8].

As resoluções do CONAMA 307 [9] e CONAMA 348 [10], responsabilizam os geradores de resíduos e classificam os que são da construção civil, indicando uma destinação adequada.

Contudo, a NBR 15116 [11], especifica que o agregado reciclado deve ser proveniente de resíduos da Classe A, com isso os agregados gerados são classificados em três tipos:

- Agregado reciclado de concreto (ARCO)—agregado reciclado constituído predominantemente por resíduos de concreto
- Agregado reciclado cimentício (ARCI)—constituído predominantemente por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha.
- Agregado de resíduo misto (ARM)—Deve ser composto por menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rocha.

Existem muitas normas internacionais que permitem a utilização do agregado reciclado na produção de concreto para fins estruturais, em países como Alemanha, Hong Kong, Japão, Reino Unido, Holanda, Portugal, Bélgica. Segundo GONÇALVES [12] e GONÇALVES [13] os agregados reciclados são classificados, geralmente, quanto a sua composição e sua destinação, contudo a maioria das normas dos países acima citados, classificam os agregados da seguinte maneira:

- RCA (agregado reciclado de concreto)
- MRA (mistura de agregado reciclado de concreto e de alvenaria)
- RMA (agregado reciclado de alvenaria)

Para mitigar as alterações que ocorrem nas propriedades do concreto quando produzido com agregado reciclado, esse trabalho propõe o uso de fibras de aço e de vidro AR. Essa decisão foi tomada baseada em alguns trabalhos de DELLA PETRA [14], DE BRITO [15] e SANTOS [16] que afirmam que a utilização de fibras no concreto com agregado reciclado podem melhorar seu comportamento mecânico.

Segundo FIGUEIREDO [17] o concreto é um material que possui limitações, devido a fragilidade e baixa capacidade de deformação antes de ruptura quanto tracionado, com isso, o uso de fibras é uma alternativa para o reforço do concreto na sua resistência à tração. Existem muitos tipos de fibras, tais como, aço, vidro, amianto, polipropileno, nylon, acrílico, polietileno, sisal, etc. As fibras se diferenciam pelo material que são produzidas, sua geometria e o comprimento.

A combinação do concreto com a fibra permite que o compósito tenha resistência à tração e ductilidade necessárias, além disso as fibras podem conferir ao compósito diminuição de retração, maior resistência ao impacto e melhor comportamento pós fissuração, à erosão e à fadiga, etc. [18]. As fibras atuam como ponte de transferências de tensões nas fissuras do compósito, sendo assim ocorre um aumento de energia associada à ruptura desse material, além disso pode restringir a propagação de fissuras no compósito [17].

Portanto, esse trabalho teve como objetivo de analisar o comportamento mecânico de concretos produzidos com agregado reciclado e fibras de aço e vidro AR.

A reciclagem dos resíduos de concreto transformando-os em agregado, é um dos procedimentos indicados para mitigar um dos grandes impactos ambientais causados pela construção civil. Sendo assim, existe

a necessidade de medidas alternativas para ampliar o consumo dos agregados reciclados em maior escala no Brasil. Para tornar a construção civil mais sustentável propõe-se transformá-la em uma cadeia de ciclo fechado, onde o resíduo gerado retorna para a própria cadeia produtiva.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi iniciada com a produção do agregado reciclado de concreto (ARCO) e caracterização dos materiais. O agregado reciclado de concreto (ARCO) foi produzido a partir da britagem de corpos de prova ensaiados no Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas, relativos a traços de concreto com resistência mínima de 30 MPa. A Tabela 1 apresenta as características dos agregados utilizados para elaboração dos traços de concreto.

Os agregados naturais atenderam às especificações da NBR 7211 [20] quanto à granulometria e teor de finos e o agregado reciclado ARCO atendeu aos limites de capacidade de absorção de água e teor de finos especificados pela NBR15116 [11].

Quanto a granulometria dos agregados graúdos, natural e reciclado, apesar do diâmetro máximo ser diferente o módulo de finura de ambos é muito próximo (6,70 para o agregado natural e 6,71 para o agregado reciclado).

Para melhorar a consistência sem alterar a relação água/cimento foi utilizado o aditivo superplastificante AdvatMCast 525 [24], que é de terceira geração, à base de policarboxilato. As fibras utilizadas foram a fibra de aço trefilado de 0,75x0,60 mm, com fator de forma 80 e comprimento de 60 mm; e a fibra de vidro AR, uma macro fibra de vidro álcali resistente de alta performance, com fator de forma 67 e 36 mm de comprimento. O cimento utilizado foi o CII E 32, que atende a NBR 16697 [25].

Foi escolhido um traço já utilizado em trabalhos anteriores de SALVADOR [26] e SALVADOR [27]. O traço unitário em massa 1:2,50:3,10:0,55. Foram produzidos traços referência e traços com 30% de substituição do agregado graúdo natural pelo ARCO. As taxas de fibras utilizadas foram 0,25%, 0,38% e 0,50% (do peso específico do aço). Nesse trabalho foram executados 14 traços, sendo nomeados conforme a Tabela 2.

A caracterização do concreto abrange as características indicadas na Tabela 3 e foram determinadas conforme os métodos de ensaio indicados.

Por fim, os resultados foram analisados por Análise de Variância (ANOVA) para verificar se existem diferenças ao nível de 5% de significância entre os traços avaliados.

Segundo PESSOA [34] a ANOVA analisa duas variações: dentro da amostra e variação entre amostras. Com isso a resposta para a ANOVA é obtida através do teste de hipótese, o qual pode ser realizado pelo valor-P. O valor-P é “definido como a probabilidade de qualquer média da amostra ser mais extrema do que a média da amostra (α) extraída para o teste, sem rejeitar a hipótese nula”. Sendo assim temos que:

- O nível de significância observado é dado através do valor-P;
- Quando o valor-P tiver valor maior ou igual ao valor de significância não existe diferença significativa;
- Quando o valor-P tiver valor menor ou igual ao valor de significância existe diferença significativa.

Tabela 1: Características dos agregados.

PROPRIEDADES		AGREGADO MIÚDO NATURAL	AGREGADO GRAÚDO NATURAL	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO
Diâmetro máximo (mm)	NBR NM248 [19]	4,8	19	25
Módulo de finura	NBR 7211 [20]	3,02	6,70	6,71
Massa específica/ massa específica aparente (g/cm ³)	NBR 16916 [21] e NBR 16917 [22]	2,45	2,75	2,69
Capacidade de absorção de água (%)	NBR 16916 [21] e NBR 16917 [22]	1,39	0,93	5,76
Teor de finos (%)	NBR 16973 [23]	2,13	0,48	0,29
Composição	Anexo A da NBR 15116 [11]	X	X	ARCO

Tabela 2: Nomenclatura dos traços utilizados.

TIPO	NOMENCLATURA	AGREGADO RECICLADO (%)	FIBRA DE VIDRO AR (% EM VOLUME)	FIBRA DE AÇO (% EM VOLUME)
Sem agregado reciclado	T00	0,00	0,00	0,00
	T00A25	0,00	0,00	0,25
	T00A38	0,00	0,00	0,38
	T00A50	0,00	0,00	0,50
	T00V25	0,00	0,25	0,00
	T00V38	0,00	0,38	0,00
	T00V50	0,00	0,50	0,00
Com agregado reciclado	T30	30,00	0,00	0,00
	T30A25	30,00	0,00	0,25
	T30A38	30,00	0,00	0,38
	T30A50	30,00	0,00	0,50
	T30V25	30,00	0,25	0,00
	T30V38	30,00	0,38	0,00
	T30V50	30,00	0,50	0,00

Tabela 3: Especificação das características e as respectivas normas utilizadas.

CARACTERÍSTICAS	ESTADO PLÁSTICO	ESTADO ENDURECIDO
Consistência	NBR 16889 (2020)	X
Massa específica	X	NBR 9778 [28]
Resistência à compressão	X	NBR 5739 [29]
Resistência À tração	X	NBR 7222 [30]
Resistência à Tração na flexão	X	NBR 12142 [31]
Módulo de elasticidade	X	NBR 8522 [32]
Absorção por imersão	X	NBR 9778 [28]
Absorção por capilaridade	X	NBR 9779 [33]

3. RESULTADOS

3.1. Resistência à compressão

Os resultados da resistência média à compressão são apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente, para os traços com fibra de aço e com fibra de vidro AR.

Observa-se que existe uma variação na resistência à compressão, em função da quantidade de fibras adicionadas ao concreto e em função da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, tanto para as adições de fibras de aço como para fibras de vidro. Na análise de variância ANOVA, foi encontrado que essa variação da resistência é significativa com relação aos dois parâmetros analisados (tipo de fibra e agregado natural ou reciclado) e com suas interações, segundo os resultados do valor-P encontrados. Esses valores são apresentados na Tabela 4 para as fibras de aço.

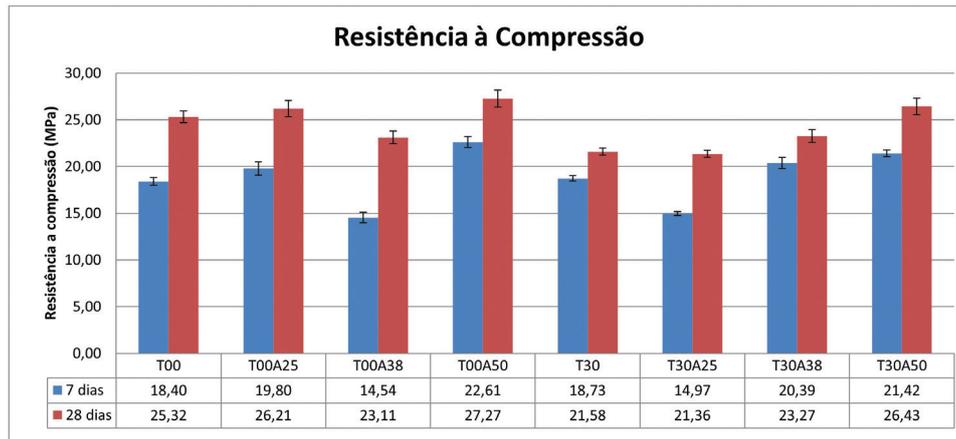


Figura 1: Resistência à compressão—traços referências e com adição de fibra de aço.

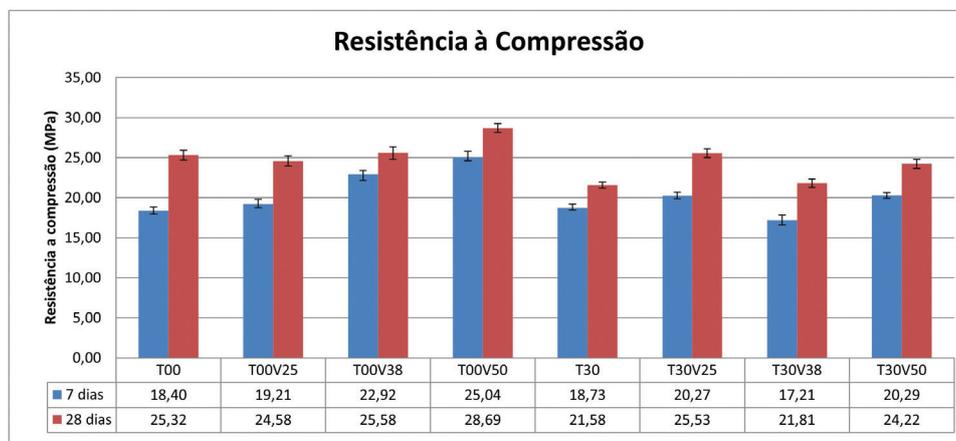


Figura 2: Resistência à compressão—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

Tabela 4: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de aço—análise da resistência à compressão aos 28 dias.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	9,59 E ⁻⁰⁵	1,86 E ⁻⁰⁵	0,0
T00A25			+3,5
T00A38			-8,7
T00A50			+7,7
T30			-14,8
T30A25			-15,6
T30A38			-8,1
T30A50			+4,4

As diferenças entre as resistências à compressão em porcentagens variam positiva e negativamente em relação ao concreto referência (T00) aos 28 dias. Aos 7 dias de idade não houve essa interferência na resistência à compressão com relação à substituição do agregado natural por agregado reciclado (valor-P de 0,89), mas como este comportamento não permaneceu aos 28 dias, entendeu-se que este resultado não teve grande relevância para esta pesquisa.

Tomando o concreto T00 como referência, na Tabela 4, percebe-se que, com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, as diferenças na resistência à compressão tiveram maior variabilidade do que para os concretos com agregado natural.

Fazendo uma análise com relação às fibras de vidro adicionadas ao concreto nas mesmas taxas que as fibras de aço, foi encontrada a mesma situação das fibras de aço, ou seja, as diferenças entre as resistências à compressão em porcentagens foram encontradas maiores e menores do que o concreto de referência (com agregado natural), e segundo a análise ANOVA, pelo fato do valor-P ser inferior a 0,05 essas diferenças foram significativas, conforme se apresenta na Tabela 5. Portanto a adição de fibras de vidro e a substituição do agregado natural por agregado reciclado influenciou na resistência à compressão do concreto aos 28 dias. As análises aos 7 dias de idade não foram diferentes das análises aos 28 dias.

Tomando o concreto T00 como referência, na Tabela 5 também é apresentado a diferença entre as resistências na forma de porcentagem. Percebe-se que com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, as diferenças na resistência à compressão tiveram maiores oscilações do que para os concretos com agregado natural, assim como foi notado para as fibras de aço, entretanto para o concreto com agregado natural e 0,5% de adição de fibras de vidro, nota-se uma oscilação na resistência à compressão maior do que foi observado no mesmo tipo de concreto, mas com fibras de aço (Tabela 4).

Outros autores obtiveram resultados diferentes, como por exemplo, [26] não observou tendência de aumento de resistência (utilizando teores de fibras no concreto de 0,19%; 0,32% e 0,45%). Já [34] observou uma diminuição na resistência à compressão, porém utilizou teores de fibras mais elevados que os utilizados nesse trabalho (utilizou 1% de fibra).

Devido a esse cenário com dispersões de resultados Armelin (1992) apud SILVA JÚNIOR [35] afirmam que não há consenso à respeito da resistência à compressão de concretos com adições de fibras, se essa adição aumenta ou diminui a resistência (isto para teores de fibras abaixo de 1%).

Com a utilização de agregado reciclado, os autores ARAÚJO [8] e FIGUEIREDO [36] observaram que quanto maior a porcentagem de agregado reciclado, menor é a resistência à compressão. Para TOPÇU e SENDEL [37] a utilização de agregado reciclado com teores entre 20% e 40% não apresentam efeitos significativos na resistência à compressão.

Na literatura científica foi observado uma tendência de aumento de resistência para concretos com agregado reciclado miúdo (25% de agregado reciclado) e fibra de aço [37]. Esse desempenho foi similar ao encontrado nesse trabalho.

Na Tabela 6 pode ser observado a diferença em porcentagem na resistência à compressão dos concretos com fibras de aço, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Nota-se a adição de fibras de aço provocou maior oscilação na resistência, com tendência de aumento, quando o concreto tinha substituição de 30% do agregado natural pelo reciclado, especialmente com a adição de 0,5% de fibras metálicas (concreto T30A50 com acréscimo de 22,5% na resistência à compressão).

Na Tabela 7 pode ser observado a diferença em porcentagem na resistência à compressão dos concretos com fibras de vidro, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Nota-se a adição de fibras de vidro provocou maior oscilação na resistência, com tendência de aumento, quando o concreto tinha substituição de 30% de agregado reciclado, especialmente com a adição de 0,25% de fibras de vidro (concreto T30V25 com acréscimo de 18,3% na resistência à compressão).

3.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados da resistência média à tração por compressão diametral são apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente, para os traços com fibra de aço e com fibra de vidro AR. Além disso foram analisados os resultados com a ANOVA para os ensaios aos 28 dias.

Aos 28 dias, observa-se que a resistência à tração por compressão diametral tende a aumentar com o aumento do teor de fibras, tanto de aço quanto de vidro AR. Tomando como referência o traço T00, na Tabela 8 pode ser visto o resultado da análise de variância ANOVA para os concretos com fibras de aço aos 28 dias de idade, e na Tabela 9 esta mesma análise para os concretos com fibras de vidro também aos 28 dias de idade.

Quando analisados os concretos com fibras de aço, nota-se que o tipo de agregado (natural ou reciclado) não influenciou significativamente na variação na resistência à tração por compressão diametral (Valor-P = 0,663404). A resistência à tração teve variação significativa com o aumento da taxa de fibra adicionada no concreto, tanto para os concretos com agregado natural quanto para os concretos com agregado reciclado.

Já, para os concretos com fibra de vidro AR, houve indicação de significância tanto para a substituição do agregado natural pelo reciclado quanto pelo aumento na taxa volumétrica de fibra de vidro adicionada aos

Tabela 5: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de vidro—análise da resistência à compressão aos 28 dias.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,029176	0,028851	0,0
T00V25			-2,9
T00V38			+1,0
T00V50			+13,3
T30			-14,8
T30V25			+0,8
T30V38			-13,9
T30V50			-4,3

Tabela 6: Análise da resistência à compressão aos 28 dias para concretos com fibras de aço.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00A25	+3,5	T30A25	-1,0
T00A38	-8,7	T30A38	+7,8
T00A50	+7,7	T30A50	+22,5

Tabela 7: Análise da resistência à compressão aos 28 dias para concretos com fibras de vidro.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00V25	-2,9	T30V25	+18,3
T00V38	+1,0	T30V38	+1,1
T00V50	+13,3	T30V50	+12,2

concretos, pois os valores-P encontrados foram ambos menores do que 0,05 (valor-P de 0,002739 para substituição do agregado e valor-P de $7,0 \text{ E}^{-08}$ para adição de fibras de vidro).

O aumento de resistência à tração tende a aumentar com o aumento das fibras, tanto para os traços com agregado reciclado, quanto para os traços com agregado natural. Isso pôde ser observado por outros autores como [34, 38].

As diferenças entre as resistências à tração por compressão diametral em porcentagens para os concretos com fibras de aço foram encontradas maiores do que o concreto de referência (com agregado natural série T00), a menos do concreto com substituição do agregado natural por reciclado (série T30) onde houve uma queda na resistência à tração de 8,3% e na série T00A25 onde a queda foi de 2,9% (Tabela 8).

As diferenças entre as resistências à tração por compressão diametral em porcentagens para os concretos com fibras de vidro foram encontradas maiores do que o concreto de referência (com agregado natural série T00), a menos do concreto com substituição do agregado natural por reciclado (série T30) onde houve uma queda na resistência à tração de 8,3%. Isto é mostrado na Tabela 9. A maior diferença encontrada foi na

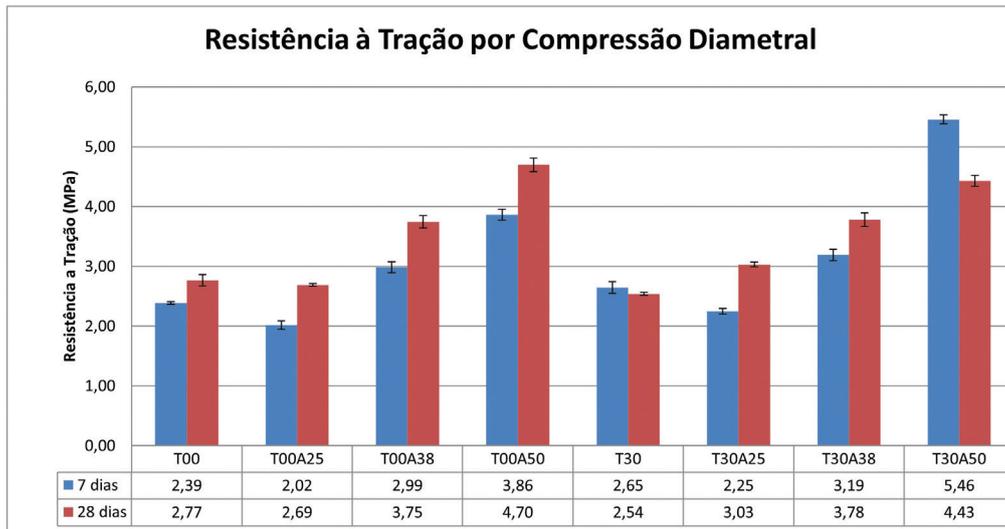


Figura 3: Resistência à tração por compressão diametral—traços referências e com adição de fibra de aço.

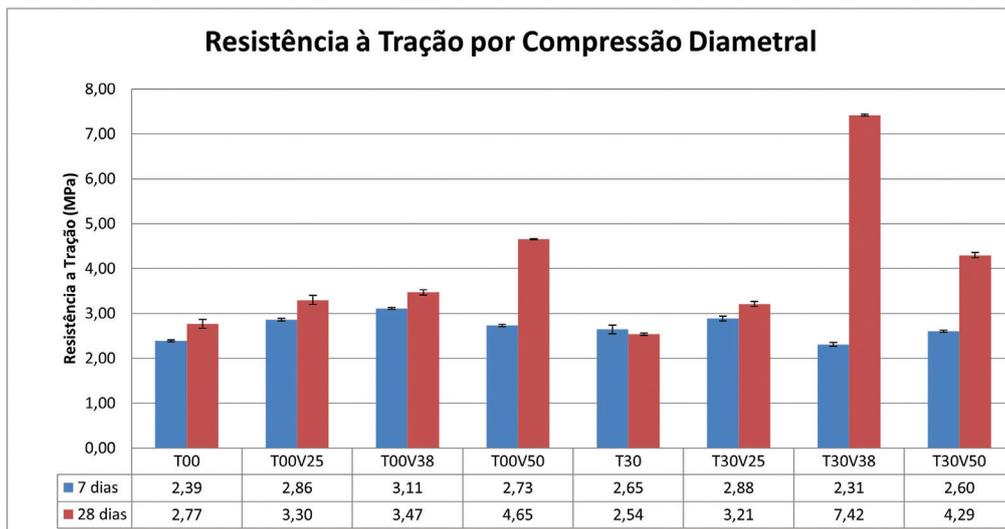


Figura 4: Resistência à tração por compressão diametral—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

Tabela 8: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de aço—análise da resistência à tração aos 28 dias.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,663404	7,0 E ⁻⁰⁸	0,0
T00A25			-2,9
T00A38			+35,4
T00A50			+69,7
T30			-8,3
T30A25			+9,4
T30A38			+36,5
T30A50			+59,9

Tabela 9: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de vidro—análise da resistência à tração aos 28 dias.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,002739	3,7 E ⁻⁰⁹	0,0
T00V25			+19,1
T00V38			+25,3
T00V50			+67,9
T30			-8,3
T30V25			+15,9
T30V38			+167,9
T30V50			+54,9

Tabela 10: Análise da resistência à tração aos 28 dias para concretos com fibras de aço.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00A25	-2,9	T30A25	+19,3
T00A38	+35,4	T30A38	+48,8
T00A50	+69,7	T30A50	+74,4

Tabela 11: Análise da resistência à tração aos 28 dias para concretos com fibras de vidro.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00V25	+19,1	T30V25	+26,4
T00V38	+25,3	T30V38	+192,1
T00V50	+67,9	T30V50	+68,9

comparação do concreto referência com a série T30V38, onde este concreto teve uma resistência à tração mais do que dobrada em relação ao concreto de referência.

Na Tabela 10 pode ser observado a diferença em porcentagem na resistência à tração por compressão diametral dos concretos com fibras de aço, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Nota-se a adição de fibras de aço provocou crescimento na resistência à tração em ambos os casos (concreto com agregado natural e reciclado).

Na Tabela 11 pode ser observado a diferença em porcentagem na resistência à tração por compressão diametral dos concretos com fibras de vidro, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Os resultados foram similares aos concretos com fibras de aço, onde a adição de fibras de vidro AR provocou crescimento na resistência à tração em ambos os casos (concreto com agregado natural e reciclado).

Aos 7 dias de idade, as resistências à tração por compressão diametral dos concretos tiveram comportamentos similares aos registrados aos 28 dias.

3.3. Módulo de elasticidade

Os resultados médios de módulo de elasticidade foram apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente, para os traços com fibra de aço e com fibra de vidro AR.

A análise ANOVA aplicada aos valores de módulo de elasticidade, para traços com fibra de aço, mostra que não há diferenças significativas quanto ao tipo de agregado utilizado (valor-P = 0,221859), mas há diferenças significativas para a porcentagem de fibra (valor-P = 0,000202). Com isso, é possível afirmar que, para traços com fibra de aço, o módulo de elasticidade é similar para os dois tipos de agregado, mas observa-se que quando ocorre aumento do teor de fibra, ocorre o aumento do módulo de elasticidade.

Para a fibra de vidro AR, quando analisado ANOVA, há diferenças significativas para o tipo de agregado (valor-P = 0,037584) e não há diferenças significativas para a porcentagem de fibra (valor-P = 0,814737). Contudo, observa-se que os traços com agregado natural possuem módulo de elasticidade mais elevados quando comparados com os traços com agregado reciclado.

Nesse trabalho foi possível notar que o aumento do teor de fibra de aço gera um aumento no módulo de elasticidade, isso também foi visto por outros autores, como, por exemplo [38]. Quando comparou-se os traços com agregado natural e com agregado reciclado, verifica-se que o concreto com 30% de agregado reciclado

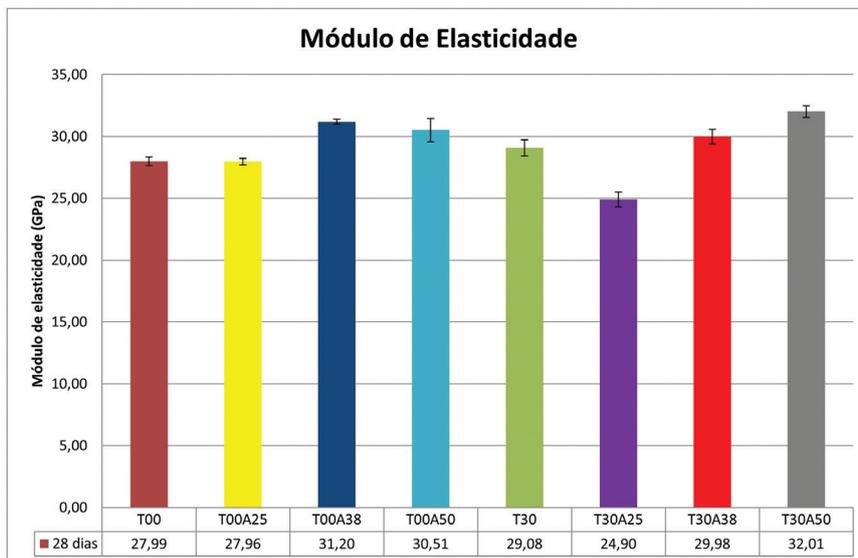


Figura 5: Módulo de elasticidade—traços referências e com adição de fibra de aço.

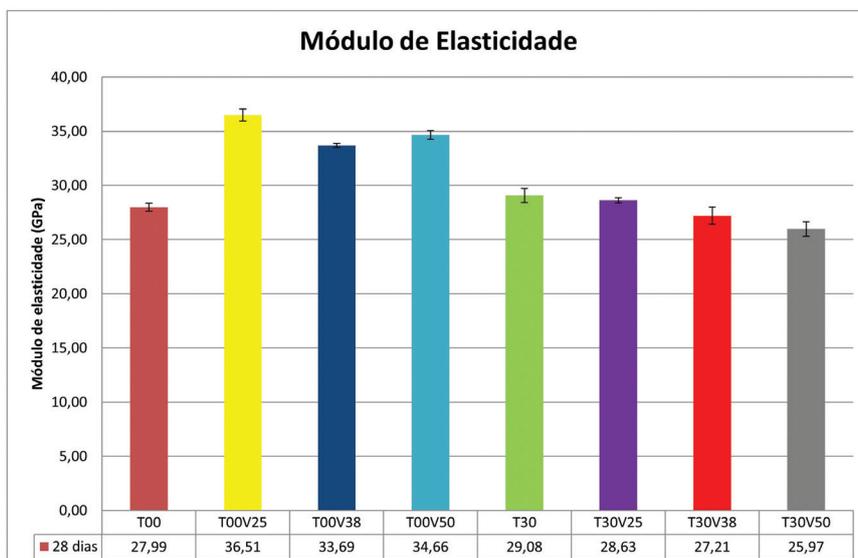


Figura 6: Módulo de elasticidade—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

(T30) é, aproximadamente, 3,9% maior que o concreto com 0% de agregado reciclado (T00), sendo assim entre os traços referências a variação é pequena. Isso foi visto por autores como BENETTI [5], embora autores como ARAÚJO [8] afirmam que o concreto com substituição de agregado natural por agregado reciclado faz com que o módulo de elasticidade do concreto diminua (6% a 12%).

A Tabela 12 mostra o valor-P encontrado para os concretos com fibras de aço e a Tabela 13 mostra o valor-P para os concretos com fibra de vidro. Em ambas as Tabelas, 12 e 13, também são mostradas as diferenças percentuais nos valores obtidos dos módulos, tendo como referência o concreto T00.

Observa-se que a variação dos valores do módulo de elasticidade para os concretos estudados foi menor do que a variação da resistência à compressão, principalmente para os concretos com fibras de aço.

Segundo o valor-P encontrado com relação à influência do tipo de agregado (0,221859), percebe-se a indicação de que o tipo de agregado não influenciou na variação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade, para os concretos com fibra de aço (Tabela 12). Entretanto a quantidade de fibra teve influência significativa nesta variação (valor-P de 0,000202).

Para os concretos com fibras de vidro, observa-se que a variação do módulo de elasticidade teve semelhança com a variação da resistência à compressão.

Segundo o valor-P encontrado com relação à influência do tipo de agregado (0,037584), percebe-se a indicação de que o tipo de agregado teve influência significativa na variação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade, para os concretos com fibra de vidro (Tabela 13). Entretanto a quantidade de fibra não influenciou significativamente nesta variação (valor-P de 0,814737).

Tabela 12: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de aço—análise do módulo de elasticidade.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,221859	0,000202	0,0
T00A25			0,0
T00A38			+11,5
T00A50			+9,0
T30			+3,9
T30A25			-11,0
T30A38			+7,1
T30A50			+14,4

Tabela 13: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de vidro—análise do módulo de elasticidade.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,037584	0,814737	0,0
T00V25			+30,4
T00V38			+20,4
T00V50			+23,8
T30			+3,9
T30V25			+2,3
T30V38			-2,8
T30V50			-7,2

Tabela 14: Análise do módulo de elasticidade para concretos com fibras de aço.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00A25	0,0	T30A25	-14,4
T00A38	+11,5	T30A38	+3,1
T00A50	+9,0	T30A50	+10,1

Tabela 15: Análise do módulo de elasticidade para concretos com fibras de vidro.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00V25	+30,4	T30V25	-1,5
T00V38	+20,4	T30V38	-6,4
T00V50	+23,8	T30V50	-10,7

Na Tabela 14 pode ser observado a diferença em porcentagem no módulo de elasticidade dos concretos com fibras de aço, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Nota-se a adição de fibras de aço provocou maior oscilação no módulo, com tendência de aumento, quando o concreto tinha substituição de 30% de agregado reciclado, especialmente com a adição de 0,5% de fibras metálicas (concreto T30A50 com acréscimo de 10,1% no módulo), mas mostrou queda no valor do módulo para o concreto T30A25 (-14%).

Na Tabela 15 pode ser observado a diferença em porcentagem no módulo de elasticidade dos concretos com fibras de vidro, de forma separada para o concreto com agregado natural e para o concreto com agregado reciclado. Nota-se a adição de fibras de vidro provocou oscilação nos valores dos módulos de elasticidade de forma diferente, com tendência de aumento para os concretos com agregado natural e tendência de queda para os concretos com agregado reciclado, sendo essa queda tanto maior quanto mais fibra de vidro foi adicionado ao concreto.

3.4. Resistência à tração na flexão

Os resultados da resistência média à tração na flexão são apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente, para os traços com fibra de aço e com fibra de vidro AR.

Na Tabela 16 pode ser visto o valor-P encontrado para os parâmetros estudados nesta pesquisa (tipo de agregado e taxa de fibra de aço) bem como a variação percentual da resistência à tração na flexão tomando como referência o traço T00.

Para a resistência à tração na flexão, a ANOVA indica que, para adição de fibra de aço não existe diferença significativa (valor-P = 0,208682) entre os tipos de agregado, mas é significativa quando comparamos os teores de fibra (valor-P = 0,042998).

Quando analisado os traços com fibra de vidro AR, cujos resultados são apresentados na Tabela 17, segundo a ANOVA, é considerada não significativa a diferença entre os tipos de agregado (valor-P = 0,505693) e porcentagem de fibra (valor-P = 0,101089). Com isso, observa-se que os traços com agregado natural e agregado reciclado possuem resistência similares.

O concreto com agregado reciclado (T30) possui resistência à tração na flexão maior em 4% apenas que o concreto com agregado natural (T00). Alguns autores, como GOIS [39] e FIGUEIREDO [36] chegaram a resultados contrários ao encontrado nesse trabalho ou seja, que concreto com agregado natural possui maior resistência à tração na flexão que concretos com agregado reciclado.

Os concretos com agregado natural e fibra de aço mostram uma tendência de aumento conforme o aumento do teor de fibra. Autores como PESSOA [34] também observaram essa tendência de aumento de resistência à tração na flexão com o aumento do teor de fibras de aço.

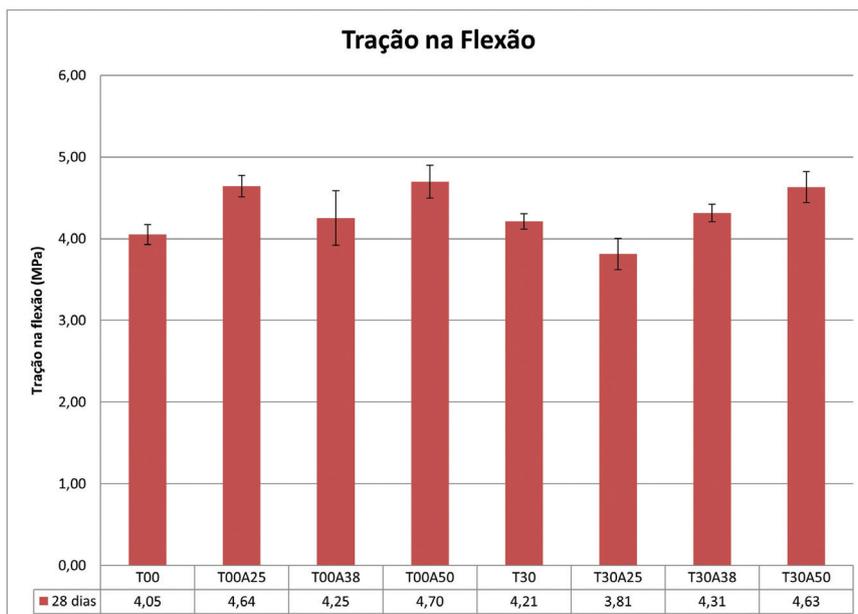


Figura 7: Resistência à tração na flexão—traços referências e com adição de fibra de aço.

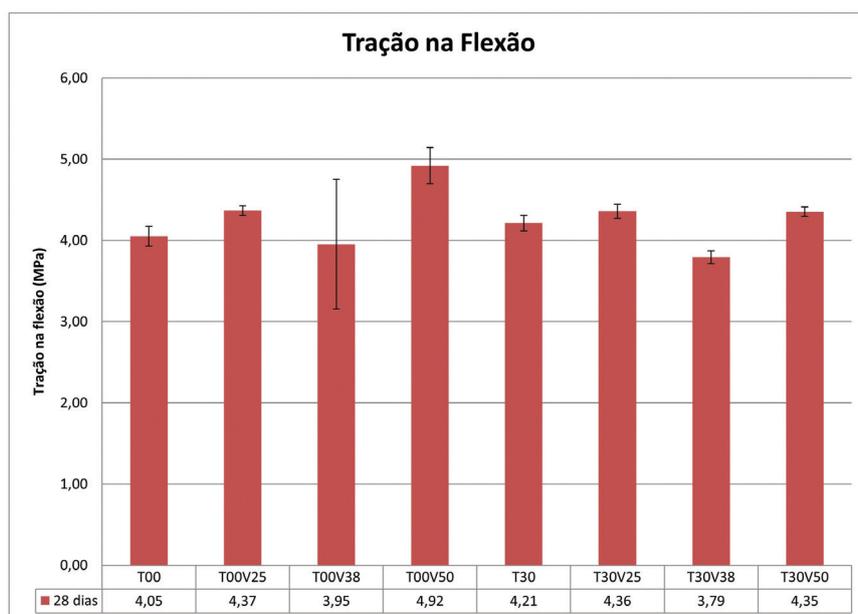


Figura 8: Resistência à tração na flexão—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

Sendo assim, a resistência à tração na flexão é similar quando analisados os concretos com agregado natural comparando-os com os concretos com agregado reciclado, mas quando analisado o teor de fibra é possível observar uma tendência de aumento de resistência com o aumento do teor de fibra de aço. Isto fica mais claro ao se observar as Tabelas 18 e 19, onde é mostrado em separado o comportamento dos concretos com o aumento da taxa de fibras, tanto de aço quanto de vidro, (concreto com agregado natural e concreto com agregado reciclado). As exceções ficam para os concretos T30A25 (concreto com agregado reciclado e fibra de aço) e o concreto T30V38 (concreto com agregado reciclado e fibra de vidro).

3.5. Absorção por capilaridade

A absorção por capilaridade para 0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas são apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente, para os traços com fibra de aço e com fibra de vidro AR.

Tabela 16: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de aço—análise da resistência à tração na flexão.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0208682	0,042998	0,0
T00A25			+14,6
T00A38			+3,7
T00A50			+20,2
T30			+4,0
T30A25			-9,9
T30A38			+6,4
T30A50			+14,3

Tabela 17: Resultados do ANOVA para os concretos com fibras de vidro—análise da resistência à tração na flexão.

CONCRETO	VALOR – P AGREGADO	VALOR – P FIBRA	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,505693	0,101089	0,0
T00V25			+7,9
T00V38			+24,0
T00V50			+21,5
T30			+4,0
T30V25			+7,7
T30V38			-6,4
T30V50			+7,4

Tabela 18: Análise da resistência à tração na flexão para concretos com fibras de aço.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00A25	+14,6	T30A25	-13,3
T00A38	+3,7	T30A38	+2,4
T00A50	+20,2	T30A50	+10,0

Para a fibra de aço, quando comparado os traços com agregado reciclado e agregado natural, é possível verificar que os traços referências e 0,25% de fibra, o traço com agregado natural obteve maiores valores, porém esse comportamento é contrário, quando analisamos os traços com 0,38% e 0,50% de fibra, já que os valores mais elevados ocorrem nos traços com agregado reciclado.

Para a fibra de vidro AR, quando comparado os traços com agregado reciclado e agregado natural, é possível verificar que os traços referências e 0,25% e 0,50% de fibra, os traços com agregado natural obtiveram maiores valores, porém esse comportamento é contrário, quando analisamos os traços com 0,38% de fibra, já que os valores mais elevados ocorrem nos traços com agregado reciclado.

Tabela 19: Análise da resistência à tração na flexão para concretos com fibras de vidro.

CONCRETO AGREGADO NATURAL	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)	CONCRETO AGREGADO RECICLADO	DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA (%)
T00	0,0	T30	0,0
T00V25	+7,9	T30V25	+3,6
T00V38	+24,0	T30V38	-10,0
T00V50	+21,5	T30V50	+3,3

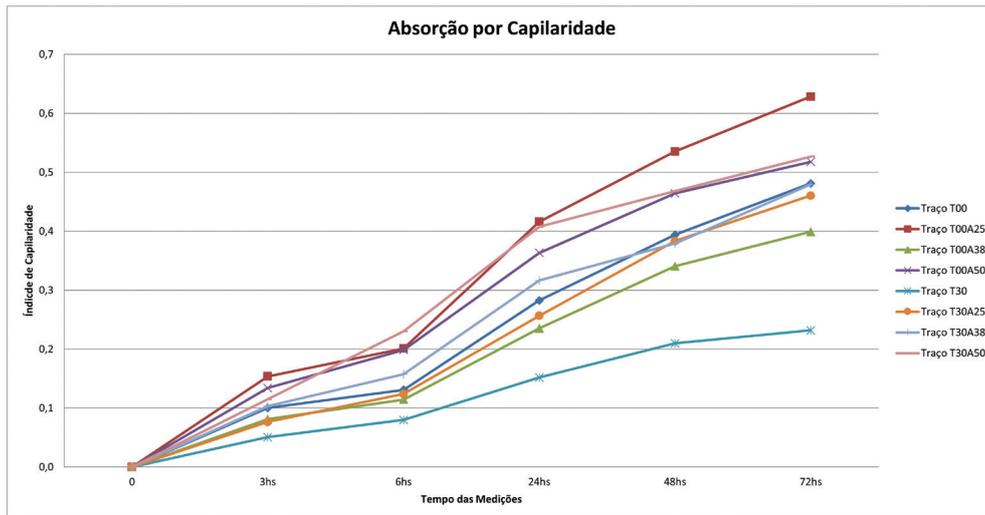


Figura 9: Absorção por capilaridade—traços referências e com adição de fibra de aço.

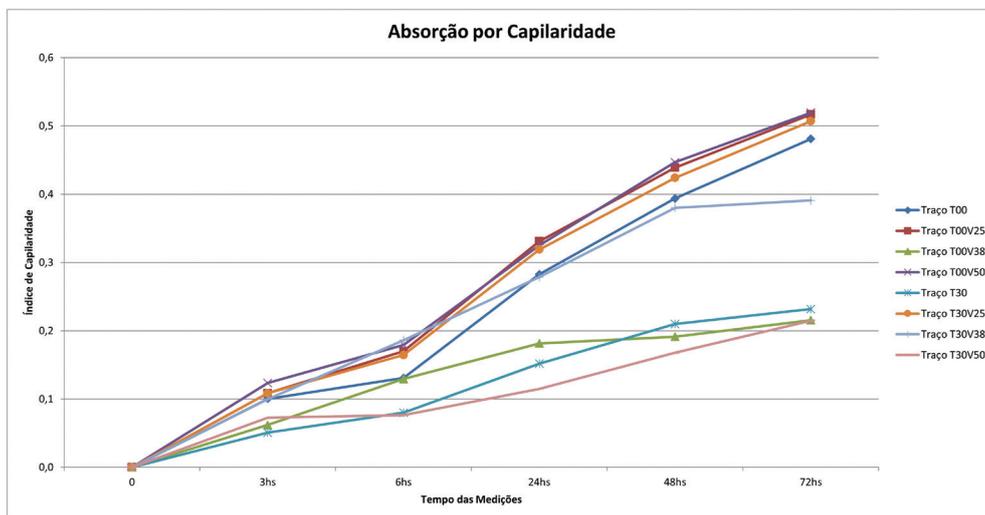


Figura 10: Absorção por capilaridade—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

3.6. Absorção por imersão e massa específica

Na Tabela 20 são apresentados os resultados médios e o desvio padrão da capacidade de absorção de água por imersão e da massa específica.

Além disso, foi executada a ANOVA para os resultados de massa específica seca, massa específica de superfície seca e absorção por imersão, observou-se que as massas específicas e a absorção por imersão, para traços com fibra de aço, não apresentam diferenças significativas quando comparado os tipos de agregado (valor-P = 0,20898; 0,286672; 0,1996), já que os valores-P são inferiores a 0,05. Para análise da ANOVA em

Tabela 20: Massa específica e absorção.

TRAÇO	MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm ³)	SD	MASSA ESPECÍFICA DE SUP. SECA (g/cm ³)	SD	ABSORÇÃO (%)	SD
T00	2,2484	0,0244	2,3884	0,0223	6,2286	0,2186
T00A25	2,3009	0,0250	2,4204	0,0158	5,1937	0,4656
T00A38	2,2697	0,0084	2,3799	0,0068	4,8572	0,2724
T00A50	2,3110	0,0116	2,4095	0,0141	4,2636	0,3545
T00V25	2,3111	0,0273	2,4237	0,0187	4,8718	0,4294
T00V38	2,3832	0,0234	2,4302	0,0227	1,9748	0,1468
T00V50	2,2986	0,0411	2,4103	0,0324	4,8629	0,6342
T30	2,2192	0,0197	2,3641	0,0109	6,5322	0,4501
T30A25	2,2126	0,0124	2,3831	0,0093	7,7071	0,1861
T30A38	2,2643	0,0273	2,3860	0,0267	5,3747	0,7267
T30A50	2,3075	0,0228	2,4112	0,0189	4,4966	0,6357
T30V25	2,2595	0,0132	2,3813	0,0148	5,3907	0,5322
T30V38	2,3153	0,0267	2,3801	0,0238	2,7984	0,1566
T30V50	2,2359	0,0048	2,3757	0,0093	6,2516	0,3245

relação a porcentagem de fibra, os traços com fibra de aço também não possuem diferenças significativas (valor-P = 0,23172; 0,251659; 0,1686).

Os traços com fibra de vidro AR, quando analisado a massa específica seca e absorção pela ANOVA em relação ao tipo de agregado (valor-P = 0,00861 e 0,0485) e a porcentagem de fibra (valor-P = 0,00889 e 0,0041), existe diferenças significativas pois o valor-P é inferior a 0,05. Quando analisada (pela ANOVA) a massa específica de superfície seca, o tipo de agregado possui diferenças significativas (valor-P = 0,006345), mas a porcentagem de fibra não (valor-P = 0,095438).

Os valores obtidos de massa específica seca e massa específica de superfície seca, no geral são maiores para os concretos produzidos com agregado natural, como pode ser observado na Figura 11 para os concretos referência e concretos com adição de fibra de aço. O aumento do teor de fibra de aço também eleva a massa específica dos compósitos.

Na Figura 12 observa-se que para os concretos produzidos com as fibras de vidro AR a tendência de aumento da massa específica em função do aumento de teor de fibra se mantém, exceto para os traços com 0,50% de fibra que tanto para o agregado natural quanto para o agregado reciclado que apresentaram uma queda, isto pode ocorrer em função da tendência de aumento de ar incorporado quando da adição de microfibras [40, 41].

A Figura 13 apresenta os valores da capacidade de absorção de água, observa-se que concreto com agregado reciclado tem maiores valores de absorção, independentemente do tipo de fibra.

O traço referência com agregado natural possui menor absorção (6,23%) que o referência com agregado reciclado (6,53%). Para os traços com fibra de aço a taxa de absorção tende a diminuir com o aumento do teor de fibra, exceto pelo traço com agregado reciclado e 0,25% de fibra de aço (T30A25) o qual possui taxa de absorção maior que dos traços referências.

Para os traços com agregado natural e fibra de vidro AR, a taxa de absorção foi de 4,8%, exceto pelo traço com 0,38% com fibra de vidro AR, que apresentou absorção de 2%.

Para os traços com agregado reciclado a tendência é de aumentar a taxa de absorção com o aumento de fibra, exceto pelo traço com 0,38% de fibra.

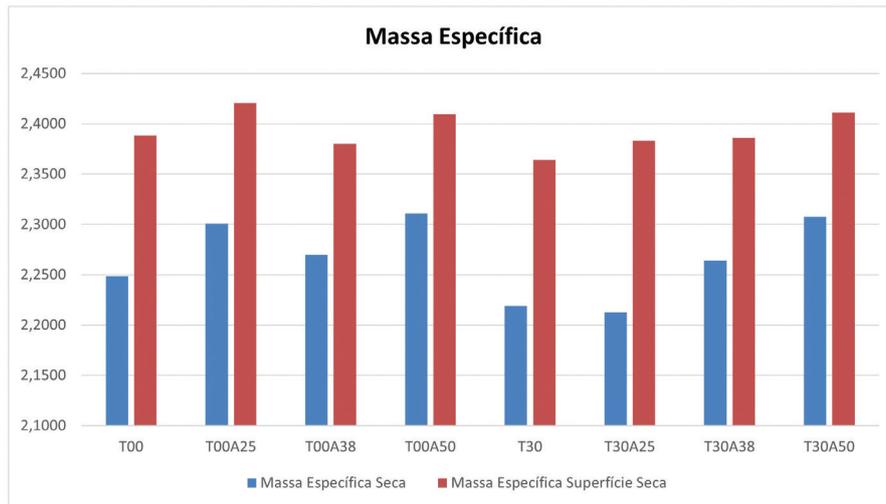


Figura 11: Massa especifica seca—traços referências e com adição de fibra de aço.

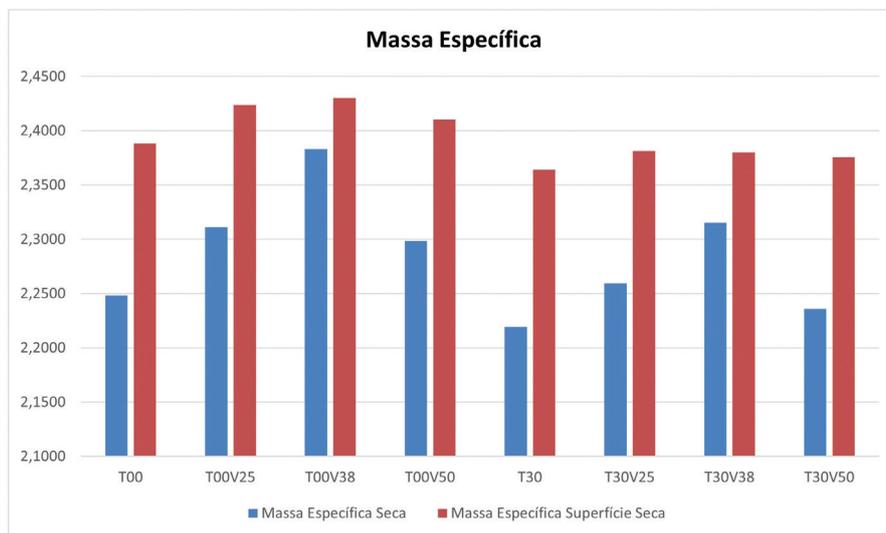


Figura 12: Massa especifica seca—traços referências e com adição de fibra de vidro AR.

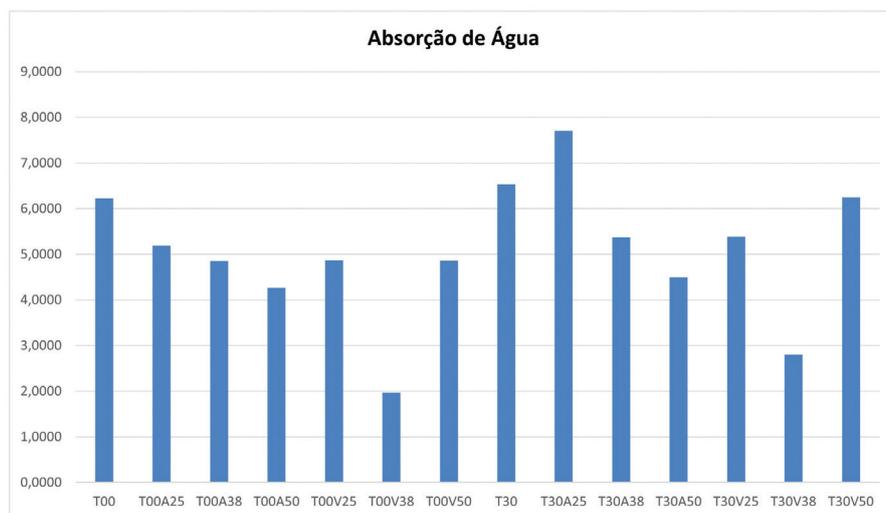


Figura 13: Absorção de água.

4. CONCLUSÕES

Para os materiais e condições de ensaio deste trabalho, observou-se em relação ao comportamento mecânico e características físicas do concreto elaborado com substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado (30%) e reforçado com fibras (aço e vidro AR) que:

- Houve uma variação na resistência à compressão, em função da quantidade de fibras adicionadas ao concreto e em função da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, tanto para as adições de fibras de aço como para fibras de vidro;
- A resistência à tração por compressão diametral teve a tendência ao aumento conforme o aumento do teor de fibra, tanto de aço quanto de vidro AR. Porém quando analisado o tipo de agregado, essa diferença não é significativa quando utilizado fibra de aço, já para a fibra de vidro o traço com agregado natural possui maior resistência;
- Notou-se que a adição de fibras de aço provocou maior oscilação no módulo, com tendência de aumento, quando o concreto tinha substituição de 30% de agregado reciclado, entretanto a adição de fibras de vidro provocou oscilação nos valores dos módulos de elasticidade de forma diferente, com tendência de aumento para os concretos com agregado natural e tendência de queda para os concretos com agregado reciclado, sendo essa queda tanto maior quanto mais fibra de vidro foi adicionado ao concreto;
- Na resistência à tração na flexão, o tipo de agregado não influencia na resistência, quando utilizado fibra de aço, já o aumento do teor de fibra gera um aumento na resistência à tração. Para a fibra de vidro AR, não há diferenças significativas tanto para o teor de fibras quanto para o tipo de agregado;
- Para a absorção por capilaridade, não ocorre variação significativa em função do tipo de agregado;
- O tipo de agregado não alterou significativamente a massa específica seca e a massa específica de superfície seca, no entanto, a massa específica de superfície seca obteve valores maiores que o da massa específica seca. No geral, a tendência é que, em ambas as massas específicas, o aumento do teor de fibra gera um aumento na massa específica;
- A absorção de água por imersão foi maior para os concretos produzidos com agregado reciclado.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES, pois, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Código de Financiamento 001.

À PUC Campinas e a todo seu corpo docente, pela oportunidade e pela disponibilização dos Laboratórios, materiais e demais espaços para realização desta pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] PEDROSO, F.L., “Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem”, *Revista Concreto & Construções*, n. 53, pp. 14–19, 2009.
- [2] TAVARES, L.M., KAZMIERCZAK, C.S., “The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, pp. 75–89, 2016.
- [3] PIMENTEL, L.L., PISSOLATO JUNIOR, O., JACINTHO, A.E.P.G., *et al.*, “Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil—Avaliação de características físicas e mecânicas”, *Matéria (Rio J.)*, v. 23, n. 1, e-11969, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0305>
- [4] MOREIRA, L.H.H., FIGUEIREDO, A.D., “Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico e estrutural”. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, PCC/563, 2010.
- [5] BENETTI, J.K., *Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.
- [6] KUBISSA, W., JASKULSKI, R., KOPER, A., *et al.*, “Properties of concretes with natural aggregate improved by RCA addition”, *Procedia Engineering*, v. 108, pp. 30–38, 2015.
- [7] SPOHR, R., PEDROZO, E.C., SOKOLOVICZ, B.C., “Estudo das propriedades mecânicas do concreto com agregado graúdo natural e com agregado graúdo obtido de concreto reciclado”, In: *57º Congresso Brasileiro do Concreto*, Bonito, 2015.
- [8] ARAÚJO, D.L., FELIX, L.P., SILVA, L.C., *et al.*, “Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto”, *REEC—Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, pp. 16–34, 2016.

- [9] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: Diário Oficial, 2002.
- [10] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Brasília: Diário Oficial, 2004.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). *Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland—Requisitos e métodos de ensaios. NBR 15116*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [12] GONÇALVES, P., BRITO, J., “Recycled aggregate concrete (RAC)—comparative analysis of existing specifications”, *Magazine of Concrete Research*, v. 62, n. 5, pp. 339–346, 2010.
- [13] GONÇALVES, P., BRITO, J., “Utilização de agregados reciclados em betão. Análise comentada da regulamentação existente”, *Revista Engenharia Civil*, n. 32, pp. 73–86, 2008.
- [14] DELLA PIETRA, I.F., FIGUEIREDO, A.D., BITTENCOURT, T., “Influência do teor de fibras de aço na tenacidade do concreto convencional e do concreto com agregados reciclados de entulho”, In: *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, São Paulo, 2003.
- [15] BRITO, S.D.E., Comportamento Mecânico e Durabilidade de Betão com Agregados Reciclados de Resíduos de Vidro (Glasscrete). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2016.
- [16] SANTOS, D.O.J., FONTES, C.M.A., LIMA, P.R.L., “Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal”, *Matéria (Rio J.)*, v. 22, n. 1, e11801, 2017.
- [17] FIGUEIREDO, A.D., *Concreto reforçado com fibras de aço*. Tese (Livre-Docência), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [18] BENTUR, A., MINDESS, S., *Fibre reinforced cementitious composites*. London: Francis and Taylor, 2007.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregados—Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregados para concreto—Especificação. NBR 7211*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregado miúdo—Determinação da densidade e da absorção de água. NBR 16916*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregado graúdo—Determinação da densidade e da absorção de água, NBR 16917*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregados—Determinação do material fino que passa pela peneira de # 75 µm por lavagem. NBR 16973*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [24] Grace Construction. *ADVA™ Cast 525*, 2004. https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento Portland—Requisitos. NBR 16697*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [26] SALVADOR, R.P., *Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [27] SALVADOR, R.P., FIGUEIREDO, A.D., “Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço”, *Matéria (Rio J.)*, v. 18, n. 2, pp. 1273–1285, 2013.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Argamassa e concreto endurecido—Determinação da absorção de água por imersão—Índice de vazios e massa específica. NBR 9778*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto—Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto e argamassa—Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto—Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. NBR12142*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto endurecido—Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estático à compressão. NBR 8522-1*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Argamassa e concreto endurecido—Determinação da absorção de água por capilaridade. NBR 9779*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- [34] PESSOA, F.H.C., *Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- [35] SILVA JÚNIOR, A.C., REIS, A.P.A., CRAVO, F., Determinação das Propriedades Mecânicas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço, In: *III CONPEEX*, Goiânia, 2006.
- [36] FIGUEIREDO, A.D., Concreto com fibras de aço. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, PCC/260, 2000.
- [37] TOPÇU, I.B., SENDEL, S., “Properties of concretes produced with waste ceramic tile aggregate”, *Cement and Concrete Research*, v. 14, n. 34, pp. 1307–1312, 2004.
- [38] SANTOS, A.A.M., *Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2016.
- [39] GÓIS, F.A.P., BARBOZA, A.S.R., VIEIRA, C.S., “Avaliação da influência da fração volumétrica de fibras de aço no comportamento de peças de concreto solicitadas por tensões de tração”, In: *30º Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, Búzios, 2009.
- [40] GANASINI, D., *Concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.
- [41] SILVA, R.V., *Microconcreto de alto desempenho com fibras de polipropileno*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.