

Influência da variação de materiais pozolânicos no comportamento mecânico de Engineered Cementitious Composites

Influence of the variation of pozzolanic materials on the mechanical behavior of Engineered Cementitious Composites

Influencia de la variación de los materiales pozolánicos en el comportamiento mecánico de Engineered Cementitious Composites

Recebido: 04/05/2022 | Revisado: 13/05/2022 | Aceito: 22/05/2022 | Publicado: 28/05/2022

Hinoel Zamis Ehrenbring

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0339-9825>
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
E-mail: hzamis@unisinos.br

Gian de Fraga Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4923-4396>
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
E-mail: gianfm@unisinos.br

Fernanda Pacheco

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-491X>
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
E-mail: fernandapache@unisinos.br

Roberto Christ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972>
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
E-mail: rchrist@unisinos.br

Camila Simonetti

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8832-1348>
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: cacaks@hotmail.com

Bernardo Fonseca Tutikian

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1319-0547>
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
E-mail: bftutikian@unisinos.br

Resumo

Os estudos envolvendo o Engineered Cementitious Composites (ECC) foram iniciados há mais de 30 anos, e ainda se encontram em constante desenvolvimento. Estes apresentam propriedades mecânicas superiores quando comparados aos concretos convencionais, principalmente, as características relacionadas ao comportamento à tração. Para tanto, a adição de fibras poliméricas é essencial no desenvolvimento e resposta deste compósito, a fim de que ocorra a microfissuração e, conseqüentemente, a resiliência e ductilidade sejam atingidos. O ECC é constituído, basicamente, por aglomerantes hidráulicos, pozolanas, agregados miúdos, aditivos químicos, fibras poliméricas em teores próximos a 2% (em volume) e baixa relação a/agl. Deste modo, o objetivo deste estudo é identificar o impacto de diferentes materiais pozolânicos (cinza volante e sílica ativa), avaliando o comportamento reológico e mecânico da matriz de ECC. A propriedades mecânicas avaliadas foram resistência à compressão e resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de idade. Foram desenvolvidas 3 matrizes cimentícias para ECC, com diferentes pozolanas e proporções. Observou-se que, as matrizes contendo sílica ativa obtiveram melhores resultados, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, principalmente, devido a sua granulometria e atividade pozolânica.

Palavras-chave: Engineered cementitious composites; Cinza volante; Sílica ativa; Fibras de PVA; Comportamento à tração.

Abstract

Studies involving Engineered Cementitious Composites (ECC) started more than 30 years ago and are still under constant development. ECC has superior mechanical properties when compared to conventional concretes, mainly the characteristics related to tensile behavior. Therefore, the addition of polymeric fibers is essential in the development and response of this composite, so that microcracking occurs and, consequently, resilience and ductility are achieved. The ECC is basically constituted by hydraulic binders, pozzolans, fine aggregates, chemical additives, polymeric fibers in contents close to 2% (by volume) and low water/binder ratio. Thus, the objective of this study is to identify the impact of different pozzolanic materials (fly ash and silica fume), evaluating the rheological and mechanical

behavior of the ECC matrix. The mechanical properties evaluated were compressive strength and flexural tensile strength at 7 and 28 days of age. Three cementitious matrices were developed for ECC, with different pozzolans and proportions. It was observed that the matrices containing silica fume obtained better results, both in the fresh state and in the hardened state, mainly due to their granulometry and pozzolanic activity.

Keywords: Engineered cementitious composites; Fly ash; Silica fume; PVA fibers; Tensile resistance.

Resumen

Los estudios que involucran compuestos cementosos de ingeniería (ECC) comenzaron hace más de 30 años y aún están en constante desarrollo. Estos tienen propiedades mecánicas superiores a los hormigones convencionales, principalmente las características relacionadas con el comportamiento a tracción. Por tanto, la adición de fibras poliméricas es fundamental en el desarrollo y respuesta de este compuesto, de forma que se produzcan microfisuras y, en consecuencia, se consiga resiliencia y ductilidad. El ECC está constituido básicamente por ligantes hidráulicos, puzolanas, agregados finos, aditivos químicos, fibras poliméricas en contenidos cercanos al 2% (en volumen) y baja relación agua/aglutinante. Así, el objetivo de este estudio es identificar el impacto de diferentes materiales puzolánicos (cenizas volantes y humo de sílice), evaluando el comportamiento reológico y mecánico de la matriz ECC. Las propiedades mecánicas evaluadas fueron resistencia a la compresión y resistencia a la tracción por flexión a los 7 y 28 días de edad. Se desarrollaron tres matrices cementosas para ECC, con diferentes puzolanas y proporciones. Se observó que las matrices que contienen humo de sílice obtuvieron mejores resultados, tanto en estado fresco como en estado endurecido, debido principalmente a su granulometría y actividad puzolánica.

Palabras clave: Engineered cementitious composites; Cenizas volantes; Humo de sílice; Fibras de PVA; Resistencia a tracción.

1. Introdução

O *Engineered Cementitious Composites* (ECC) é um compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras poliméricas que apresenta comportamento dúctil, diferente de um material cimentício convencional, como o concreto (Junior & Garcez, 2017). Ou seja, a medida em que este compósito é submetido aos esforços de tração, este apresenta aumento de resistência e deformabilidade equivalente à do aço, caracterizando sua ductilidade (Ehrenbring, 2020). Assim como outros compósitos cimentícios, constitui-se de cimento, materiais pozolânicos, agregados finos, aditivos químicos e fibras. Para o seu desenvolvimento, é comum utilizar as fibras de PVA (Li, 2003). A fibra de PVA é comumente utilizada em pesquisas devido ao seu alto módulo de elasticidade (≈ 41 GPa) e alta resistência à tração (≈ 1600 MPa), bem como a aderência química com a matriz, o que garante uma sinergia entre matriz e reforço. Esta sinergia garante a transferência dos esforços entre as fases. Cabe ressaltar que o ECC não é constituído por agregados graúdos em sua matriz devido ao efeito adverso sobre a diminuição do desempenho do compósito (Rodríguez, 2018).

Segundo Ranade et al. (2014), para que haja melhoria no desempenho à tração e flexão nestes compósitos cimentícios, é comum adotar a inserção de fibras poliméricas em teores equivalentes a 2% em relação ao volume. As melhorias no desempenho são evidenciadas no aumento da ductilidade, tenacidade e resistência à tração do compósito, não havendo mais a fratura frágil. As fibras devem estar distribuídas aleatoriamente na matriz, porém de maneira homogênea, conforme afirmou Costa (2015). Ainda, o autor cita que dependendo da forma como foram colocadas as fibras e dos procedimentos de moldagem e vibração, além da geometria da amostra, pode haver prejuízos nas propriedades do ECC.

Conforme Rodríguez (2018), os concretos convencionais apresentam ruptura frágil visualizada pela curva tensão-deformação, a qual é bilinear (elasto-plástico) até a ruptura acompanhada por uma queda súbita de tensão após o surgimento da primeira fissura. Já os concretos com fibras possuem rupturas pseudo-frágeis, na qual, após o surgimento das primeiras fissuras, tendem a aliviar as tensões suavemente, caracterizando um comportamento *strain-softening*. Já os ECCs, por terem teores elevados de fibras, apresentam elevação da resistência e deformação a cada nova fissura formada, caracterizando o comportamento *strain-hardening* ou também conhecido como ductilidade (Li, 1993).

Então, para que o ECC atinja a ductibilidade, é necessário a implementação de fibras na matriz, que se ligam à matriz cimentícia e, quando ocorre a fissuração da matriz são solicitadas, formaram uma ponte de transferência de tensões reduzindo a concentração dessas tensões nas extremidades das fissuras. Segundo Ramos (2018), as fibras afinam e ocasionam a redução da

velocidade de propagação das fissuras, podendo ser classificadas como microfissuras, uma vez que possuem abertura inferior a 100 microns.

Para a produção deste compósito, geralmente, são necessários maiores consumos de cimento, quando comparados aos concretos convencionais, variando em torno de duas a três vezes a mais (Righi et al., 2014). Segundo Rodríguez (2018), há registros de ECCs que demandaram cerca de 1.000 kg/m³ de cimento para sua produção, além do consumo de 26 kg/m³ de fibras de PVA. Como forma de reduzir a quantidade de cimento, há a possibilidade de usar os materiais cimentícios suplementares, como os materiais pozolânicos (Ehrenbring, 2020; Junior & Garcez, 2017).

Com o intuito de diminuir o consumo de cimento, Li e Yang (2007) e Costa (2015) utilizaram a cinza volante (CV). Segundo Li (2003), a inserção desta pozolana é pertinente para que se obtenha menor impacto ao meio ambiente e maior desempenho em suas propriedades mecânicas, uma vez que a cinza volante reage de forma mais lenta que a hidratação das partículas do clínquer. Também, possui um ganho contínuo da resistência e tenacidade da matriz ao longo do tempo.

Além de cinza volante como material pozolânico, é utilizado para potencializar as propriedades mecânicas e de durabilidade de uma matriz cimentícia, a sílica ativa (SA) (Christ, 2019). De acordo Mehta e Monteiro (2014), os materiais pozolânicos não hidratados podem exercer o efeito filler na mistura, melhorando a zona de interface entre reforço e matriz. Estes autores também afirmam que, além da maior resistência em idades avançadas, a sílica contribui para baixa permeabilidade e maior aderência das fibras à matriz. Também, as pozolanas em geral, podem contribuir na trabalhabilidade da matriz, liberando água anteriormente presa por absorção e entre as partículas, sendo disponível para fluidez da mistura e assim exigindo menos água para hidratação (Hermane et al., 2016).

Ainda, devido à baixa granulometria da sílica ativa, esta dispersa-se facilmente pela matriz, favorecendo a trabalhabilidade do composto (Mehta & Monteiro, 2014). Entretanto, para Pan et al. (2017), deve-se ter atenção a substituição do cimento em excesso por materiais pozolânicos devido ao efeito de diluição do cimento - aumento da relação a/c com a redução do cimento.

Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar inclusão de materiais pozolânicos para a produção de uma matriz de ECC que obtenha propriedades reológicas compatíveis ao cenário regional do estado do Rio Grande do Sul, bem como propriedades mecânicas adequadas. Matrizes de ECC com cinza volante e sílica ativa foram experimentalmente ensaiadas no estado fresco e endurecido, através do índice de consistência e da avaliação das propriedades mecânicas.

2. Programa Experimental

Este trabalho possui um programa experimental estruturado atendendo ao fluxograma apresentado na Figura 1. Foram ensaiadas matrizes de ECC, constituídas com cinza volante em uma proporção e com sílica ativa em duas proporções, nomeadas como ECC-CV1,2 (proporção de 1,2 de cinza volante em relação ao cimento), ECC-SA1,2 (proporção de 1,2 de sílica ativa em relação ao cimento) e ECC-SA0,8 (proporção de 0,8 de sílica ativa em relação ao cimento). Todos os ensaios experimentais foram conduzidos no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em São Leopoldo/RS.

Figura 1 – Fluxograma de etapas da pesquisa.

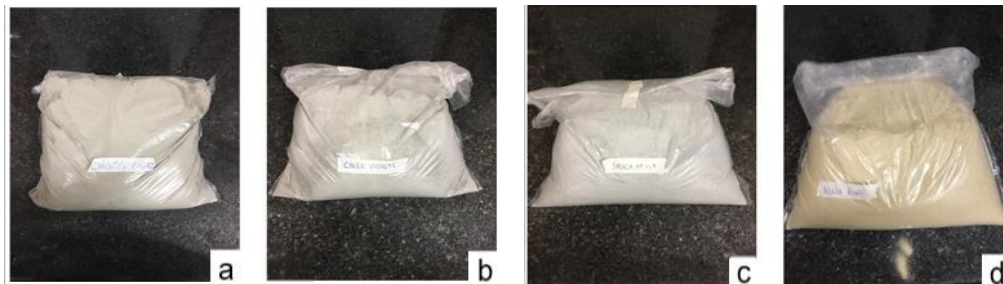


Fonte: Autores (2022).

2.1 Materiais

Para a confecção das matrizes utilizadas para o estudo em questão, foram considerados aglomerantes, agregados, fibras e aditivos químicos. Desse modo, são apresentados os elementos que compuseram as matrizes cimentícias de ECC, sendo apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Materiais utilizados: a) Cimento CP-II-F, b) Cinza Volante, c) Sílica Ativa e d) Areia Fina.

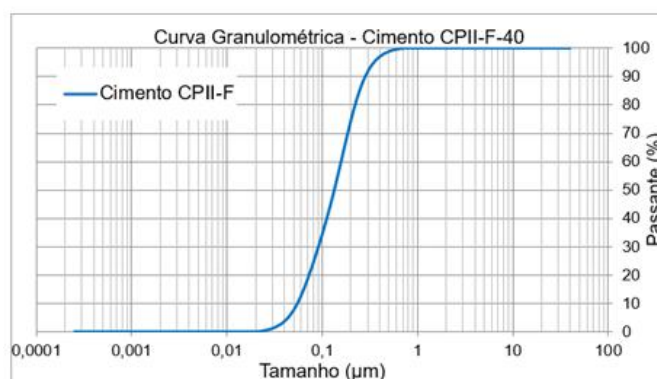


Fonte: Autores (2022).

2.1.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi CP-II-F-40, fabricado pela empresa Votorantim Cimentos. Este material possui baixa granulometria e alta reatividade em idades iniciais. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica do cimento.

Figura 3 - Curva granulométrica do cimento CP II.

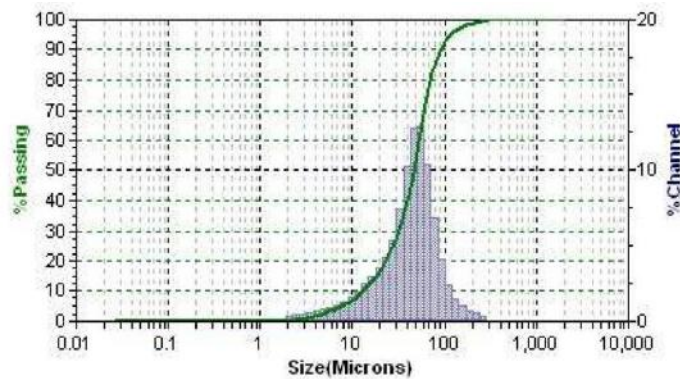


Fonte: Autores (2022).

2.1.2 Cinza Volante

A cinza volante utilizada na pesquisa foi escolhida devido a dois fatores consideráveis, sendo o primeiro devido a disponibilidade na região, oriunda da termelétrica de Candiota. A segunda, deve-se ao fato de a cinza volante ser um aglomerante pozolânico que possibilita o aumento progressivo da resistência mecânica, bem como aumento da sustentabilidade na compósito estuda neste trabalho. Através NBR 16605 (ABNT, 2017), foi possível determinar a massa específica tendo como resultado 2,10 g/cm³. A Figura 4 apresenta a curva granulométrica da cinza utilizada, onde não se realizou processo de moagem para o refinamento da pozolana.

Figura 4 - Curva granulométrica da cinza volante.

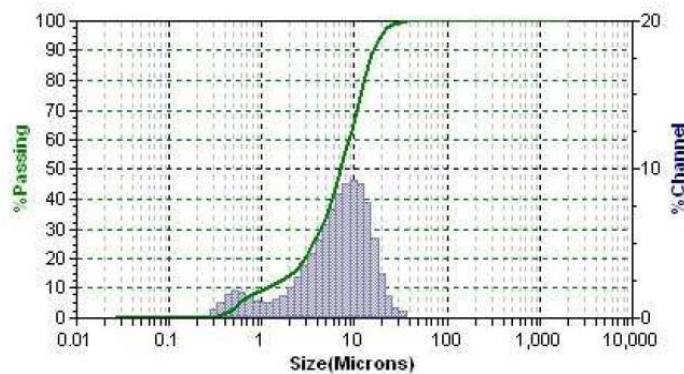


Fonte: Autores (2022).

2.1.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada na pesquisa é de origem da produção de silício metálico, do tipo não densificada, sendo a massa específica da sílica igual a 2,35 g/cm³. Quanto ao diâmetro médio a pozolana apresenta o valor de 0,004 µm, sendo a média de D10, D50 e D90, as métricas mais usadas para descrever as distribuições de tamanho da partícula. A Figura 5 apresenta a curva granulométrica da sílica ativa utilizada.

Figura 5 - Curva granulométrica da sílica ativa utilizada para o desenvolvimento da matriz de ECC.



Fonte: Autores (2022).

A caracterização físico-química da sílica ativa é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização físico-química da sílica ativa.

Características Físicas	Teores
Umidade (%)	2
Densidade aparente	0,375
pH	10
Área específica B.E.T (m ² /kg)	20.000
Estado físico	Sólido
Diâmetro médio (µm)	0,004
Perda ao fogo (%)	6

Fonte: Christ (2019).

2.1.4 Areia

A escolha da areia média natural de rio, como agregado miúdo utilizado na pesquisa, deve-se à facilidade em adquiri-la na região de Porto Alegre. Este agregado foi utilizado pelo melhor fator de dimensão da partícula por ter uma grande influência na matriz cimentícia. De acordo com Ramos (2018), o empacotamento dos grãos na matriz e subsequente, acaba melhorando as propriedades mecânicas devido à diminuição dos vazios internos. Através disso, foi feito a caracterização deste agregado seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo.


Características	Teores
Diâmetro Máximo	0,6 mm
Módulo de Finura	2,18
Massa Unitária	1,58 g/cm ³
Massa Específica	2,6 g/cm ³

Fonte: Autores (2022).

2.1.5 Fibra

A fibra polimérica utilizada no estudo em questão foi a de álcool polivinílico (PVA), as quais são produzidas no Japão. Esta fibra pode proporcionar uma melhor fluidez ao compósito, devido suas propriedades químicas e físicas, além de melhorar o comportamento à tração do ECC. As fibras possuem superfície lisa, rígida e formato reto, sem ancoragem nas extremidades. As propriedades das fibras de PVA são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedade das fibras de PVA utilizadas na pesquisa.

Propriedades	Álcool Polivinílico (PVA)	Imagem
Densidade	1,30 g/cm ³	
Diâmetro	26 µm	
Comprimento	12 mm	
Fator de Forma	231	
Resistência à Tração	1600 MPa	
Módulo de Elasticidade	39 GPa	

Fonte: Autores (2022).

2.1.6 Aditivo Superplastificante

O aditivo químico usado é um redutor de água, conhecido também como superplastificante de terceira geração à base de policarboxilato-poliéteres (PCE). Dessa forma, o mesmo é utilizado também para reduzir o consumo da água de

amassamento. Segundo a fabricante, sua densidade é de 1,12 g/cm³, cor marrom e pH de 6,5.

2.2 Proporção dos Materiais

Conforme já mencionado anteriormente, para o estudo foram avaliadas três misturas de ECC. As proporções entre os materiais tiveram como referência as pesquisas desenvolvidas por Ranade et al (2014) e Li (2003), na qual a composição destas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Proporções de mistura das matrizes de ECC.

Material	Traço Unitário (em massa)		
	ECC-CV1,2	ECC-SAI,2	ECC-SA0,8
Cimento CP II F40	1,0	1,0	1,0
Cinza Volante	1,2	-	-
Sílica Ativa	-	1,2	0,8
Agregado Miúdo	1,2	1,2	1,2
a/alg	0,29	0,29	0,29
Superplastificante	3%	3%	3%
Fibras de PVA (em volume)	2%	2%	2%

Fonte: Autores (2022).

A relação água/aglomerante é igual em todos os traços, sendo 0,29, havendo a adição de 3,0% de aditivo superplastificante em proporção ao cimento. O teor de aditivo foi elevado a fim de manter a trabalhabilidade das misturas. Por fim, a quantidade de fibras de PVA também se manteve igual em todas as matrizes, sendo de 2% em relação ao volume total da mistura. Todos os compósitos foram misturados em uma argamassadeira de movimento planetário com velocidade constante, conforme Figura 6. Após, foi feita a moldagem dos corpos de prova.

Figura 6 - Processo de mistura dos ECCs.



Fonte: Autores (2022).

Para determinar a resistência à compressão dos compósitos, moldou-se corpos de prova cilíndricos seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2016). Os corpos de prova cilíndricos possuíam dimensões de 50 x 100 mm (diâmetro x altura). Para determinar a resistência à tração na flexão, foram moldadas placas finas com dimensões de 70 x 400 x 20 mm (largura x comprimento x espessura). Também, para a mesma propriedade, moldaram-se amostras prismáticas. Para a confecção das amostras prismáticas, seguiu-se as diretrizes do documento técnico da JSCE 82 (2008), no qual é apresentado o modo de elaboração da matriz, bem como orientações sobre dimensões, cura e ensaios. As condições de cura de todos os corpos de prova seguir as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016). Na Figura 7 são apresentados os exemplares após a

moldagem.

Figura 7 - Processo de mistura dos ECCs.

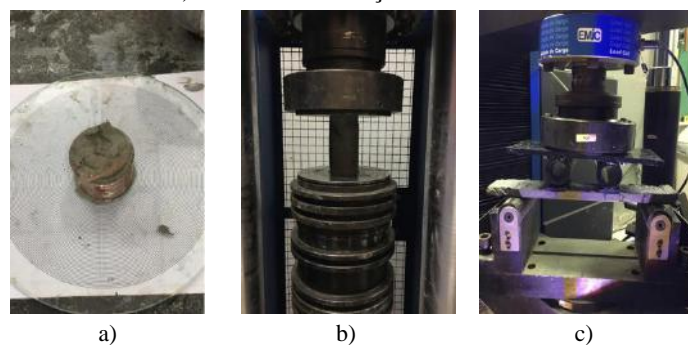


Fonte: Autores (2022).

2.3 Método de Ensaio

As matrizes de ECC foram avaliadas tanto no estado fresco, através do índice de consistência, quanto no estado endurecido, resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão. Para a análise do índice de consistência da matriz (espalhamento), foi utilizada a NBR 15306-1 (ABNT, 2005). O objetivo deste ensaio é a verificação da consistência da matriz frente a diferença entre os grãos das pozolanas utilizadas, conforme também a proporção utilizada. A fim de realizar ensaios de resistência à compressão axial, seguiu-se os parâmetros estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). E, com o intuito de realizar os ensaios das amostras de resistência a tração na flexão, seguiu-se os parâmetros estabelecidos pelo documento técnico da JSCE 82 (2008). A Figura 8 ilustra a realização dos ensaios.

Figura 8 - Métodos de ensaio utilizados: a) Índice de consistência, b) Resistência à compressão e c) Resistência à tração na flexão.



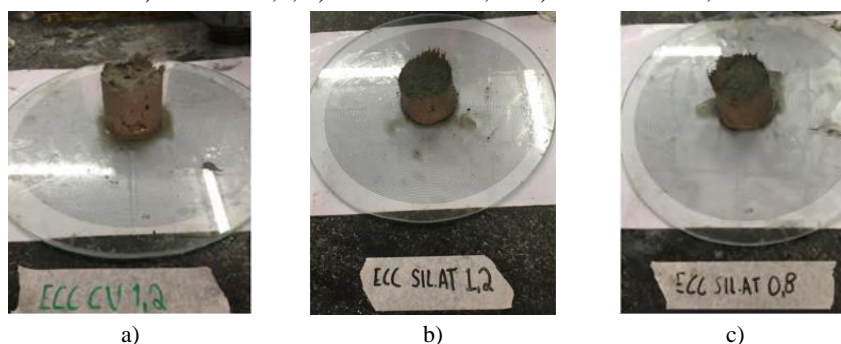
Fonte: Autores (2022).

3. Resultados e Discussão

3.1 Índice de Consistência

O índice de consistência realizado nos três compostos é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Aspecto dos compósitos após realização do ensaio de índice de consistência:
 a) ECC-CV1,2, b) ECC-SILAT1,2 e c) ECC-SILAT0,8.



Fonte: Autores (2022).

Com base na Figura 9, precebe-se que entre as três matrizes utilizadas todas obtiveram uma consistência muito semelhante sem que houvesse espalhamento da matriz. Por esse motivo, não foi possível a medição horizontal através dos círculos concêntricos.

Pesquisadores indicam que a inserção de fibras em uma matriz cimentícia afetará suas propriedades, em especial o estado fresco e a consistência, já que as fibras dispersas na matriz atuam restringindo a mobilidade da mistura. Com o acréscimo de fibras, a área superficial dos materiais aumenta necessitando de mais água na mistura para lubrificar mais as partículas, diminuindo a viscosidade (Ehrenbring, 2020; Mehta & Monteiro, 2014; Triacca, 2019).

3.2 Resistência à Compressão Axial

Os corpos de prova submetido aos ensaios de resistência à compressão axial foram rompidos aos 7 e 28 dias e seus resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de resistência à compressão axial dos compósitos desenvolvidos (em MPa).

Compósito	Idade de análise (dias)			
	7		28	
	f_c	$f_{c,med}$	f_c	$f_{c,med}$
ECC-CV1,2	28,6	22,4±6,2	25,6	29,8±4,2
	16,2		34,0	
ECC-SA1,2	58,7	55,0±3,8	69,5	63,5±6,1
	51,2		57,4	
ECC-SA0,8	67,5	65,6±6,1	73,8	68,4±5,4
	63,6		63,0	

Fonte: Autores (2022).

Através dos resultados obtidos, é possível notar que a matriz de ECC-CV1,2 obteve resultados visivelmente inferiores nas duas idades avaliadas frente as outras duas matrizes de ECC com sílica ativa. Aos 28 dias, a tipologia ECC-CV1,2 apresentou resistência à compressão cerca de 53% inferior a ECC-SA1,2 e 56% inferior a ECC-SA0,8.

Este fato pode estar diretamente relacionado ao empacotamento dos grãos da matriz. Segundo Christ (2019), a modificação no empacotamento das partículas pelo fato dos materiais não possuírem a mesma distribuição granulométrica ou pela utilização de diferentes grãos, pode prejudicar a capacidade da mistura. Como a sílica ativa possui uma granulometria inferior a cinza volante, ocasiona a melhoria do empacotamento dos grãos e consequentemente melhoria na capacidade de resistência mecânica da matriz. Ainda, a amostra ECC-CV1,2 apresentou a matriz com uma consistência viscosa logo após a acréscimo das fibras, dificultando a moldagem dos corpos de prova, outro fator que pode ter influenciado nos resultados de

resistência à compressão dessa tipologia.

3.3 Resistência à Tração na Flexão

Os corpos de prova submetido aos ensaios de resistência à tração na flexão foram rompidos aos 7 e 28 dias e seus resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de resistência à tração na flexão dos compósitos desenvolvidos (em MPa).

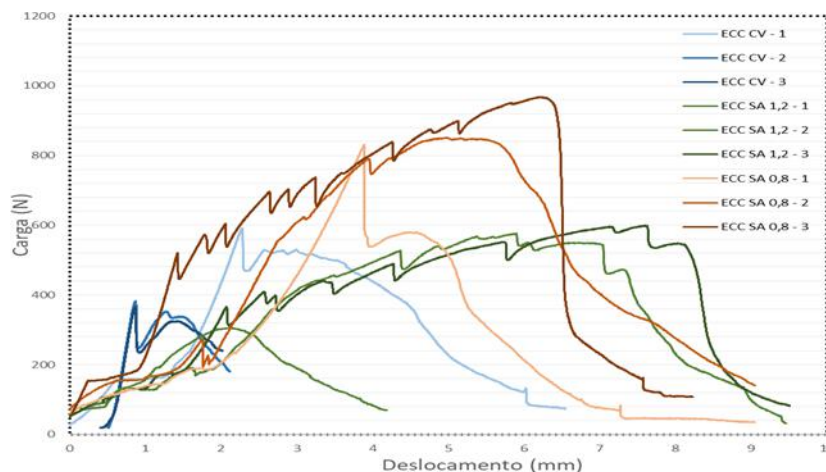
Compósito	Idade de análise (dias)			
	7		28	
	f_t	$f_{t,med}$	f_t	$f_{t,med}$
ECC-CV1,2	6,3	4,8±1,1	8,9	7,6±1,1
	4,1		6,7	
	3,9		7,3	
ECC-SA1,2	6,2	5,3±1,4	8,5	8,5±0,9
	3,3		7,6	
	6,4		9,4	
ECC-SA0,8	8,9	8,5±0,7	11,3	11,5±1,2
	9,1		12,7	
	7,5		10,4	

Fonte: Autores (2022).

Através dos resultados obtidos, é possível observar que a matriz de ECC-CV1,2 obteve resultados inferiores nas duas idades avaliadas frente as outras duas matrizes de ECC com sílica ativa. Aos 28 dias, a tipologia ECC-CV1,2 apresentou resistência à tração na flexão cerca de 10% inferior a ECC-SA1,2 e 33% inferior a ECC-SA0,8. Na propriedade mecânica de resistência à tração na flexão não se observou alta diferença de resultados entre a matriz com cinza volante e com sílica ativa, como nos resultados obtidos para resistência à compressão, uma vez que a utilização da fibra de PVA atua intensamente em qualquer uma das matrizes frente à fissuração.

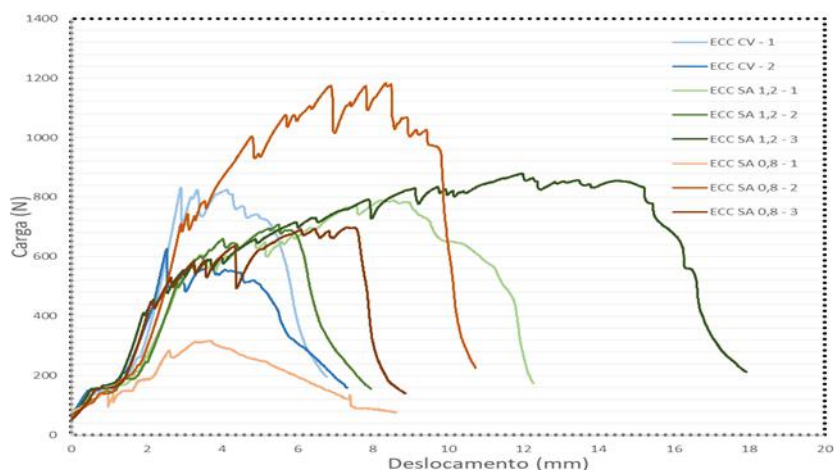
Ainda, é possível notar que entre as matrizes de ECC com utilização de sílica ativa, a ECC-SA0,8 apresentou os melhores resultados à tração na flexão. Nos ensaios em laboratório, foi possível acompanhar a deformação da amostra. As Figuras 10 e 11 apresentam as curvas de comportamento (carga *versus* deslocamento) dos corpos de prova ensaiados aos 7 e aos 28 dias, respectivamente.

Figura 10 - Curvas do comportamento dos compósitos à tração na flexão – 7 dias.



Fonte: Autores (2022).

Figura 11 - Curvas do comportamento dos compósitos à tração na flexão – 28 dias.



Fonte: Autores (2022).

Em relação as amostras ensaiadas aos 7 dias, é possível identificar que a matriz ECC-SA0,8 possui, de forma geral, um melhor comportamento frente a deformação relacionando com o desempenho após a primeira fissuração, pois apresentou menores deslocamentos para maiores cargas. Essa tendência de comportamento é compatível com os valores finais obtidos na Tabela 6, aos 7 dias, em que ECC-SA0,8 apresentou o maior valor médio de resistência à tração na flexão frente aos compósitos desenvolvidos.

De acordo com as curvas ilustradas na Figura 11, para as amostras ensaiadas aos 28 dias, também é possível identificar que as curvas das matrizes com sílica ativa apresentaram melhor desempenho frente a microfissuração, pois apresentaram menores deslocamentos para maiores cargas. Essa tendência de comportamento é ratificada pelos valores finais obtidos na Tabela 6, aos 28 dias, em que a tipologia ECC-SA apresentou maiores valores médios de resistência à tração na flexão frente ao compósito ECC-CV.

4. Considerações Finais

Este trabalho teve um viés experimental ensaiando três matrizes elaboradas com duas diferentes pozolanas e duas diferentes proporções de mistura. Todas as matrizes apresentaram em seus traços a mesma quantidade de fibras de PVA em volume de 2%. Ensaios foram realizados tanto no estado fresco quanto endurecido.

O ensaio de índice de consistência, no estado fresco, apresentou resultados semelhantes entre as matrizes. Entretanto, a matriz ECC-CV1,2 apresentou maior dificuldade de moldagem e de realização do abatimento, fato que pode ter ocasionado falhas na moldagem dos corpos de prova, impactando diretamente na aferição das propriedades mecânicas.

Ao avaliar a resistência à compressão axial das amostras, percebeu-se que os traços moldados com sílica ativa resultaram em valores maiores quando comparados ao traço com cinza volante. Esta mesma observação repetiu-se nos ensaios de tração na flexão, em que as amostras com sílica ativa apresentaram melhores resultados que as amostras elaboradas com cinza volante.

O melhor desempenho da sílica ativa frente à cinza volante pode ser justificado pela melhor consistência no estado fresco, observada no ensaio de índice de consistência, e consequentemente pela maior facilidade de moldagem dos corpos de prova. Em complemento, sabe-se que a sílica ativa possui granulometria inferior a cinza volante, o que ocasiona a melhoria do empacotamento dos grãos e da capacidade de resistência mecânica da matriz.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo de dosagem de aditivo superplastificante para matrizes

de ECC com cinza volante, de forma a qualificar o desempenho desse tipo de matriz no estado fresco. E também, ampliar a gama de percentuais de proporção de sílica ativa e de cinza volante em relação ao cimento, de forma a buscar um traço otimizado para o uso do ECC em larga escala.

Referências

- ABNT NBR 15306-1. (2005). *Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 16605. (2017). *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 16916. (2021). *Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 16972. (2021). *Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 5738. (2016). *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 5739. (2018). *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR NM 248. (2003). *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Christ, R. (2019). *Preposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)* (Tese de Doutorado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil.
- Costa, F. B. P. (2015). *Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Ehrenbring, H. Z. (2020). *Desenvolvimento de Engineered Cementitious Composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização* (Tese de Doutorado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil.
- Hermane, A., Langaros, A., Silva, H. L., & Klein, S. (2016). Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016. doi: 10.1590/S1983-41952016000100004
- Japan Society of Civil Engineers, Series 82. (2008). *Recommendations for desing and construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*. Toquio, Japan: JSCE.
- Junior, A. L. F.; Garcez, M. R. (2017). Avaliação da resistência a fadiga dos Engineered Cementitious Composites (ECC) reforçados com fibra de polipropileno e produzidos com adição de cinza de casca de arroz. *Revista Tecnol-Lógica*, v. 21, p. 116-124. doi: 10.17058/tecnolog.v21i2.9336
- Li, V. C. (1993). From Micromechanics to structural engineering - The design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Journal of Structural Mechanics, Earthquake and Engineering*, vol. 10, n. 2, pp. 37-48. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2027.42/84735>
- Li, V. C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 3, p. 215-230. doi: 10.3151/jact.1.215
- Li, V. C., & Yang, E. (2007). Self healing in concrete materials. In S. van der Zwaag (Coord.), *Self healing materials* (Cap. 33, pp. 161-193). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-6250-6_8
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto.
- Pan, Z., Tao, Z., Murphy, T., & Wuhrer, R. (2017). High temperature performance of mortars containing fine glass powders. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 16-26. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.003
- Ramos, T. R. (2018). *Desempenho físico e mecânico de painéis de fachada pré-fabricados em ECC com uso da fibra PVA* (Monografia de Graduação). Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, RS, Brasil.
- Ranade, R., Zhang, J. Lynch, J. P., & Li, V. C. (2014). Influence of micro-cracking on the composite resistivity of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Research*, v. 58, p. 1-12. doi: 10.1016/j.cemconres.2014.01.002
- Righi, D. P., Costa, F. B. P., Stein, K. J., Graeff, A. G., & Silva Filho, L. C. P. (2014). Compósitos cimentícios super deformáveis com a utilização de cinza de casca de arroz e fibra de polipropileno. *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto*. Natal, RN, Brasil, 56°.
- Rodríguez, C. A. M. (2018). *Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (Engineered Cementitious Composites) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Triacca, D. (2019). *Análise comparativa à tração de Engineered Cementitious Composites (ECC) com diferentes tipos e teores de fibras poliméricas* (Monografia de Graduação). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil.