

Análise do efeito da adição de cavacos de aço nas propriedades mecânicas do concreto

Andressa Loch¹, Rafael de Paula Gurkewicz^{1,2,3*}, Augusto Wanderlind^{1,2}, Ângela Costa Piccinini^{1,2}, Jorge Henrique Piva^{1,2}, Elaine Guglielmi Pavei Antunes^{1,2}

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

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

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

*rafaelpgurkewicz@unesc.net

Resumo:

A adição de fibras ao concreto minimiza seu comportamento frágil característico. A fibra de aço tem boa capacidade de carga e módulo de elasticidade, porém possui custo elevado. Desta forma, buscou-se um material alternativo que possui composição parecida e que pudesse substituir este reforço. A indústria metalmecânica produz grande quantidade de resíduo, entre eles, o cavaco de aço, proveniente do processo de usinagem. O presente artigo apresenta uma análise comparativa de amostras com e sem adição de cavacos de aço no concreto. Considerando suas características físicas percebeu-se que poderia melhorar o comportamento do concreto, que é intrinsecamente frágil. Para tal, verificaram-se as mudanças nas propriedades mecânicas das misturas com adição por meio de ensaios experimentais, tais como compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e retração hidráulica. Todos os testes foram conduzidos conforme as normas brasileiras. Com o intuito de verificar a possível oxidação dos cavacos, fez-se ainda o ensaio de envelhecimento acelerado. Os percentuais de adição de cavaco foram 0,75, 1,25, 1,75 e 2,25% de adição em relação ao volume de concreto produzido. O concreto com cavacos apresentou melhora na resistência à compressão de aproximadamente 25% e um incremento na tração de cerca de 14% para o percentual de 1,75%. Proporcionou melhora de 20% na resistência à flexão com o percentual de 0,75% de adição de cavacos.

Palavras-chave: Fibras de aço; cavacos de usinagem; resíduo; compressão; flexão.

1. INTRODUÇÃO:

Conforme [1], o concreto convencional apresenta um comportamento frágil e uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura, quando submetido a esforços de tração. Por tal razão utiliza-se tanto o concreto armado, em que os esforços de tração são resistidos pela armadura de aço e, mais recentemente, o concreto reforçado com fibras (CRF), que é o resultado da adição de fibras ao concreto simples. Segundo [2], o CRF é mais tenaz e resistente ao impacto que o concreto convencional e aumenta assim a versatilidade do concreto como um material e supera suas características de fragilidade. De acordo com [3], as funções das fibras no concreto são melhorar o pós-pico de ductilidade, a durabilidade, resistência à tração pré-fenda, força de fadiga, impacto da força e erradicar as fissuras causadas pela retração.

Segundo [1], as fibras de aço possuem alta resistência e módulo de elasticidade, e podem agir como reforço ou até mesmo substituir a armadura convencional em alguns casos. Porém, as fibras de aço específicas para tal uso encontradas no mercado brasileiro costumam ter um alto custo. Conforme [4], é urgentemente necessário produzir fibras que possam substituir as fibras de aço, a fim de desenvolver materiais sólidos de concreto ou cimento reforçados com fibras mais econômicas. De acordo com [5], em pesquisas anteriores tem-se observado que resíduos como cinzas volantes, sucata de aço, escória de alto forno, areia de fundição etc., são efetivamente usados para melhorar as propriedades do concreto.

O processo de usinagem de peças de aço em tornos mecânicos gera resíduos que popularmente são conhecidos como 'cavacos'. Para [6], cavacos são porções de material, de forma irregular, removidas da peça como resultado da ação de uma ferramenta de corte. Estas peças, geralmente constituídas de aço-carbono, possuem carbono em sua composição, citando-se como exemplo o aço SAE 1045. No decorrer do processo de usinagem, uma nova forma e acabamento são geradas na peça, pela retirada de material no formato de cavaco. Desta forma, os cavacos são classificados de diversas maneiras, podem ser denominados contínuos, descontínuos e segmentados [7].

- a) Cavacos contínuos: É o resultado da usinagem de materiais dúcteis como aços de baixa liga, cobre, alumínio. Por isso, a usinagem de um material dúctil forma cavacos mais longos e contínuos [8];
- b) Cavacos descontínuos: Resulta da usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferros fundidos [9];
- c) Cavacos segmentados: Caracterizam-se por ter grandes deformações continuadas [7].

Conforme [4], os cavacos são um subproduto da indústria siderúrgica, menos custosos do que as fibras de aço existentes e são semelhantes em matérias-primas e componentes. Portanto, quando esses materiais são utilizados na produção de CRF, eles podem manter o desempenho que o CRF de fibra de aço existente no mercado.

Outro ponto que indica o uso dos cavacos é a disponibilidade do mercado. Segundo [10], com o aumento das atividades populacionais e industriais, a quantidade de fibras de resíduos geradas pelas indústrias de metal tenderá a aumentar, indicando que haverá disponibilidade desses tipos de resíduo, podendo ser utilizados para a produção de CRF de baixo custo e de alta resistência, depois de explorada sua adequação. De acordo com [7], em torno de 10% de toda a produção de metais é transformada em cavacos nos processos industriais. Enquanto a produção anual mundial de aço em 2020 foi de cerca de 1,9 bilhão de toneladas, a produção do Brasil foi em torno de 31 milhões de toneladas, tendo destinado ao consumo interno brasileiro cerca de 19 milhões de toneladas [11]. Portanto, somente no Brasil, estima-se quase 2 milhões de toneladas de cavaco de aço produzidas durante o ano de 2020.

Alguns estudos revelaram melhoras nas propriedades mecânicas do concreto utilizando cavacos de torno [4][5][3][12]. Tradicionalmente, verifica-se que houve influência na resistência à compressão com a adição de cavacos, bem como para a resistência à flexão, tenacidade do concreto e na redução da trabalhabilidade, à medida que houve aumento do percentual de sucata de aço adicionada à mistura. Conforme as pesquisas mencionadas, percebe-se um incremento das propriedades mecânicas, que ocorre próximo ao percentual de adição de 1,5% de fibra em massa de concreto produzido.

Esta pesquisa busca analisar o efeito da adição de cavacos de aço, oriundos de torno mecânico, nas propriedades mecânicas e características físicas do concreto. Para tal, definiu-se o traço de referência e os percentuais de adição, que são frações volumétricas de 0,75, 1,25, 1,75 e 2,25% de cavacos de aço em relação ao volume de concreto produzido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

A pesquisa foi desenvolvida em seis etapas, as quais são ilustradas esquematicamente no fluxograma apresentado na Fig.1.

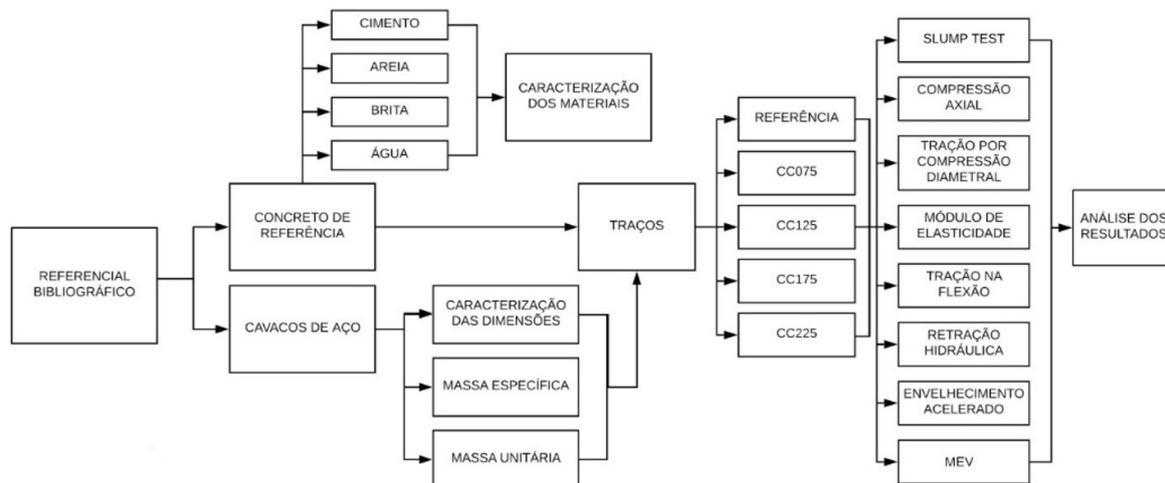


Figura 1. Fluxograma do trabalho realizado

A primeira etapa consistiu no estudo dos trabalhos já realizados sobre uso de cavacos em concreto. A segunda etapa refere-se à caracterização dos componentes utilizados na confecção do concreto, que são: cimento Portland, areia, brita e água. Em seguida, a análise dos cavacos. O quarto passo foi definir o traço da mistura de referência, onde não houve adição de cavacos, e os traços com percentuais de adição, sendo eles CC075 com 0,75%, CC125 com 1,25%, CC175 com 1,75% e CC225 com 2,25%. A quinta etapa refere-se aos ensaios, realizados nos corpos de prova e avaliação dos resultados dos ensaios. A Tab.1 identifica as misturas com seus respectivos percentuais de adição e a massa de cavacos adicionada para cada metro cúbico de concreto.

Tabela 1. Misturas, percentuais de adição e quantidade de cavacos por m³.

Misturas	Percentual de adição (% vol.)	kg/m ³
Referência	0,00	0,00
CC075	0,75	2,55
CC125	1,25	4,25
CC175	1,75	5,95
CC225	2,25	7,65

O concreto utilizado foi baseado no trabalho de [13], sendo o traço de 1: 2,87: 2,13 com relação água/cimento de 0,48. Foram confeccionados cinco tipos de composições. Para cada um, o teor de cavacos de aço inserido foi de 0,75, 1,25, 1,75 e 2,25% do volume de concreto produzido, com exceção do traço referência, que não possui adição do resíduo. Para obtenção das quantidades por m³ de concreto produzido utilizou-se a massa unitária do resíduo. Estes percentuais foram escolhidos com base [3][12][4][5], que utilizaram os percentuais de adição de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0%, e obtiveram os melhores resultados com adições de até 1,5% em volume. Desta forma, procurou-se usar frações intermediárias para verificar se ocorre o mesmo comportamento.

Utilizou-se o Cimento Portland Pozolânico (CP IV 32), cujas características abrangem os requisitos exigidos pela norma NBR 16697 [14]. Devido ao fato de os cavacos estarem sujeitos à oxidação, escolheu-se este tipo de cimento, uma vez que tem menor porosidade, e assim diminui a entrada de dióxido de carbono (CO₂) e a água para o interior do concreto. Segundo a NBR 16697 [14], é um material composto de 15 a 50% de material pozolânico, sendo um cimento pouco poroso, que possui resistência à ação da água do mar e de esgotos, apresenta maior impermeabilidade, maior durabilidade e maior resistência mecânica à compressão a longo prazo.

O agregado miúdo empregado trata-se de uma areia média lavada quartzosa com módulo de finura de 2,37 e diâmetro máximo característico de 2,40 mm, massa específica seca de 2365 kg/m³ e massa unitária no estado solto de 1581 kg/m³. Foi utilizado o agregado graúdo de origem basáltica com massa específica de 2999 kg/m³, na condição seca, com massa unitária no estado solto de

1543 kg/m³ e diâmetro máximo característico de 19,00 mm, como recomenda as NBRs 16916 [15], 16917 [16] e 17054 [17]. Usou-se água diretamente da rede de água da concessionária local. E segue as prescrições da NBR 15900-1 [18].

Os cavacos utilizados são originários de indústrias de usinagem, sendo gerados no processo de fabricação de peças mecânicas, estes em particular, são resíduos da usinagem de pontas de eixo de implementos agrícolas, cujo aço utilizado é o SAE 1045. São classificados como cavacos descontínuos, segundo Machado et al. [7]. Segundo Romeiro [19], este aço possui em sua composição 0,42 a 0,5% de Carbono, 0,6 a 0,9% de Manganês, 0,1 a 0,3% de Silício, no máximo 0,04% de Fósforo e 0,05% de Enxofre. A Figura 2 demonstra um exemplo de cavacos de aço SAE 1045.

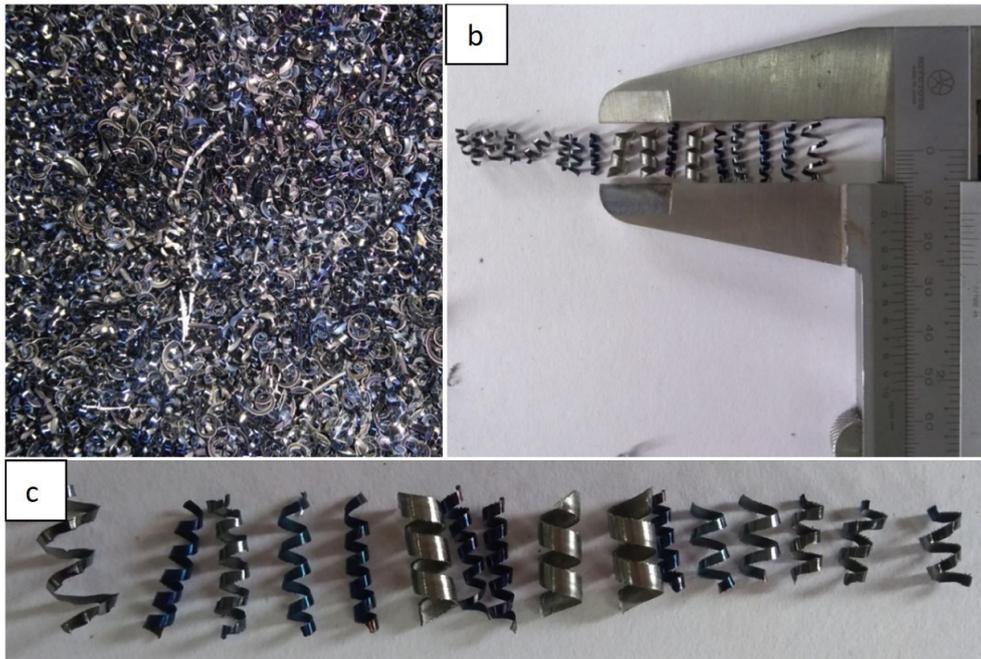


Figura 2. Cavacos de aço SAE 1045: (a) cavacos; (b) dimensões; (c) formatos

Os cavacos incorporados como resíduo possuem comprimento de 6 a 14 mm, sendo seu comprimento médio de 10 mm, espessura média de 0,5 mm e diâmetro médio de 3 mm, medidos por paquímetro com precisão de 0,05 mm. A massa específica de 7850 kg/m³ e a massa unitária do estado solto de 340 kg/m³ foram determinadas segundo a NBR 16916 [15].

As adições dos cavacos foram feitas de forma a possibilitar que a pasta recobrisse os cavacos pouco a pouco em seu interior. Os corpos de prova utilizados foram cilíndricos com dimensões de 10×20 cm², e prismáticos com dimensões de 10×10×30 cm³ e 7,5×7,5×28,5 cm³, de acordo com os procedimentos indicados pela NBR 5738 [20], sendo três para cada ensaio. Primeiro, foi concretado o traço referência, seguido pelo CC075, CC125, CC175 e CC225, estes com adição de cavacos de aço. Estes passaram por cura submersa e foram ensaiados mecanicamente após 28 dias.

As misturas foram submetidas ao teste de abatimento de tronco de cone, para avaliar a trabalhabilidade do concreto em estado fresco. A partir da concretagem do traço referência, foi determinado um abatimento de 8,0 ± 2,0 cm. As demais concretagens utilizaram a mesma referência com objetivo de determinar um padrão para todas as amostras, sem a realização de ajustes com aditivos ou adição de água. Seguiu-se a NBR 16889 [21] para avaliar o 'slump test'.

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu os requisitos da NBR 5739 [22]. Foi utilizada prensa servo-hidráulica EMIC PC200i, com capacidade máxima de 200 toneladas e velocidade de carga de 0,45 ± 0,15 MPa/s. Para executar o ensaio de módulo de elasticidade estático, foram adotados os critérios da norma NBR 8522 [23]. Este ensaio tem como finalidade determinar a deformação do concreto em estado endurecido levando em conta a carga aplicada. Foi realizado em uma prensa EMIC PC200CS, com capacidade máxima de 200 toneladas e velocidade de carga de 0,45 ± 0,15 MPa/s. Foram conectados à prensa dois 'strain gages' fixados no corpo de prova com uma fita elástica e

posicionados no terço médio do corpo de prova. Para análise foi usado o software TESC Test Script. Com o corpo de prova centralizado na prensa foi aplicada uma tensão média de 30% da resistência à compressão do concreto, obtida anteriormente no ensaio de compressão axial. A carga foi mantida por 60 segundos e logo após foi reduzida até uma tensão de 0,5 MPa, que foi mantida novamente por um período de 60 segundos. Esse ciclo foi repetido três vezes até finalizar o ensaio. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão axial, com velocidade de carga de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, conforme prescreve a NBR 7222 [24]. De início, uma força de compressão foi aplicada às placas para o ajuste do corpo de prova. Em seguida o corpo de prova foi submetido a uma carga até ocorrer sua ruptura, finalizando o ensaio. O ensaio de tração na flexão foi realizado na máquina universal EMIC DL 10000 e velocidade de carga entre 0,9 e 1,2 MPa/min. Os valores das cargas e deslocamentos foram obtidos da célula de carga instalada na base do cilindro, e seguiu o que preconiza a NBR 12142 [25], que diz que a força deve ser aplicada continuamente e sem choques, de forma que o aumento da tensão sobre o corpo de prova esteja compreendido no intervalo de 0,9 a 1,2 MPa/min.

O ensaio de retração hidráulica do concreto foi realizado conforme a NBR NM 131 [26], no entanto, o relógio comparador vertical da marca Mitutoyo utilizado tinha precisão de 0,01 mm e a norma recomenda o uso de um relógio com precisão de 0,001 mm. Os corpos de prova foram instalados no instrumento com o ponto sensível do dial retraído. O ponto de referência do corpo de prova foi colocado no pino inferior do instrumento e seguro na posição vertical, o ponto sensível do dial foi solto para contatar o ponto de referência superior do corpo de prova. Antes de a leitura ser aferida, girou-se o corpo de prova para assegurar o perfeito posicionamento na menor leitura. As medidas foram feitas 24 h, 3, 7 e 28 dias após a concretagem dos corpos de prova.

As amostras com adição de cavacos foram submetidas à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em microscópio Zeiss EVO MA10, a fim de verificar a interface do cavaco com a matriz cimentícia. As amostras avaliadas em MEV foram as que mostravam os cavacos aderidos ao concreto após o ensaio de compressão diametral.

Para o ensaio de envelhecimento acelerado, foram preparados, para cada composição da Tab.1, 3 corpos de provas cilíndricos que foram secos em estufa Olidef CZ Linea (71 ± 1) °C, sendo a temperatura baseada no trabalho de [27]. Na sequência, foram pesados e imersos em uma solução de cloreto de sódio (5% em massa) por um período de três dias. A conclusão do ciclo de envelhecimento, fundamentado no trabalho de [28], deu-se pelo retorno das amostras à estufa por quatro dias. Repetiu-se o ciclo por mais quatro vezes. A Fig.3 exemplifica o ciclo adotado.

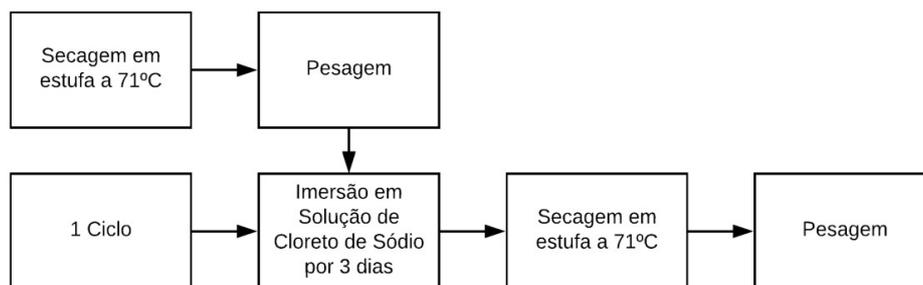


Figura 3. Ciclo de envelhecimento acelerado

Após término dos ciclos de envelhecimento, as amostras foram submetidas ao ensaio resistência à tração por compressão diametral. As amostras também foram submetidas à análise de carbonatação por aspersão de uma solução de fenolftaleína e álcool, a uma concentração de 1% em massa, sobre a superfície de ruptura resultante do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Cada corpo de prova resultou em 2 superfícies de ruptura, que implicaram na análise de 30 planos. Para medir a profundidade da carbonatação utilizou-se um paquímetro digital Mitutoyo com precisão de 0,01 mm. Foram realizadas seis medições de cada plano, a fim de se obter a média de profundidade de carbonatação.

As resistências à compressão, tração e flexão, módulo de elasticidade, retração hidráulica e carbonatação das amostras foram comparadas pelo método de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de comparação de médias (Tukey). Já outros resultados foram interpretados de forma

comparativa ou qualitativa. Os mesmos procedimentos estatísticos foram adotados para confrontar 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:

A leitura dos abatimentos pode ser observada na Tab.2. A adição de cavaco de aço não apresentou um efeito padrão no abatimento. Segundo [10], quando se aumenta o percentual de cavacos o valor do 'slump' diminui, e quanto menor o valor mais consistente é o concreto. Acredita-se que tal fato não ocorreu neste trabalho devido ao processo de adição do cavaco.

Tabela 2. Abatimento do tronco cone ('slump test')

Misturas	Abatimento (mm)
Referência	80
CC075	85
CC125	90
CC175	65
CC225	95

Os resultados do ensaio de resistência à compressão, tração e flexão estão dispostos na Tab.3. Os corpos de prova foram retificados para a realização do ensaio.

Tabela 3. Resistência à compressão, tração e flexão

Misturas	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração (MPa)		Resistência à flexão (MPa)	
	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média
Referência	1,05	31,06	0,40	3,89	0,36	4,10
CC075	0,32	37,50	0,44	3,86	0,15	4,91
CC125	0,59	37,34	0,31	3,87	0,19	4,63
CC175	1,53	38,76	0,27	4,44	0,37	4,36
CC225	1,46	37,46	0,13	4,38	0,28	4,69
p	0,0003		0,2446		0,1141	
F	15,4552		1,6171		2,4512	
F _{crítico}	3,4780		3,4780		3,4780	

No ensaio de resistência à compressão o valor $p < \alpha$ comprova que há evidências de que as médias de resistência das misturas são diferentes entre si e pode ser confirmada observando que o valor de $F > F_{\text{crítico}}$. De acordo com o teste de Tukey, a amostra de referência é diferente de todas as outras, no entanto, as misturas com adição não são estatisticamente diferentes entre si. Com base na Tab.3, deduz-se que a resistência dos corpos de prova das misturas com adição de cavacos é maior que a de referência. Sendo o melhor desempenho com a adição de 1,75% de cavacos de aço, CC175 (38,76 \pm 1,53) MPa, que representou um aumento de 24,79% em relação à referência. Não houve redução na resistência. Na pesquisa de [10] a adição de 1,5% de cavacos por peso resultou no aumento de 11,37% de resistência à compressão, mas a adição de 2% resultou no decréscimo de 8,51% em relação à referência. O trabalho de [12] apresentou acréscimo de 24,7% de resistência com o mesmo percentual de adição. [5] notou que à medida que se adicionava cavacos, a resistência à compressão diminuía. Esta divergência entre pesquisas também foi apontada nos estudos de [29], em que houve acréscimo de até 12,89% na resistência, em contraposição com outros autores que apresentaram diminuição após um percentual "ótimo", demonstrando que a inserção de teores mais elevados de aço aumenta levemente a resistência à compressão em relação à referência.

Para a resistência à tração não há evidências estatísticas, ao nível de significância escolhido, que a média de resistência à tração das misturas seja significativa. Não houve diferenças significativas entre as misturas

para resistência à tração na flexão. Contudo, mesmo não havendo resultados significativos observou-se que para a mistura CC075 houve um aumento de 19,66%, em relação à referência. Esse possível aumento pode ser associado à união do cavaco à matriz cimentícia, que conferiu maior rigidez a mistura, além do tipo de aço do cavaco que apresenta uma alta resistência. Na pesquisa de [3], a resistência à flexão aumentou proporcionalmente à concentração de fibras. Já para [12] e [10], a resistência só aumentou até 1,5% de adição de cavacos e diminuiu com a inserção de 2% em peso. Na Fig.4 observa-se as curvas de força × deslocamento dos corpos de prova medianos de cada grupo. Cabe salientar que a zona inicial das curvas corresponde a ajustes entre os roletes de aplicação da carga, de apoio e dos corpos de prova. E, portanto, a aplicação da força se inicia efetivamente aproximadamente nos 0,3 mm de deslocamento.

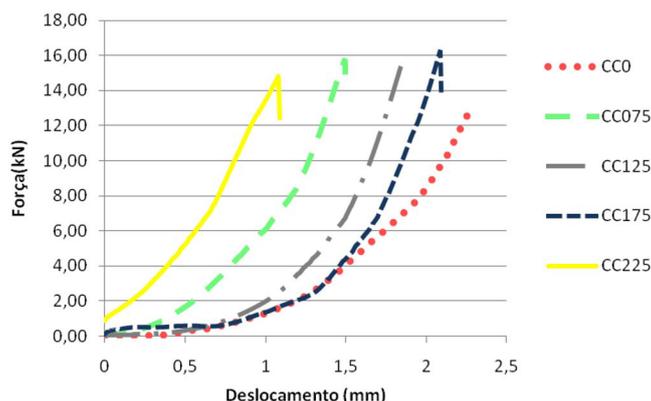


Figura 4. Gráfico de força × deslocamento

A mistura que obteve maior deslocamento (2,26 mm) foi a de referência e resistiu à menor carga, média de 13,95 kN. A mistura CC225 foi a que obteve menor deslocamento (1,09 mm) e resistiu à uma carga, média de 15,95 kN, 14,42% maior que a referência. Para [2], a rápida propagação de fissuras, devido à baixa capacidade da matriz em inibir seu crescimento, é o principal fator que influencia a resistência à tração do material. A energia associada à ruptura da matriz pode ser aumentada pela utilização de fibras, pois estas inibem a propagação de fissuras [1].

Cabe salientar que, neste ensaio, as faces dos corpos de prova utilizados não estavam completamente paralelas entre si, o que pode ter ocasionado descontinuidades nas curvas de força × deslocamento. Um dos roletes utilizados para transferir a carga para o corpo de prova não encostou totalmente na face do corpo de prova. Tal fato pode não ter representado o comportamento real das curvas das amostras. Além das cargas e do valor de deformação, pelo ensaio de tração na flexão consegue-se verificar o tipo de ruptura das amostras. A Fig.5 retrata o momento logo após a ruptura e, conforme pode ser visualizado, há uma mudança na forma de ruptura da mistura CC225 que possui maior adição em relação à referência. O gráfico de resistências à tração na flexão, tração e compressão é apresentado na Fig.6.

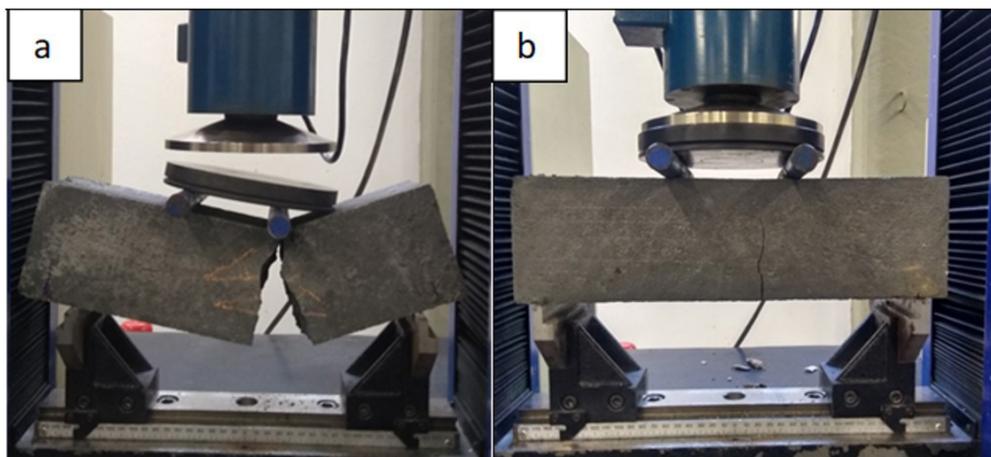


Figura 5. Ruptura à tração na flexão: (a) Referência e (b) mistura com maior adição (CC225)

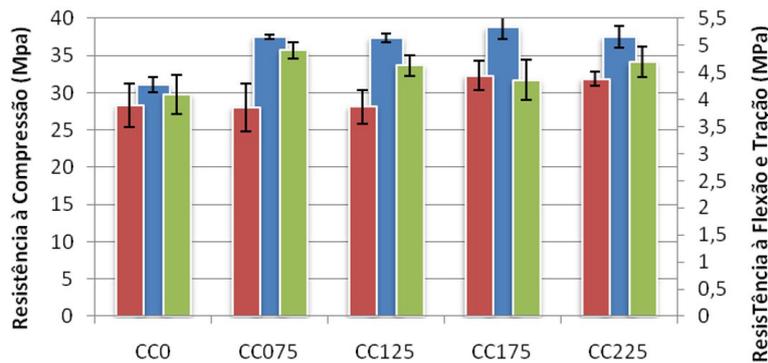


Figura 6 – Resistências à flexão, tração e compressão.

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')	
	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média
Referência	0,53	41,07	2,68	206,53
CC075	1,99	38,96	13,55	281,60
CC125	1,02	39,23	7,14	269,92
CC175	0,88	40,44	6,08	269,92
CC225	0,58	39,86	3,93	265,67
p		0,3803		2,48E-05
F		1,1705		26,8987
F crítico		3,4780		3,4780

Para o ensaio de módulo de elasticidade, o valor $p > \alpha$ comprova que não há evidências de que a média das misturas apresente diferenças significativas e pode ser confirmada observando que o valor de $F < F_{crítico}$. De acordo com [30], a incorporação de fibras em misturas cimentícias promove uma melhora expressiva em diversas propriedades mecânicas, com destaque para a tenacidade à flexão e a resistência à fadiga e ao impacto. 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. A Fig.7 apresenta as deformações (em 'micro strain') em μm e os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade. Segundo a norma, amostras com deformações individuais superiores a 5% da média das deformações devem ser desconsideradas e nova média calculada. O valor de deformação para o CP1 da mistura CC075 apresentou dispersão maior que 5% e este foi descartado. A média apresentada na Tab.4 para este grupo já desconsidera este valor.

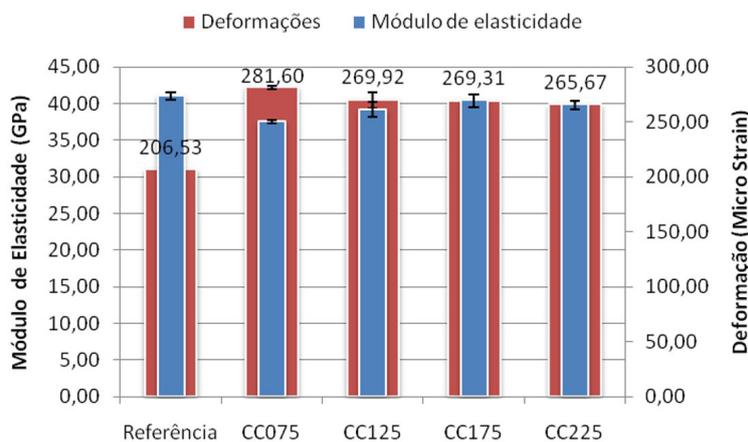


Figura 7. Módulo de elasticidade e deformações

Para todas as misturas há evidências de que as médias de deformação das misturas apresentam diferenças significativas, e de acordo com o teste Tukey, a média de deformação da mistura de referência é diferente significativamente de todas as misturas com adição, mas as misturas com adição não são estatisticamente diferentes entre si. Com base nos resultados, deduz-se que a deformação da mistura CC075 obteve um aumento de 36,35%, a CC125 um incremento de 30,69%, CC175 um acréscimo de 30,40% e a CC225 um aumento de 28,64% em relação à mistura de referência. O aumento da deformação permite ao concreto um comportamento mais dúctil e tenaz, ou seja, permite maior deformação e absorção de energia. O concreto reforçado com fibras apresenta maior ductilidade em relação às matrizes não reforçadas, que se tornam frágeis após a formação de primeira fissura. As fibras proporcionam maior capacidade de absorção de energia, tornando o comportamento do compósito pseudo-dúctil [31], uma vez que a quantidade de deformação permanente que pode ocorrer antes do rompimento é uma medida da ductilidade do material. Em geral, quando a resistência de um material cresce, a ductilidade e a tenacidade diminuem, ou seja, materiais com altas resistências normalmente rompem de maneira brusca [2].

Os corpos de prova envelhecidos na solução de cloreto de sódio foram testados à tração por compressão diametral após conclusão do ciclo e os resultados estão na Tab.5.

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

Misturas	Pré-envelhecimento (MPa)		Pós-envelhecimento (MPa)		Variação
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
Referência	3,89	0,40	4,15	0,27	+6,68%
CC075	3,86	0,44	4,18	0,24	+8,29%
CC125	3,87	0,31	3,81	0,50	-1,55%
CC175	4,44	0,27	3,63	0,25	-18,24%
CC225	4,38	0,13	3,73	0,17	-14,84%

As análises das resistências à tração por compressão diametral para o envelhecimento acelerado foram conduzidas ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), com o intervalo de confiança de 95%, pela ANOVA de duplo fator, sendo eles condição e mistura. Não houve diferenças entre condição, entre misturas e não houve interação.

A retração hidráulica do concreto está disposta na Tab.6. No entanto, devido a impossibilidades laboratoriais o comparador utilizado não continha a precisão recomendada por norma, que é de 0,001 mm, enquanto o comparador utilizado possuía precisão de 0,01 mm. A norma recomenda que as médias sejam exibidas com aproximações de 0,01%. Como o comparador não possui a precisão recomendada, logo não é possível observar grandes mudanças entre as leituras. Segundo [32] a retração é um fenômeno que ocorre na pasta de cimento, sendo que a pasta sofre mais retração que a argamassa e o concreto menos que a argamassa, pois o agregado não sofre retração e tende a contê-la. Tal fato pode ser um fator que contribui para a menor percepção de retração. Outro item que pode ser observado é que na média do grupo CC225 houve expansão do concreto ao invés de retração.

As análises da retração hidráulica do concreto foram feitas pela ANOVA de duplo fator, sendo eles idade e mistura. O resultado se deu significativo para tempo, mas para a mistura não foi significativo. Houve interação significativa, que por sua vez expressa que o efeito do tempo foi diferente entre as misturas.

As médias das profundidades de carbonatação medidas para cada corpo de prova estão expressas na Tab.7. A profundidade de carbonatação teve um desvio padrão alto, devido ao fato de levar em consideração pontos que tiveram maior influência de defeitos de concretagem, como poros, alguns mais profundos e outros mais próximos à superfície. Uma das preocupações em relação à inserção do cavaco na matriz de concreto é que os cavacos podem criar caminhos para entrada da água e do CO_2 para o interior do concreto, aumentando a carbonatação se não estiverem bem aderidos à pasta, e conseqüentemente acelerando o processo de corrosão do aço. O ensaio foi analisado ao nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95% pela ANOVA e não se mostrou significativo.

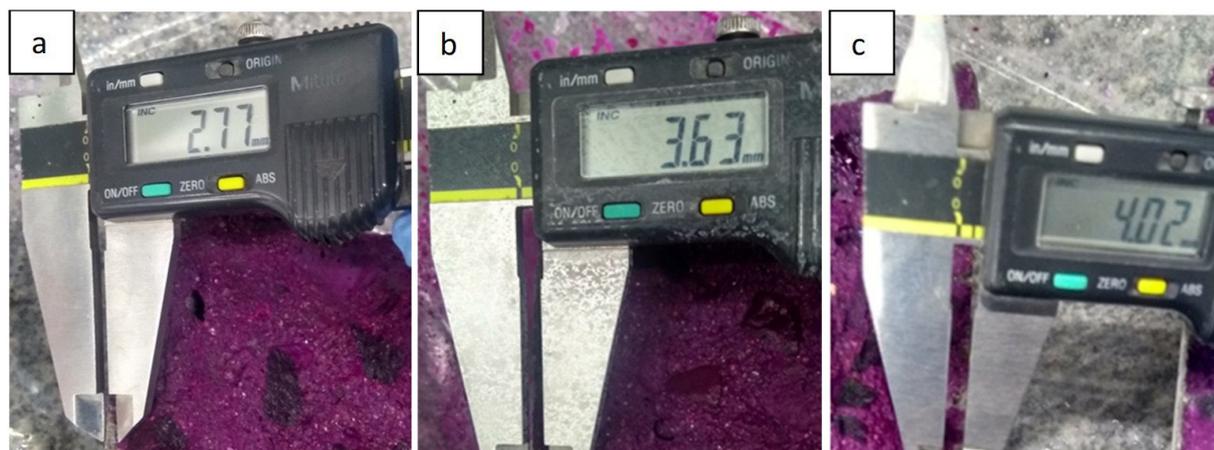
Tabela 6. Retração hidráulica do concreto

Misturas	Retração hidráulica do concreto %			Desvio padrão da média	Média	
	Idade	CP 1	CP2			CP3
Referência	3 dias	-0,004	0,000	0,000	0,002	0,00
	7 dias	0,004	0,006	0,004	0,001	0,00
	28 dias	0,000	-0,002	0,000	0,001	0,00
CC075	3 dias	0,002	-0,004	-0,004	0,003	0,00
	7 dias	0,006	0,004	0,000	0,002	0,00
	28 dias	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
CC125	3 dias	0,000	0,008	-0,002	0,004	0,00
	7 dias	0,004	0,004	0,006	0,001	0,00
	28 dias	0,000	-0,002	0,000	0,001	0,00
CC175	3 dias	0,006	0,006	0,010	0,002	0,01
	7 dias	0,002	0,000	0,000	0,001	0,00
	28 dias	-0,002	-0,002	-0,004	0,001	0,00
CC225	3 dias	0,014	0,010		0,002	0,01
	7 dias	0,012	0,002		0,005	0,01
	28 dias	0,000	-0,002		0,001	0,00

Tabela 7. Profundidade de carbonatação (mm)

Misturas	Média	Desvio padrão da média
Referência	3,70	2,39
CC075	4,09	1,58
CC125	3,04	0,64
CC175	3,65	1,22
CC225	4,02	1,23

Tal resultado mostra que, embora tenha havido diferenças, elas não foram significativas, o que faz acreditar que estas quantidades de adição de cavacos de aço não induzem ao processo de carbonatação do aço. A Fig.8 mostra os resultados das medições de profundidade de carbonatação nas misturas de referência, CC125 e CC225.

**Figura 8.** Pontos de maior carbonatação: (a) mistura Referência; (b) mistura CC125; e (c) mistura CC225

Todas as amostras com cavacos foram submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), para verificar a aderência dos cavacos com a pasta. Na Fig.9 pode ser observado que houve uma boa aderência, nota-se pequena formação de poros e microfissuras no entorno do cavaco, o que caracteriza ser um bom resultado se tratando de um compósito poroso por si só.

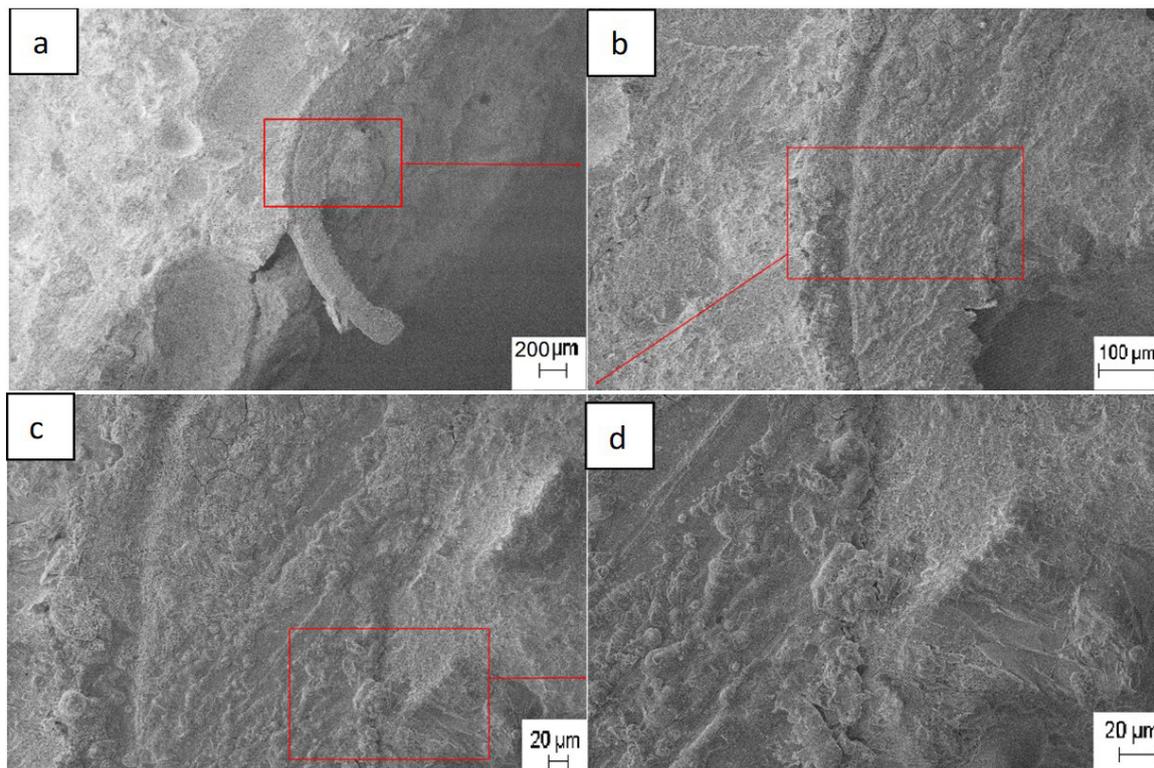


Figura 9. Microscopia eletrônica de varredura: (a) aumento de 70×; (b) aumento de 300×; (c) aumento de 500×; e (d) aumento de 1000×

4. CONCLUSÕES:

Por análise comparativa entre os resultados obtidos foi possível verificar que para a resistência à compressão todas as adições foram positivas, sendo que o melhor desempenho está na mistura CC175, com um aumento de 24,79% em relação à referência. Para a flexão, todas as misturas apresentaram aumento na resistência, no entanto, nenhum dos resultados foi significativo. Na mistura CC225 obteve-se o menor deslocamento e a segunda maior carga, sendo 14,42% maior que a referência. Este comportamento provavelmente se deve à possível adesão dos cavacos com o concreto, conferindo maior rigidez, que permitiu resistir maior carga com um menor deslocamento. Para a tração por compressão diametral, houve aumento na resistência apenas nas misturas CC175 e CC225. No entanto, elas não mostraram diferenças significativas estatisticamente.

A adição de cavacos de aço revelou um aumento na deformação, mas a quantidade não interferiu na mesma. Sendo que a maior deformação encontrada foi para a mistura CC075 com um aumento de 36,35% em relação à referência, o que confere um comportamento pseudo-dúctil ao concreto. A inserção dos cavacos diminuiu a retração do concreto, e possivelmente está ligada à sua expansão, talvez devido ao seu formato espiral. A carbonatação revelou que as misturas apresentaram valores próximos, portanto não é um fator que afetará a durabilidade do concreto.

Ante ao exposto, pode-se afirmar que os cavacos podem ser utilizados visando à melhoria do desempenho do concreto. Contudo, deve-se observar as quantidades utilizadas a fim de melhorar as propriedades mecânicas desejadas. E devido ao fato de ser um resíduo da indústria metalmeccânica, torna-se desejável sua inserção do concreto. Para pesquisa futura, recomenda-se a comparação do desempenho dos CRF com as fibras metálicas tradicionais.

REFERÊNCIAS

- [1] Figueiredo A D, 2011. Concreto reforçado com fibras. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] Mehta P K, Monteiro P J M, 1994. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini.

- [3] Shrivastava P, Joshi D, 2018. Reuse of lathe waste steel scrap in concrete pavements. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 45-54.
- [4] Bae S, Jeon J, Kwon S, Lee H, Kim S, 2014. Characteristics evaluation of lathe scrap for manufacturing fiber reinforced cementitious composites. *Journal of the Korean Society of Disaster Information* 10, 3, 432-441.
- [5] Neeraja D, Arshad S M, Nadaf A K N, Reddy M K, 2017. Evaluation of workability and strength of green concrete using waste steel scrap. *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*, IOP Publishing 032013.
- [6] Barra S R, 2013. *Introdução aos processos de fabricação dos metais*. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte [Notas].
- [7] Machado Á R, Abrão A M, Coelho R T, Da Silva M B, 2015. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3ª ed. São Paulo: Blucher.
- [8] Souza A J, 2011. *Processo de fabricação por usinagem: Parte 1*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul [Notas].
- [9] Santos S C, Sales W F, 2007 *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. São Paulo: Artliber.
- [10] Qureshi Z N, Raina Y M, Ruffaie S M A, 2018. Strength characteristics analysis of concrete reinforced with lathe machine scrap. *International Journal of Engineering Research and General Science* 4, 210-217.
- [11] Aço Brasil, 2022. *Relatório de sustentabilidade 2021*. <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/#dados-do-setor>
- [12] Vijayakumar G, Senthilnathan P, Pandurangan K, Ramakrishna G, 2012. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* 60-66.
- [13] Hoffman I S, 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.
- [14] NBR 16697, 2018. *Cimento Portland. Requisitos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] NBR 16916, 2021. *Agregado miúdo. Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] NBR 16917, 2021. *Agregado graúdo. Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] NBR 17054, 2022. *Agregados. Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] NBR 15900, 2009. *Água para amassamento do concreto*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] Romeiro S B B, 1997. *Química na siderurgia*. Porto Alegre: Biblioteca do Instituto de Química da UFRGS.
- [20] NBR 5738, 2015. *Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [21] NBR 16889, 2020. *Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] NBR 5739, 2007. *Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] NBR 8522-1, 2021. *Concreto endurecido. Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] 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.
- [25] NBR 12142, 2010. *Concreto. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] NM 131, 1998. *Concreto endurecido. Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto*. Rio de Janeiro: Comitê Mercosur de Normalización.
- [27] Brasileiro M I, Rodrigues A W B, Ferreira H S, Oliveira D F, Neves G A, Patrício S M R, Silva M C, Ferreira H C, 2000. *Envelhecimento de argamassas alternativas*. Campina Grande. *Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica* 1-11.
- [28] Lima R C, Helene P R D L, Lima M G, 2001. *Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto*. São Paulo: Universidade de São Paulo 1-16.
- [29] Carvalho A R, Cabral A E B, 2018. *Concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô*. *Matéria* 23, 3.
- [30] Figueiredo A D, 1997. *Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço*. São Paulo: Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.
- [31] 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.
- [32] Souza P A B F D, 2007. *Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural do concreto produzido com resíduo de porcelanato*. Natal: Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.