

Concreto reforçado com fibra de aço de pneus inservíveis

Ana Luiza de Sousa Toledo ¹, Rafael de Paula Gurkewicz ^{1,2,3*}, Augusto Wanderlind ^{1,2}, Aline Eyng Savi ², Jorge Henrique Piva ^{1,2}, Elaine Guglielmi Pavei Antunes ^{1,2}

¹ Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

² Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

³ Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

*e-mail: rafaelpgurkewicz@unesoc.net

Resumo:

O concreto é amplamente empregado devido à sua disponibilidade, alta resistência à compressão, ao baixo custo e à durabilidade. No entanto, tem como característica as resistências à flexão e à tração serem relativamente baixas. A adição de fibras, dentre elas as de aço, pode promover possíveis melhoras em algumas propriedades do concreto. Desta forma, o objetivo deste estudo foi analisar e comparar experimentalmente o comportamento das propriedades mecânicas e características físicas do concreto, quando adicionadas fibras de aço de pneus reciclados (FAPR) em sua composição. Foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone, compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, tração na flexão, envelhecimento acelerado e carbonatação, teste de arrancamento, absorção de água, índice de vazios e massa específica. As quantidades de fibras adicionadas foram 20, 30, 40 e 50 kg em relação a um m³ de volume de concreto produzido. O concreto com FAPR apresentou redução da trabalhabilidade em 65% e da resistência à compressão axial em aproximadamente 28,6% para a adição de 50 kg/m³.

Palavras-chave: Concreto reforçado; fibras de aço; pneus; reciclagem.

1. INTRODUÇÃO:

O segmento da construção civil possui um importante papel no crescimento econômico e social, em contrapartida, é um dos grandes responsáveis pela geração de resíduos sólidos, principalmente Resíduo da Construção Civil (RCC) [1]. Tendo em vista estas questões, é de grande valia a realização de estudos que viabilizem a sustentabilidade no setor, como, por exemplo, a inserção de fibras recicláveis para reforçar o concreto, pois é um compósito muito utilizado pela construção.

O concreto é amplamente empregado devido à sua disponibilidade, alta resistência à compressão, ao baixo custo e à durabilidade. No entanto, tem como característica as resistências à flexão e à tração relativamente baixas. No concreto simples, as fissuras estruturais se desenvolvem devido à retração por secagem ocasionando tração interna e causam falha na estrutura [2].

Segundo Salvador e Figueiredo [3] a incorporação de fibras em misturas cimentícias promove uma melhora significativa em diversas propriedades mecânicas, como a resistência à fadiga e ao impacto. Tendo como função aumentar a capacidade de absorção de energia, já que atuam como ponte de transferência de tensões através das fissuras, reduzindo sua propagação e expansão.

Segundo Guimarães [4], a inserção de fibras em concreto acontece a um bom tempo na indústria da construção civil. Mas para que seja mais bem aproveitada, há necessidade de mais estudos para o aperfeiçoamento e dimensionamento de estruturas com fibras, pois alteram as características mecânicas, como aumento de tenacidade, resistência à tração, capacidade de absorver impactos e redução da trabalhabilidade. Todas essas alterações estão intrinsecamente ligadas à aderência da fibra na matriz cimentícia, pela propriedade da interface fibra-matriz que afeta diretamente o comportamento mecânico do compósito. A forma mais comum de observar o efeito da interface é pelo teste de arrancamento da fibra, que consiste em um processo de descolamento e acompanhamento do processo de arrancamento. Para esses dois processos, a adesão entre fibra e matriz é a chave [5].

Uma das possíveis fibras a serem empregadas são as fibras oriundas de pneus inservíveis, ou seja, quando não há mais possibilidade de serem utilizados para a finalidade que foram projetados, restando-lhes apenas a reciclagem. A retirada desta fibra de pneus é feita pelo processo mecânico ou técnica de pirólise. No método mecânico, os cabos de aço dos pneus são puxados por um mecanismo semelhante a uma punção, o pneu é triturado e o aço restante é recolhido por separadores magnéticos. A aplicação do método mecânico pode variar de uma planta de recuperação para outra. A borracha fragmentada (grânulo de borracha) e os cordões de aço são obtidos por processo mecânico [6].

Conforme Baricevic et al. [7], por mais que haja redução considerável do despejo descontrolado de pneus no meio ambiente nos últimos anos, sendo destinados a locais apropriados, ainda se tem a preocupação em desastres ambientais, como os incêndios de longa duração. Os incêndios que se desenvolvem em locais de descarte de pneus, geralmente, são difíceis de controlar e suprimir, resultando em um aumento significativo de emissão de fumaça tóxica. Por conta disto, muitos dos estatutos atuais que regulam a hierarquia do gerenciamento de resíduos de pneus enfatizam a recuperação e ou a reciclagem deles, visando, a partir destes produzir outros materiais ou mesmo gerar energia, em vez de simplesmente descartá-los, ainda que em um local próprio para este fim.

Como alternativa, o presente trabalho visa o reaproveitamento de pneus, retirando o aço que dá a sua estruturação, para que seja usado em Concreto Reforçado com Fibra (CRF). O objetivo do estudo é analisar as propriedades mecânicas e características físicas do CRF com diferentes quantidades de adições da fibra de aço oriundas de pneus, bem como analisar o comportamento da fibra na interação com a matriz cimentícia por ensaio de arrancamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

A pesquisa foi desenvolvida em seis etapas ilustradas, esquematicamente, no fluxograma da Fig. 1.

A primeira etapa foi a pesquisa bibliográfica. A segunda etapa foi a caracterização dos componentes utilizados na confecção do concreto: cimento Portland, areia, brita e água. Na terceira etapa foi feita a caracterização e análise das fibras de aço provenientes de pneus reciclados. A quarta foi definir o traço da mistura de referência sem adição de fibra de aço de pneu reciclado (FAPR), e os traços com adição em função do volume do concreto, sendo eles FAPR-20 com 20 kg/m³, FAPR-30 com 30, FAPR-40 com 40 e FAPR-50 com 50 kg/m³, assim como definir a relação água/cimento (a/c) da pasta de cimento, utilizando-se a relação 0,49. Na quinta etapa foram realizados ensaios nos corpos de prova e avaliação e análise dos resultados [8].

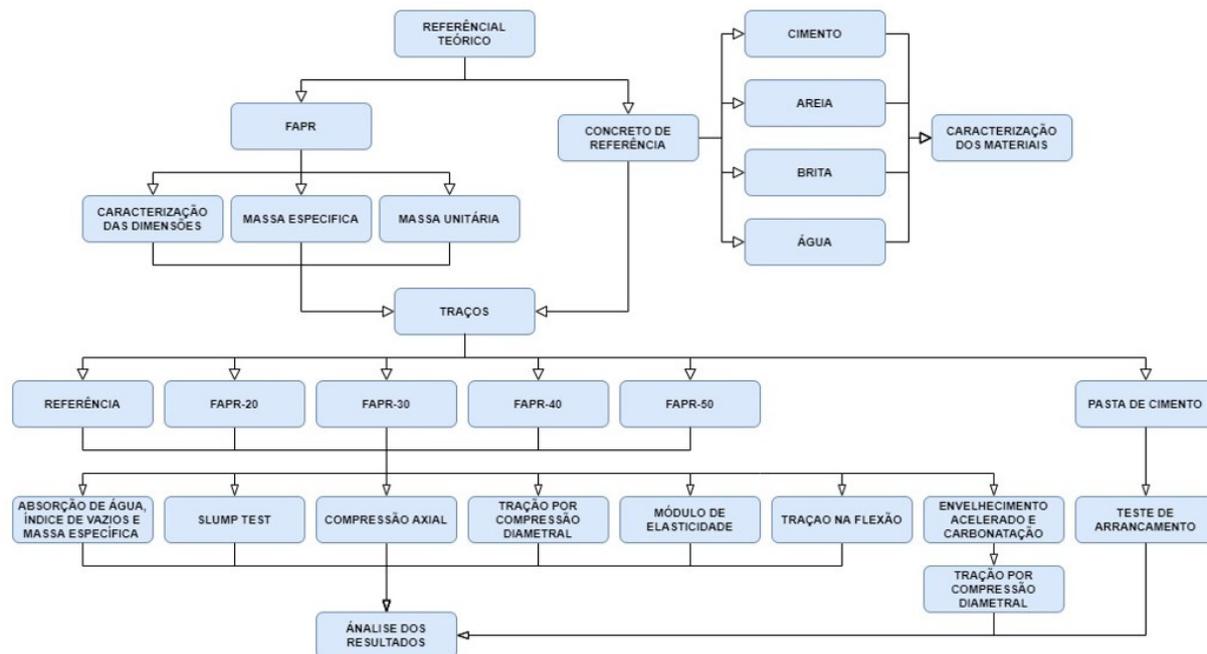


Figura 1. Fluxograma de metodologia [8]

A Tab.1 mostra as misturas com as respectivas adições e as massas de FAPR usadas para cada metro cúbico de concreto.

Tabela 1. Misturas, percentuais de adição e teor de FAPR por m³ de concreto

Misturas	Adição por m ³ de concreto (kg/m ³)	Massa da fibra para 1 m ³ de concreto (kg)
Referência	-	-
FAPR-20	20	0,40
FAPR-30	30	0,60
FAPR-40	40	0,80
FAPR-50	50	1,00

O traço definido para o concreto de referência baseou-se no trabalho de Hoffman e Antunes [9], com a composição de 1: 2,13: 2,87 (cimento: areia: brita) e relação água/cimento de 0,49. As adições de fibras de aço foram definidas com base nas pesquisas de Baricevic et al. [7].

Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland pozolânico (CP IV-32), que resulta em um concreto com menor porosidade, dificultando a entrada de dióxido de carbono e água no seu interior [8]. Como as fibras utilizadas estão sujeitas à oxidação, estas propriedades auxiliam para que isso não ocorra.

O agregado miúdo empregado foi uma areia média quartzosa com módulo de finura de 1,85 e diâmetro máximo característico de 2,36 mm, com massa específica de 2.640,00 kg/m³, massa unitária no estado solto de 1.571,33 kg/m³ e absorção de água de 0,30%. Foi utilizado o agregado graúdo de origem basáltica com massa específica de 2.999,00 kg/m³, na condição seca, massa unitária do agregado no estado solto de 1.561,00 kg/m³ e diâmetro máximo característico de 19,00 mm. Os agregados atenderam às especificações da NBR 7211:2009 [10]. Os procedimentos dos ensaios realizados para determinar módulo de finura, diâmetro máximo característico, massa específica, massa unitária no estado solto e absorção de água, seguiram as prescrições das NBRs 16916:2021 [11], 16917:2021 [12], 16972:2021 [13], 17054:2022 [14], 16916:2021 [11]. Foi utilizada água da rede da concessionária local, conforme as diretrizes da NBR 15900-1:2009 [15].

As FAPRs utilizadas foram originárias de uma indústria de beneficiamento de pneus, que recebe e coleta estes resíduos nas mais variadas borracharias do sul catarinense (Fig.2).

A mistura dos componentes foi feita em uma betoneira, tendo por ordem de adição a brita e a areia, junto à metade da quantidade de água, adição de cimento e restante da água e a aplicação das fibras no concreto.

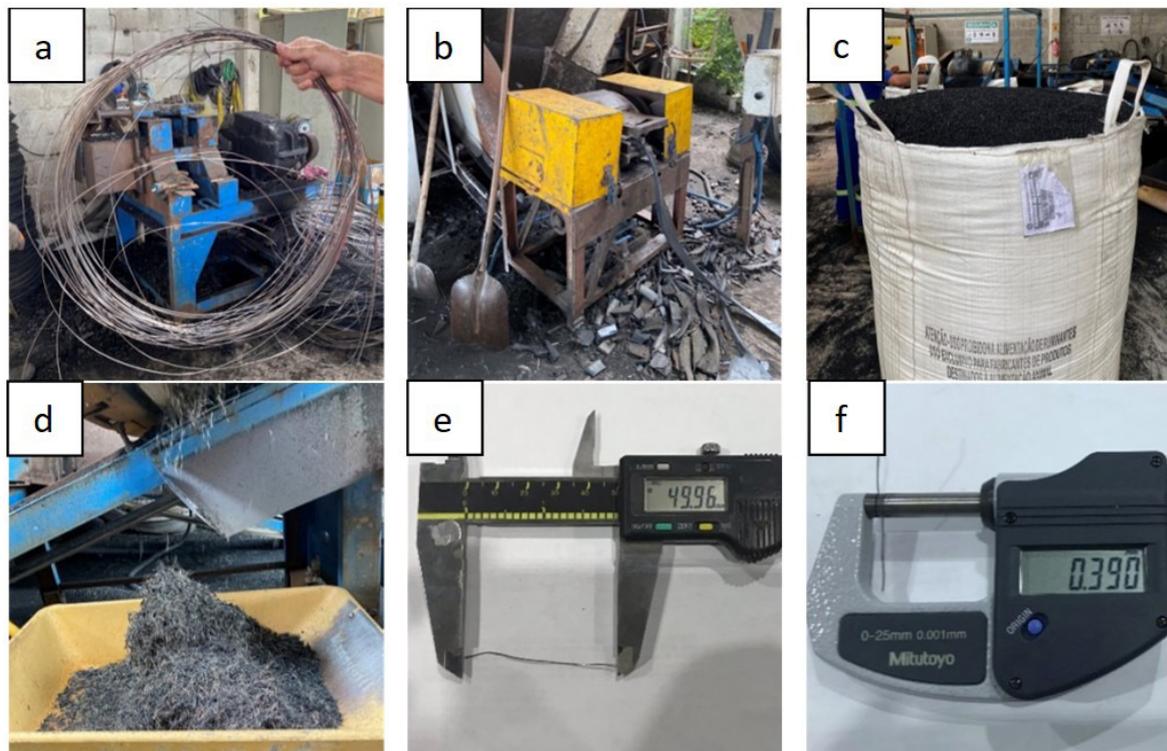


Figura 2. Beneficiamento e caracterização das fibras de aço de pneus reciclados: (a) fibra de aço resultante do talão do pneu; (b) trituração do pneu; (c) borracha do pneu resultante do processo de separação; (d) fibra de aço do pneu resultante do processo de separação; (e) caracterização do comprimento da fibra de aço do pneu; (f) caracterização do diâmetro da fibra de aço do pneu [8].

Para a caracterização da fibra, foi feita a medição do comprimento e diâmetro utilizando um paquímetro com precisão de 0,02 mm, como mostra a Fig.(e), e um micrômetro digital com precisão de 0,001 mm, conforme Fig.2(f). As adições das FAPR foram realizadas de forma lenta e gradativa, possibilitando que a argamassa recobrisse as fibras pouco a pouco. Os corpos de prova utilizados em todos os ensaios de caracterização física e propriedades mecânicas foram cilíndricos com dimensões de 10 × 20 cm e prismáticos com dimensões de 10 × 10 × 35 cm, de acordo com os procedimentos indicados pela NBR 5738:2015 [16], sendo três para cada ensaio. Primeiramente, foi concretado o traço referência, e em seguida o FAPR-20, FAPR-30, FAPR-40 e FAPR-50, estes com adição das fibras. A cura dos corpos de provas, foi realizada conforme itens 8.2 e 8.3 da NBR 5738:2015 [16]. Para os ensaios realizados nos corpos cilíndricos foi obedecido o item 8.2, para os corpos prismáticos o item 8.3.

As misturas foram submetidas ao teste de abatimento de tronco de cone, para avaliar a trabalhabilidade do concreto em estado fresco e, para tal, seguiu-se a NBR 16889:2020 [17].

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu os requisitos da NBR 5739:2007 [18], utilizando uma prensa servo-hidráulica (EMIC PC200i) com capacidade máxima de 200 toneladas e velocidade de carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Neste mesmo equipamento foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com velocidade de carga de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, e tração na flexão, com velocidade de carga entre 0,9 e 1,2 MPa/min, conforme prescrevem as normas NBR 7222:2011 [19] e NBR 12142:2010 [20], respectivamente. Para executar o ensaio de módulo de elasticidade estático, foram adotados os critérios da NBR 8522:2021 [21], sendo realizado em um equipamento com capacidade máxima de 200 toneladas (EMIC PC200CS) e velocidade de carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

Para o ensaio de envelhecimento inicialmente fez-se a secagem dos corpos de prova cilíndricos em estufa (OLIDEF Linea) a (71 ± 1) °C. Posteriormente, esses corpos de prova foram pesados e imersos

em solução de cloreto de sódio (5% em massa), com 99% de pureza, por um período de três dias. A conclusão do ciclo de envelhecimento deu-se pelo retorno das amostras à estufa por quatro dias. Repetiu-se o ciclo por mais quatro vezes (Fig.3).

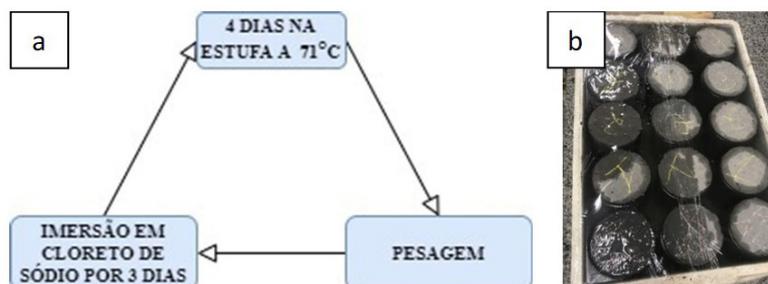


Figura 3. Ensaio de envelhecimento acelerado: (a) ciclo de envelhecimento acelerado; (b) corpos de prova imersos em solução de cloreto de sódio

Após término dos ciclos de envelhecimento, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Em sequência, passaram por análise de carbonatação, realizado por aspersão de uma solução de fenolftaleína e álcool, a uma concentração de 1% em massa, sobre a superfície de ruptura. Para medir a profundidade da carbonatação, que consiste na degradação do concreto depois de ser exposto ao composto químico, foi utilizado um paquímetro digital (Mitutoyo) com precisão de 0,01 mm.

Para o teste de arrancamento, foi necessário confeccionar os moldes metálicos, conforme mostra a Fig.4(a), projeto para execução do molde e Fig.4(b), projeto da trava destinada a segurar a fibra, baseado no trabalho de do Choi et al. [22].

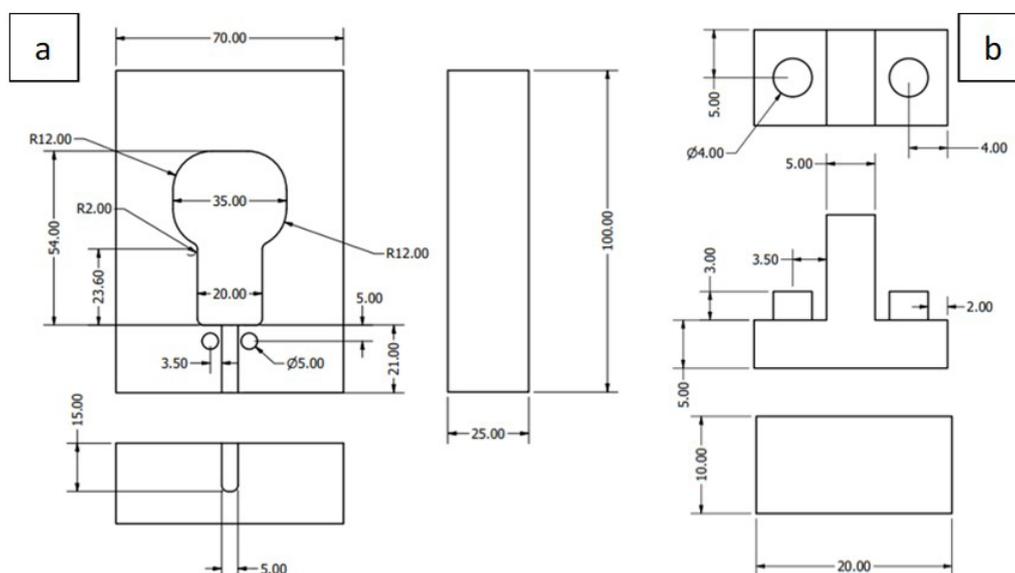


Figura 4. Projeto do molde metálico e da trava: (a) projeto para executar o corpo de prova; (b) projeto da trava destinada a segurar a fibra

De acordo com a prensa disponível, uma máquina universal de ensaios (EMIC DL10000) com capacidade de 100kN, o projeto e execução do molde passou por algumas adaptações. A Fig.5(a) mostra o parafuso soldado ao molde, tendo como finalidade a fixação do mesmo à estrutura da prensa, e a Fig.5(b) mostra o equipamento montado para realização do ensaio, onde, a extremidade saliente da fibra de aço foi presa a uma garra padrão que permitia uma fixação segura da fibra, e o molde fixado à máquina. O teste de arrancamento das fibras foi realizado segundo o método desenvolvido por Choi et al. [22].

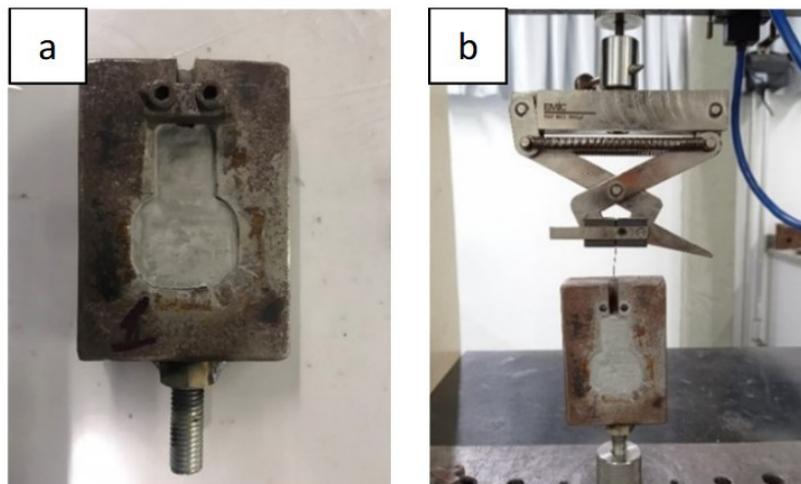


Figura 5. Teste de arrancamento: (a) máquina universal de ensaios utilizada no ensaio de arrancamento; (b) molde metálico adaptado com parafuso soldado

O comprimento de fibra embutida foi de 18 mm, usando como base o trabalho do Choi et al. [22]. Para a realização do ensaio foram parametrizadas três condições quanto ao estado da fibra metálica, sendo estas relacionadas à quantidade de borracha de pneu que estava aderida. As condições foram: (i) sem borracha aderida, Fig.6(a); (ii) média borracha aderida Fig.6(b); (iii) muita borracha aderida Fig.6(c). Essa classificação quantitativa de borracha aderida à fibra metálica foi feita por análise visual. Para cada ensaio de arrancamento foram utilizadas três fibras de cada condição. Para melhor fixação da fibra foi utilizada uma trava, fazendo com que a fibra não se movesse quando foi colocada a pasta de cimento. Além da trava foi necessária a aplicação de silicone para uma fixação perfeita da fibra (Fig.6(d)).

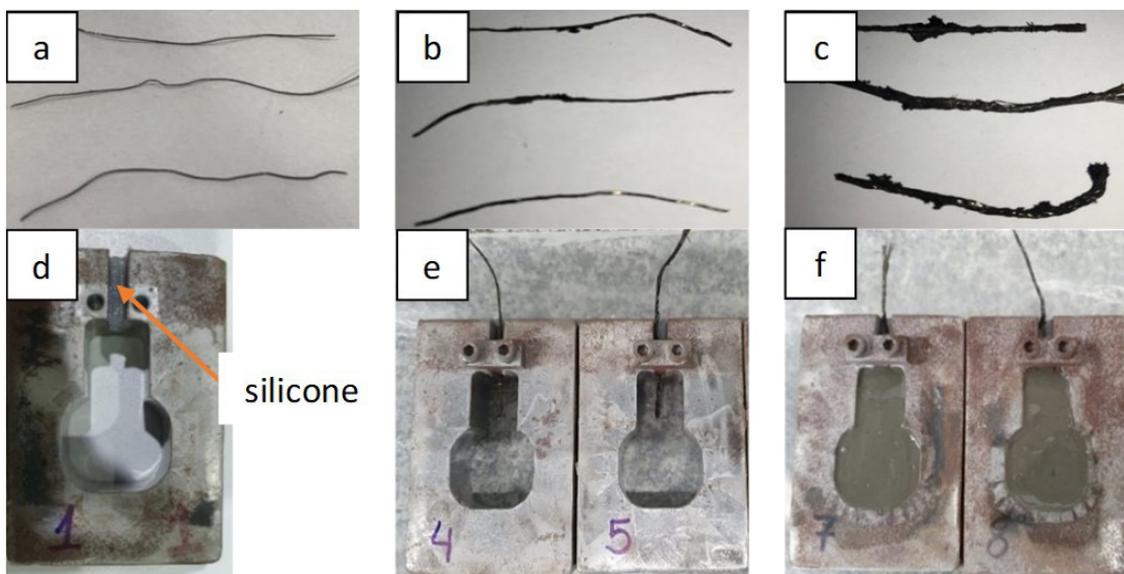


Figura 6. Condição das fibras e sua fixação: (a) fibra sem borracha aderida (i); (b) fibra com média borracha aderida (ii); (c) fibra com muita borracha aderida (iii); (d) silicone aderido ao molde; (e) fibra já inserida e travada; (f) fibra inserida e moldada com pasta de cimento

O ensaio de massa específica e absorção de água por imersão do concreto no estado endurecido foi realizado conforme estabelecido pela ABNT NBR 9778:2005 [23]. Ainda de acordo com essa norma, foi calculado o índice de vazios por imersão e ferverura. Para a realização desse ensaio foram utilizadas três amostras de cada traço de concreto, sendo estes: referência, FAPR-20, FAPR-30, FAPR-40 e FAPR-50.

As resistências à compressão, tração e flexão, módulo de elasticidade e deformação, carbonatação, teste de arrancamento, absorção de água, índice de vazios e massa específica das amostras foram comparadas por meio do método de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de comparação de médias (Tukey), quando necessário. Outros resultados foram interpretados de forma comparativa ou qualitativa. Os mesmos procedimentos estatísticos foram adotados para os dados antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) e intervalo de confiança de 95%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para caracterização das fibras foi adotada uma amostragem de 110 unidades de FAPR, extraídas aleatoriamente. Estas apresentaram variação do comprimento de 28,43 a 87,58 mm, média de 58,01 mm e desvio padrão de 19,90 mm, medidos por paquímetro digital com precisão de 0,01 mm (Fig.(e)). Para o diâmetro apresentaram variação de 0,213 a 0,563 mm, média de 0,388 mm e desvio padrão de 0,118 mm, medidos por micrômetro digital com precisão de 0,001 mm (Fig.2(f)). As Fig.7 e Fig.8 apresentam as frequências de ocorrências e suas respectivas classes. O valor mostrado na primeira classe da Fig.7 representa a frequência de ocorrência dos comprimentos das fibras menores ou iguais a 28,43 mm. Para a segunda classe, todos os valores maiores que 28,43 mm e menores ou iguais a 35,00 mm, e assim sucessivamente.

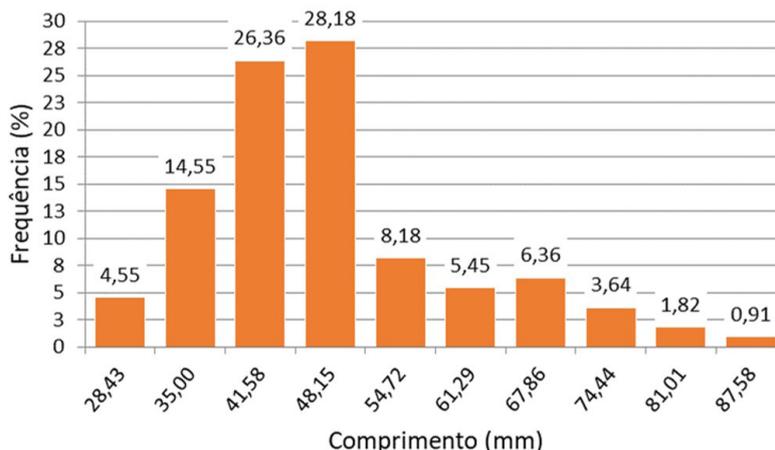


Figura 7. Frequência de ocorrência dos comprimentos das FAPR

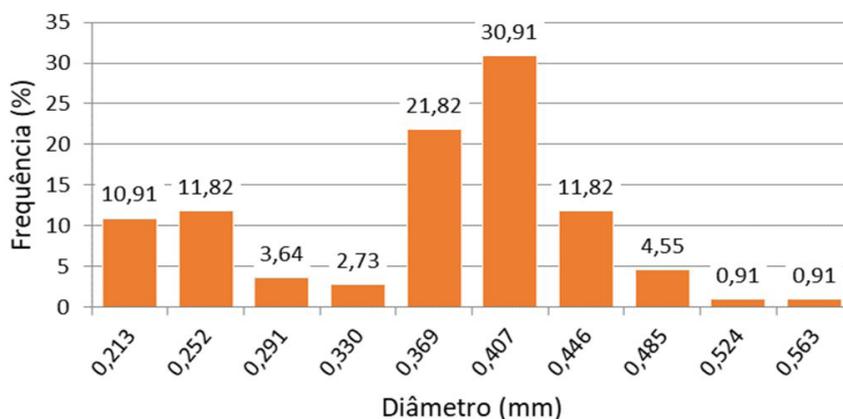


Figura 8. Frequência de ocorrência dos diâmetros das FAPR

Na Fig.9 foi mostrada a dispersão do diâmetro e do comprimento das fibras, sendo que esta difusão aleatória foi atribuída à falta de padronização durante o processamento do pneu inservível

para obtenção do resíduo. O ponto médio sinalizado foi de 45,061 e 0,343 mm para o comprimento e diâmetro, respectivamente. A massa específica para o aço utilizado no pneu foi de 7850 kg/m³, e a massa unitária do estado solto de 316 kg/m³ determinados segundo a NBR 16916:2021 [11].

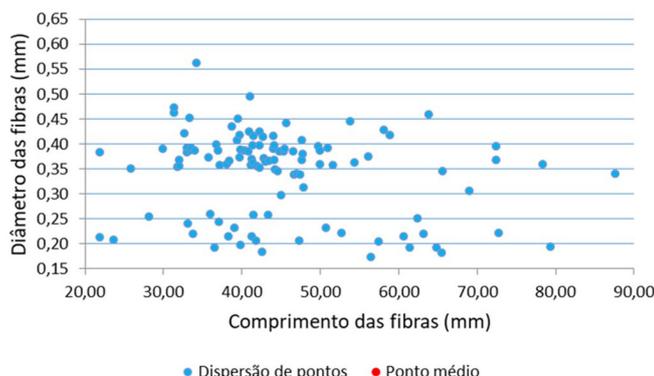


Figura 9. Dispersão de diâmetro e comprimento das FAPR

Os resultados do ensaio do tronco de cone podem ser observados na Tab.2. Notou-se a perda da trabalhabilidade dos traços com adição da FAPR, quando comparado ao concreto de referência.

Tabela 2. Leitura do abatimento do tronco cone

Misturas	Abatimento (cm)
Referência	10,0
FAPR-20	8,0
FAPR-30	6,0
FAPR-40	6,5
FAPR-50	3,5

Quando se aumenta a quantidade de adições de fibras de aço, o valor do abatimento diminui, e quanto menor o valor de adição, mais trabalhável é o concreto [24]. Isto ocorre principalmente porque ao se adicionar a fibra ao concreto aumenta-se a área superficial que, conseqüentemente demandaria de maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade.

A redução na consistência atingiu um máximo de, aproximadamente, 65% para a mistura FAPR-50 em relação à referência. Os traços FAPR-20, FAPR-30 e FAPR-40 mostraram uma redução de 20%, 40% e 35%, respectivamente. Esta desigualdade pode ter ocorrido devido ao fato do alto teor de fibra utilizado.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão, tração e flexão estão dispostos na Tab.3.

Tabela 3. Resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão

Misturas	Resistência à compressão axial (MPa)		Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Referência	32,07	2,40	3,19	0,17	4,25	0,43
FAPR-20	27,10	1,63	3,43	0,52	4,10	0,57
FAPR-30	23,79	2,35	3,21	0,42	4,29	0,13
FAPR-40	24,61	0,90	3,45	0,05	4,25	0,10
FAPR-50	22,89	1,56	3,28	0,40	3,60	0,16
p	0,0008		0,8376		0,1186	
F	11,9332		0,3511		2,4063	
F _{crítico}	3,4780		3,4780		3,4780	

Os valores de resistência à compressão axial do concreto foram todos acima do estabelecido pela NBR 6118:2014 [25], que estabelece resistência mínima de 20 MPa para estruturas de concreto armado e 15 MPa para estruturas de fundações e provisórias. O valor $p < \alpha$ comprovou que houve evidência de diferenças significativas nas resistências à compressão axial, pois $F > F$ crítico. De acordo com o teste de Tukey, as amostras FAPR-30, FAPR-40 e FAPR-50 apresentaram diferenças em relação ao traço de referência, mas a mistura FAPR-20 não mostrou diferenças significativas. Com base nos resultados da Tab.3, o maior decréscimo de resistência em relação à referência foi para a mistura FAPR-50, com $(22,89 \pm 2,40)$ MPa, representando queda de 28,64% (Fig.10). Nos trabalhos de Baricevic et al. [7] e Koroglu (2018), foi possível observar que as adições de fibra confirmaram a redução da resistência à compressão, e quanto maior o teor de fibra, a quantidade de vazios aumentará na mesma proporção. Conseqüentemente, pode-se concluir que a inserção de fibras promove a redução da resistência à compressão axial. A Fig.10 mostra os resultados de resistências à compressão axial, diametral pré-envelhecimento e à tração na flexão.

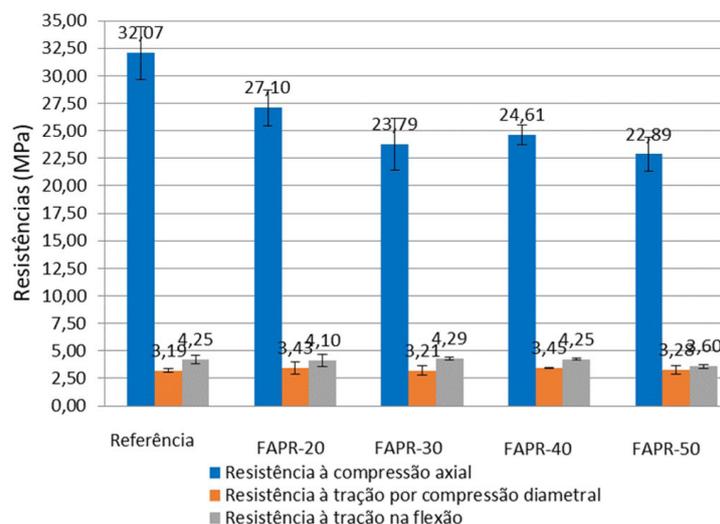


Figura 10. Resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão

Para a resistência à tração por compressão diametral, não houve variação significativa, pois o valor de $p > \alpha$ e $F < F$ crítico. As adições de fibras de aço proporcionaram aumento da resistência à tração. O aumento pode estar associado à ancoragem mecânica e ação da ponte da fibra no interior da matriz cimentícia [24][26][27]. Para a resistência à tração na flexão, a análise de variância apontou $p > \alpha$ e $F < F$ crítico. Desse modo, não houve diferenças significativas entre as misturas. Graeff et al. [28] comentam que a resistência à flexão com adição de fibra não foi alterada estatisticamente em seu trabalho, corroborando com o resultado obtido neste trabalho. Para Choi et al. [22], a adição de fibras de aço aumentou a resistência à flexão.

A Fig.11 mostra a fissuração ocasionada após a ruptura. As fissuras se assemelharam em todos os traços desenvolvidos, corroborando com a análise estatística de que não houve diferenças significativas nas amostras no ensaio de resistência à tração na flexão.



Figura 11. Ruptura à tração na flexão

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade são mostrados na Tab.4.

Tabela 4. Módulo de elasticidade

Misturas	Módulo de elasticidade (GPa)		Deformação (Micro strain)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Referência	42,04	2,94	216,56	14,89
FAPR-20	41,71	2,92	183,49	12,36
FAPR-30	39,02	0,84	170,14	3,65
FAPR-40	39,94	1,93	172,57	8,26
FAPR-50	40,75	4,49	158,01	17,97
p		0,6984		0,0019
F		0,5580		9,5539
F _{crítico}		3,4780		3,4780

Para o ensaio de módulo de elasticidade, o valor $p > \alpha$ comprovou que não houve evidências de que a média das misturas apresente diferenças significativas e pode ser confirmada observando-se que o valor de $F < F_{crítico}$. A inclusão de fibras de aço no concreto tem pouco efeito sobre o módulo, indicando que geralmente é considerado igual ao de um concreto sem fibras semelhantes [29]. Sua principal função é aumentar a capacidade de absorção de energia, pois atuam como ponte de transferência de tensões através das fissuras, reduzindo sua propagação e expansão [27]. A Fig.12 mostra as micro deformações os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade.

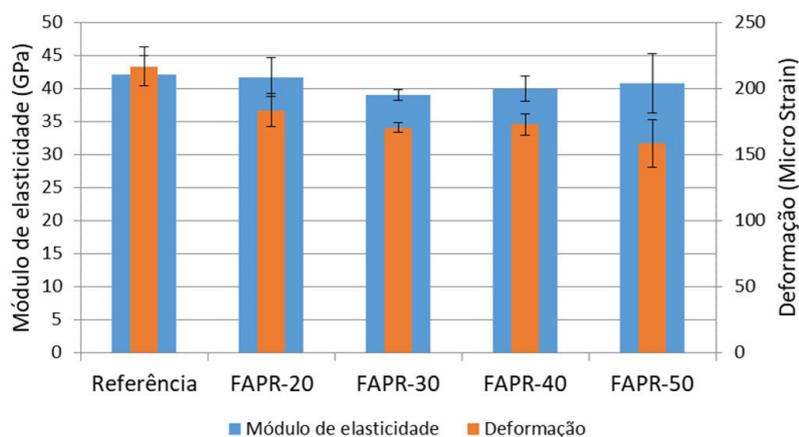


Figura 12. Módulo de elasticidade e deformações

Há evidência de que as médias de deformação apresentaram diferenças significativas, confirmadas pelo teste de Tukey, nas misturas FAPR-30, FAPAR-40 e FAPR-50 em relação à referência. Conforme Tab.4, todas as misturas sofreram redução na deformação, para a FAPR-20 a redução foi de 15,27%, para FAPR-30 de 21,43%, FAPR-40 de 20,31% e FAPR-50 com a maior redução, de 27,04% em relação à mistura de referência.

O concreto reforçado com fibras apresentou maior ductilidade em relação às matrizes não reforçadas, que se tornam frágeis após a formação da primeira fissura. As fibras proporcionam maior capacidade de absorção de energia. Em geral, quando a resistência de um material aumenta, a ductilidade e a tenacidade diminuem, ou seja, materiais com altas resistências normalmente rompem de maneira brusca, frágil [29].

Os corpos de prova envelhecidos na solução de cloreto de sódio foram testados à tração por compressão diametral após conclusão dos quatros ciclos, e os resultados são mostrados na Tab.5. Há aumento da resistência em relação às amostras não submetidas aos ciclos de envelhecimento. Este ganho pode ser justificado tendo em vista que os corpos de prova pós-envelhecimento tiveram

quatro semanas a mais de cura do concreto, para após serem ensaiados e rompidos [8]. O Cimento (CP IV-32) possui hidratação mais lenta, o que fez com que o seu ganho de resistência até os 28 dias seja por consequência mais lento também [9].

Tabela 5. Resistência à tração por compressão diametral pré e pós-envelhecimento

Misturas	Pré-envelhecimento (MPa)		Pós-envelhecimento (MPa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Referência	3,19	0,17	3,70	0,23
FAPR-20	3,43	0,52	3,77	0,07
FAPR-30	3,21	0,42	3,60	0,39
FAPR-40	3,45	0,05	3,53	0,24
FAPR-50	3,28	0,40	3,83	0,14

As análises das resistências à tração por compressão diametral não apresentaram diferenças significativas entre as misturas. A Fig.13(a) mostra o quanto a água penetrou no corpo de prova; a Fig.13(b) mostra visualmente que não houve carbonatação nas amostras. A fenolftaleína é um composto orgânico usado para medir o pH, classifica se as substâncias são ácidas ou básicas, e altera sua cor conforme o pH. Assim, se o pH for menor do que 9, será incolor, neste caso houve carbonatação. Mas, se o pH for maior, a cor apresentada será magenta, e sinaliza que não houve carbonatação. A análise visual externa dos corpos de prova (Fig.13(b)) mostra poucos pontos e manchas de oxidação. Esperou-se tal resultado pelo teor de adição empregado e pelo fato de que as fibras estão dispostas por toda área do corpo de prova, e conseqüentemente na região onde houve a penetração da água.

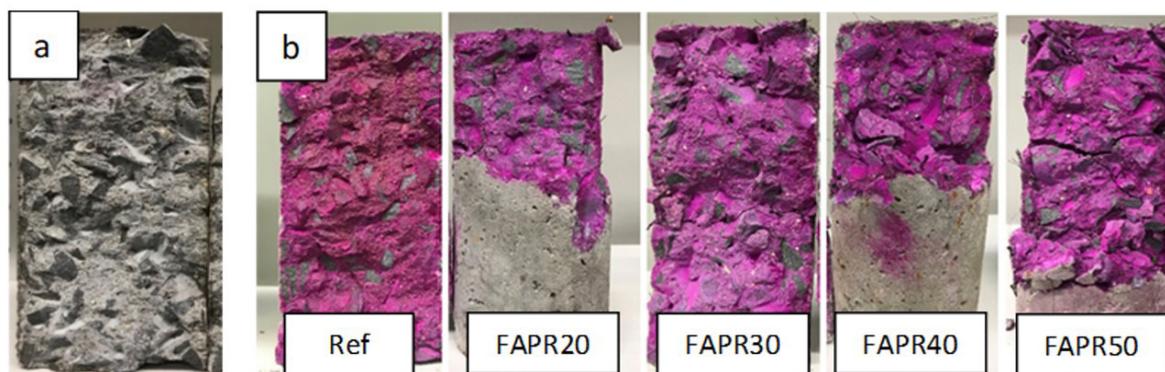


Figura 13. Análise de penetração de água e carbonatação: (a) penetração da água na amostra de referência; (b) solução de fenolftaleína e álcool aplicada nas superfícies das amostras, e aspecto visual da superfície externa das amostras após ciclos de envelhecimento

Uma das preocupações em relação à adição da fibra de aço na matriz de concreto é que estas podem criar caminhos preferenciais para entrada da água e do CO₂ para o interior do concreto, aumentando a carbonatação e conseqüentemente acelerando o processo de degradação do aço [8]. Portanto, este resultado confirmou que o teor de adição de FAPR deste trabalho não contribuiu para o processo de oxidação do aço.

Na Fig.14 pode-se observar as fibras em cima dos moldes metálicos com a pasta cimentícia, logo após a execução do ensaio de arrancamento. Todas as fibras foram arrancadas de forma íntegra, isto é, não houve ruptura de nenhuma delas durante a execução do ensaio, logo, foi possível medir a aderência da fibra na matriz. O não rompimento da fibra durante a realização do ensaio deve-se à resistência à tração do aço AISI 1070 e/ou AISI 1080 da fibra ser superior à resistência de aderência da fibra com a pasta cimentícia.



Figura 14. Moldes metálicos com as respectivas fibras após teste de arrancamento

Na Tab.6 é mostrada a resistência da aderência das fibras com a pasta cimentícia, para as três condições da fibra, ou seja, para a quantidade de borracha de pneu aderida à fibra metálica, (i) sem borracha aderida, (ii) média borracha aderida, e (iii) muita borracha aderida. A quantidade de borracha aderida na fibra influenciou sua resistência de aderência com a pasta cimentícia, tendo em vista que $p < \alpha$ e $F > F_{crítico}$. Com base no teste Tukey, a fibra na condição (ii) com média borracha aderida tem diferença significativa em relação à fibra na condição (i) sem borracha aderida. A Fig.15 mostra os resultados para o teste de arrancamento.

Tabela 6. Teste de arrancamento

Condição da fibra	Arrancamento (N)	
	Média	Desvio padrão
(i) Sem borracha aderida	17,60	9,61
(ii) Média borracha aderida	155,80	63,23
(iii) Muita borracha aderida	118,29	44,40
p		0,0228
F		7,5823
F _{crítico}		5,1432

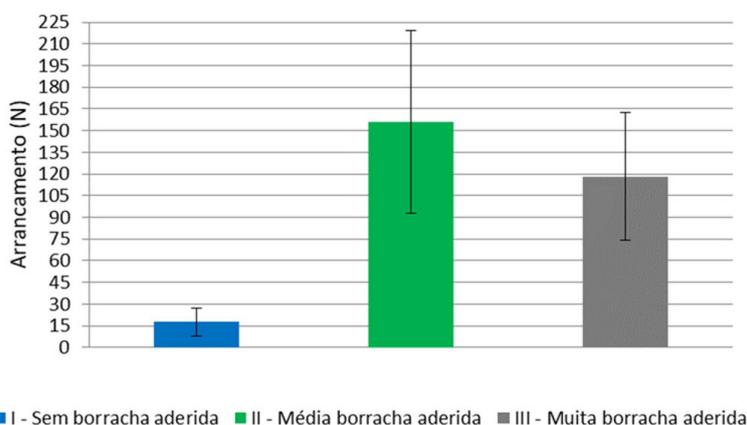


Figura 15. Resultados do teste de arrancamento

A resistência de aderência da fibra na condição (ii) foi superior à condição (i). Um dos possíveis motivos deve-se à superfície da fibra na condição (ii) ser mais rugosa que a condição (i) [30]. A fibra na condição (ii) apresentou maior rugosidade, o que aumenta o atrito quando há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais. Partículas mais rugosas dificultam o escoamento da pasta, pois aumentam a força de atrito entre as partículas [31][32].

Os resultados para absorção de água, índice de vazios e massa específica são mostrados na Tab.7. Pode-se notar que todos os teores de adição de fibras não influenciaram nos resultados, sendo um bom resultado. Era o esperado, pois a resistência à compressão axial também não teve alteração significativa com as adições das fibras, visto que esta propriedade mecânica está relacionada aos índices de vazios do concreto.

Tabela 7. Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Misturas	Absorção de água (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica (g/dm ³)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Referência	2,96	1,62	7,08	3,83	2,40	0,03
FAPR-20	2,86	2,36	6,82	5,54	2,42	0,06
FAPR-30	2,87	2,20	6,59	4,70	2,36	0,13
FAPR-40	2,73	1,64	6,52	3,85	2,41	0,05
FAPR-50	3,05	0,14	7,31	0,31	2,40	0,01
p	0,9995		0,9991		0,8698	
F	0,0139		0,0199		0,3024	
F _{crítico}	3,4780		3,4780		3,4780	

Na Fig.16 são mostrados os resultados do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Com a adição de fibras ao concreto tem-se uma tendência em aumentar a incorporação de ar durante a mistura, aumentando consequentemente a absorção de água e os índices de vazios. Entretanto não houve variação significativa, desta forma, para estes ensaios as adições de fibra não tiveram efeito. A massa específica foi calculada em g/dm³ para melhor representação do gráfico. Para absorção de água, índice de vazios e massa específica não há evidência estatística de diferenças significativas, pois $p > \alpha$ e $F < F_{crítico}$.

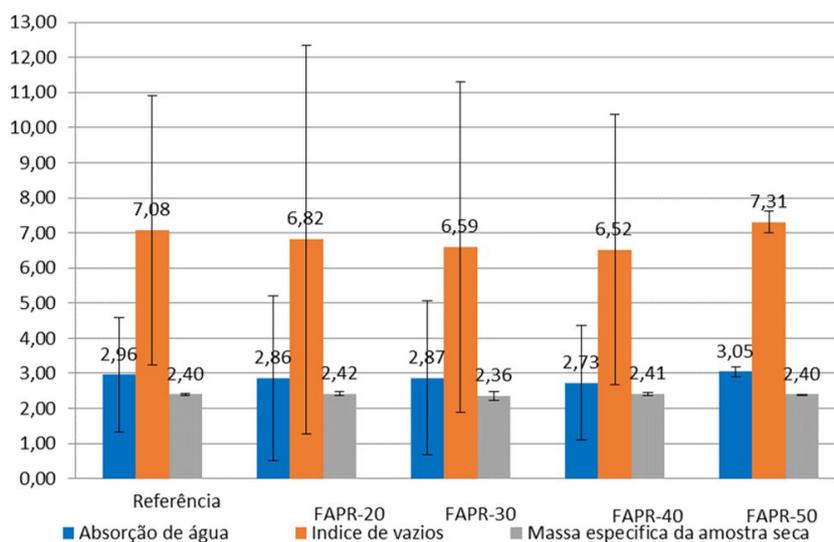


Figura 16. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

4. CONCLUSÃO:

A análise comparativa dos resultados mostra que a adição de 20, 30, 40 e 50 kg de fibras de aço de pneus reciclados para um m³ de concreto reduz sua trabalhabilidade e a resistência à compressão.

Estatisticamente, para compressão axial a adição de fibras teve influência significativa na FAPR-30, FAPR-40 e FAPR-50 em relação ao traço referência. O possível motivo para a queda da resistência é o aumento de vazios proporcional ao aumento da adição de fibras.

As resistências à tração por compressão diametral pré e pós envelhecimento acelerado, à tração na flexão e o módulo de elasticidade não mostraram evidência estatística que há diferenças significativas entre as misturas, ou seja, as quantidades adicionadas de fibras não influenciam nestas propriedades.

No ensaio de deformação, há evidência estatística de diferenças significativas para as misturas FAPR-30, FAPR-40 e FAPR-50 em relação à referência.

Não há carbonatação nas amostras analisadas. Este fato pode estar associado ao curto período de exposição e ao teor de fibras de aço usado na matriz cimentícia, não causando oxidação do aço.

As adições de fibra não influenciam na absorção de água, índice de vazios e massa específica, pois não houve diferença estatística em relação à referência.

As fibras de aço de pneus reciclados podem ser utilizadas para a melhoria do desempenho do concreto, principalmente devido ao fato de a adição delas melhorar a resistência à tração por compressão diametral. Assim como minimizar o impacto ambiental, por utilizar um material que seria descartado sem utilidade, como o pneu inservível.

REFERÊNCIAS:

- [1] Silva W, Santos G, Araújo W, 2017). Resíduos sólidos de construção civil: caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* 6, 286. <http://doi.org/10.19177/rgsa.v6e22017286-301>
- [2] Sanjeev J, Nitesh K S, 2020. Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete. *Materials Today* 27, 2, 1559-1568.
- [3] Salvador R P, Figueiredo A D D, 2013. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. *Matéria* 18, 1273-1285.
- [4] Guimarães D, 2015. Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [5] Friedrich L F, Wang C, 2016. Continuous modeling technique of fiber pullout from a cement matrix with different interface mechanical properties using finite element program. *Lat Am J Solids Struct* 13, 10, 1937-1953.
- [6] Sengul O, 2016. Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Construction and Building Materials* 122, 649-658.
- [7] Baricevic A, Bjegovic D, Skazlic M, 2017. Hybrid fiber reinforced concrete with unsorted recycled tire steel fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29, 6.
- [8] Comin H, Antunes E G P, 2020. Análise do efeito da adição de fibras de aço provenientes de pneus reciclados nas propriedades mecânicas do concreto. Criciúma: Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- [9] Hoffman I S, Antunes E G P, 2017. Análise experimental de vigas mistas de concreto armado e perfis de GFRP utilizados como substitutos parciais das armaduras transversais. Criciúma: Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- [10] NBR 7211, 2009. Agregados para concreto. Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [11] NBR 16916, 2021. Agregado miúdo. Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [12] NBR 16917, 2021. Agregado graúdo. Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [13] NBR 16972, 2021. Agregados. Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] NBR 17054, 2022. Agregados. Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] NBR 15900, 2009. Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] NBR 5738, 2015. Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] NBR 16889, 2020. Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] NBR 5739, 2018. Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] NBR 7222, 2011. Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] NBR 12142, 2010. Concreto. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [21] NBR 8522, 2021. Concreto. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- [22] Choi E, Mohammadzadeh B, Hwang J, Kim W J, 2018. Pullout behavior of superelastic SMA fibers with various end-shapes embedded in cement mortar. *Construction and Building Materials* 167, 605-616.
- [23] NBR 9778, 2005 Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] Koroglu M A, 2018. Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires. *Journal of Construction* 484-498.
- [25] NBR 6118, 2014. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] Xijun S, Leonardo B N, Cesario T, Zachary G, 2020. Semicircular bending fracture test to evaluate fracture properties and ductility of cement mortar reinforced by scrap tire recycled steel fiber. *Engineering Fracture Mechanics* 236, 107228. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107228>
- [27] Figueiredo A D, 2011. Concreto reforçado com fibras. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [28] Graeff A, Pilakoutas K, Neocleous K, Filho L C P S, 2011. Análise de longa duração de concretos reforçados com fibras de aço reciclados de pneus inservíveis para aplicação em pavimentos de concreto. Florianópolis: 53º Congresso Brasileiro do Concreto 1-15.
- [29] Mehta P K, Monteiro P J M, 2014. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON.
- [30] Negrão D E E, Pimentel L L, 2012. Aderência compósito x aço: influência do diâmetro da barra de aço. São Paulo: XVII Encontro de Iniciação Científica e II Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação.
- [31] Arnold D C M, 2011. Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas. São Leopoldo, RS: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- [32] França V H, 2004. Aderência aço-concreto. Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. Ilha Solteira, SP: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira Universidade Estadual Paulista.