CAPÍTULO 36 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/vzfk7s82
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/s4xns984

ESTUDO DA REOLOGIA E TRABALHABILIDADE DO ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

Débora Pedroso Righi[1]*, Thiago Favarini Beltrame[2], Luiz Carlos Pinto da Silva Filho[3]
*Autor de contato: righi.p.debora@gmail.com
[1] Departamento de Engenharia Civil, LEME - UFRGS, Porto Alegre, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade FTEC, Porto Alegre, Brasil
[3] Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

O Engineered Cementitious Composite (ECC) é um tipo especial de compósito a base de cimento, reforçado com fibras, que apresenta alto desempenho mecânico e de durabilidade, acompanhado do controle da fissuração. Sua principal característica é a elevada ductilidade, devido à capacidade que tem de gerar fissuração múltipla sob solicitações de carregamento. Neste intuito, fibras de polipropileno têm sido utilizadas em conjunto com a cinza da casca de arroz (CCA), visando a confecção de misturas que sejam mais viáveis economicamente e ambientalmente sustentáveis. O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo de misturas de (ECC) com fibras de polipropileno e elevados teores de CCA, sob aspectos reológicos e mecânicos. Esta avaliação visa compreender as características deste compósito, com intuito de estabelecer a melhor aplicabilidade deste material na construção civil e infraestrutura. Nesta pesquisa os ECCs foram obtidos em porcentagens de 30%, 50% e 70% de substituição em massa do cimento por CCA sem controle de queima, denominada neste estudo de CCA residual. Foram realizados ensaios reológicos da matriz cimentícia por meios de tensão de escoamento e viscosidade plástica e ensaio mecânico de flexão á 4 pontos. Os resultados obtidos indicaram que o traço com 50 % foi o que apresentou melhores resultados em todos os parâmetros estudados.

Palavras-chave: ECC; cinza de casca de arroz; durabilidade.

ABSTRACT

Engineered Cementitious Composite (ECC) is a special type of fiber-reinforced cement-based composite that exhibits high mechanical and durability performance, together with crack control. Its main characteristic is high ductility, due to its ability to develop multiple cracking under loading conditions. With this objective, polypropylene fibers have been used together with rice husk ash (RHA) in order to produce mixtures that are more economically viable and environmentally sustainable. The main objective of this study was to investigate ECC mixtures with polypropylene fibers and high contents of RHA, considering both rheological and mechanical aspects. This evaluation aims to understand the characteristics of this composite in order to establish the best applicability of this material in civil construction and infrastructure.In this research, ECC mixtures were produced with 30%, 50%, and 70% replacement of cement by mass with uncontrolled-burn rice husk ash, referred to in this study as residual RHA. Rheological tests of the cementitious matrix were performed by measuring yield stress and plastic viscosity, and mechanical performance was evaluated through four-point bending tests. The results indicated that the mixture with 50% replacement presented the best performance for all studied parameters.

Keywords: ECC; rice husk ash; pavement durability.

1. INTRODUÇÃO

Na última década, grandes avanços foram realizados com relação aos Engineered Cementitious Composites (ECC). O ECC é uma classe de compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (HPFRCC), que apresenta alta ductilidade e resistência à tração, com adição de 2% de fibra (LI, 2007; RIGHI et al., 2017).

O diferencial do ECC é apresentar comportamento de endurecimento por deformação (*strain-hardening*), por meio do desenvolvimento de múltiplas microfissuras, cuja abertura é autocontrolada, resultando em tenacidade à fratura semelhante à de ligas de alumínio. Esses compósitos foram desenvolvidos para aplicações que demandam alta ductilidade, como estruturas localizadas em regiões sujeitas a terremotos e aquelas expostas a ambientes agressivos. Essas características permitem classificar esse compósito como superior ao concreto convencional sob solicitações severas (ZHANG; ZHANG, 2018).

A deformação desses compósitos possui uma capacidade na faixa de 3-5%, cerca de 300 a 500 vezes a mais que o concreto e o concreto reforçado com fibras (FRC). Alguns estudos já demonstram experimentalmente a utilização desse material em elementos estruturais tais como vigas (LI e WANG, 2002), pilares (FISCHER e LI, 2002), paredes (KESNER e BILLINGTON, 2002) e ancoragem estrutural (PARRA-MONTESINOS e WIGHT, 2000).

O ECC já supera elementos estruturais convencionais, como o concreto armado, em termos de capacidade de carga, deformabilidade e capacidade de absorção de energia sob condições de carregamento monotônico e cíclico (MA et al., 2021).

A capacidade de produzir ECC em escala comercial, com propriedades mecânicas consistentes, é crucial para a aceitação desse material de construção em diversas aplicações estruturais. A hipótese é que a variação na resistência à tração do ECC se deve, principalmente, à influência da reologia durante a mistura dos materiais, a qual rege o comportamento mecânico do compósito. Notavelmente, a maioria dos ECCs desenvolvidos no meio acadêmico internacional utiliza fibras curtas de PVA distribuídas aleatoriamente, com uma fração volumétrica de 2%. Durante a mistura do ECC, as fibras são adicionadas à matriz cimentícia (cimento, cinza volante, areia, água e aditivo) até que a mistura adquira o aspecto de uma argamassa reforçada com fibras (ZHANG; ZHANG, 2018; FEI et al., 2021).

Os detalhes de processamento, como tipo de misturador, velocidade de mistura, tempo e sequência, e a experiência da mão de obra podem influenciar as propriedades reológicas da matriz cimentícia do ECC (ECC antes da adição de fibras) e afetar fortemente a uniformidade de dispersão de fibra, distribuição de tamanho dos poros de ar aprisionados na matriz e as propriedades de ligação na fibra / matriz no estado endurecido.

Adicionalmente, embora 2% de fibras de PVA são comumente usadas para misturas de ECC, os materiais da matriz de diferentes lugares ou escolhidos para funções específicas, por exemplo, alta resistência inicial, pode levar a alterações nas propriedades reológicas e na microestrutura do ECC devido a mudanças plausíveis no tamanho de grão de partícula e a absorção de água (LI e LI, 2013).

Para que este tipo de compósito seja utilizado em escala comercial é primordial garantir a repetibilidade do comportamento mecânico e principalmente garantir uma trabalhabilidade adequada para que possa ser realizada a moldagem dos elementos estruturais semelhante ao

concreto convencional. No Brasil, o ECC está sendo estudado com o uso da fibra de polipropileno e o uso da cinza de casca de arroz em sua matriz cimentícia e há poucos estudos sobre as propriedades reológicas desse material visando obter diferentes trabalhabilidades para diferentes aplicações. Assim este estudo visa estudar a viscosidade plástica e parâmetros mecânicos do ECC com materiais brasileiros para nortear as possíveis aplicações deste material na construção civil brasileira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os principais constituintes da matriz de ECC são cimento Portland CP-V, areia fina, cinza de casca de arroz, água e aditivo superplastificante. Para a produção dos compósitos foi utilizado cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial), apresentando massa específica de 3,11 g/cm³, diâmetro médio de partículas de 9,65 µm e perda ao fogo de 3,06%. A areia empregada é de origem natural, de natureza quartzosa, com massa específica de 2,52 g/cm³, módulo de finura de 0,67 e diâmetro máximo de 0,3 mm.

No estudo também foi utilizado um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico, conhecido por sua elevada eficiência na redução do teor de água quando comparado a aditivos convencionais.

Para o reforço da matriz cimentícia do ECC foram incorporadas fibras de polipropileno, escolhidas por seu baixo custo e por apresentarem propriedades específicas relacionadas à sua cadeia polimérica, a qual influencia diretamente sua resistência e comportamento mecânico. O polipropileno é um material plástico inodoro, incolor e atóxico, com densidade de 900 kg/m³. Neste experimento foi adotado um teor de 2% de fibras de polipropileno em relação ao volume total do compósito, com alta tenacidade, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da Fibra de Polipropileno

Características	
Densidade (g/cm³)	0,91
Comprimento (mm)	10,00
Diâmetro (µm)	12,00
Resistência à Tração (MPa)	850,00
Alongamento na Ruptura (%)	21,00

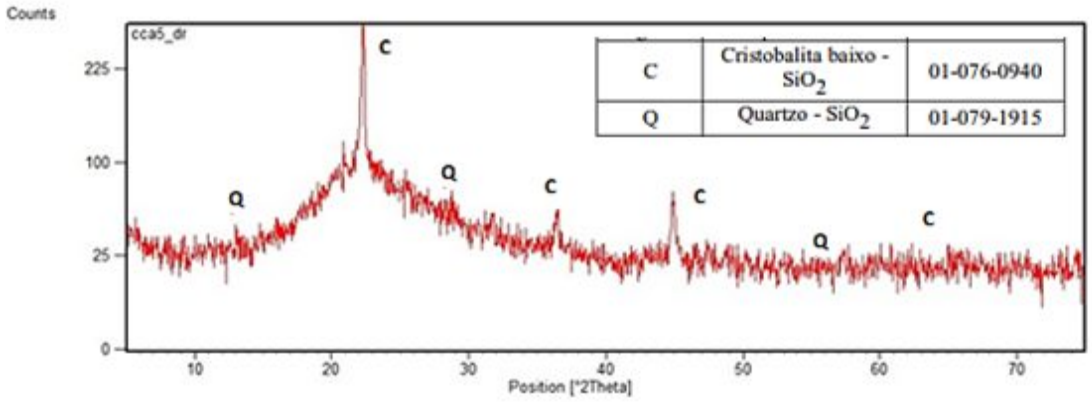
Fonte: os autores.

A cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho é proveniente da queima sem controle de temperatura, sendo empregada como combustível no processo de parboilização dos grãos de arroz. Esse processo de combustão ocorre de forma rápida em fornalhas com grelha, gerando como resíduo uma cinza de coloração predominantemente preta ou cinza-escura.

Para possibilitar sua utilização como substituição parcial do cimento na produção dos ECCs, a cinza passou por um processo de redução granulométrica por meio de moagem durante 8 horas em moinho de bolas. O equipamento utilizado possui dimensões de 310 mm de altura e 275 mm de diâmetro, contendo 75 esferas de moagem com 38 mm de diâmetro.

A Tabela 2 apresenta as características físicas e químicas da cinza de casca de arroz utilizada neste estudo após o processo de moagem, enquanto a Figura 1 mostra o difratograma correspondente ao material empregado.

Figura 1 – Difratograma da cinza de casca de arroz



Fonte: os autores.

Tabela 2 – Propriedades químicas e físicas da CCA

Composição Química (%)	CCA
SiO_2	65,83
K_2O	1,07
CaO	0,44
P_2O_5	0,33
Fe_2O_3	0,34
MnO	0,27
SO_3	0,05
Al_2O_3	0,06
MgO	0,08
CO_2	31,33
Massa específica (g/cm³)	2,06
Tamanho médio do grão (µm)	3,59
Perda ao fogo (%)	13,99
Atividade pozolânica (%)	162,48

Fonte: os autores.

2.2 Mistura e moldagem dos corpos-de-prova

A mistura dos materiais do ECC foi realizada em um misturador mecânico planetário, específico para argamassas, com capacidade de 2 litros. Inicialmente, os materiais secos (cimento, areia e CCA) foram colocados no misturador e homogeneizados até a obtenção de uma mistura de pós uniforme. Em seguida, procedeu-se à adição da água de amassamento e do aditivo superplastificante.

A pasta obtida nesta etapa de mistura é extremamente fluida e foi utilizada para o ensaio de viscosidade plástica. Para os ensaios mecânicos, foram adicionadas fibras à mistura, sendo necessários 3 minutos de rotação em velocidade elevada para a completa dispersão das fibras.

2.3 Programa experimental

Neste programa experimental foram avaliadas nove misturas de ECC, considerando três níveis de substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz proveniente de queima sem controle de temperatura, nos teores de 30%, 50% e 70%. As proporções das misturas de ECC com a incorporação da cinza de casca de arroz (CCA) residual estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dosagem dos Traços Estudados

Nomenclatura	Descrição	CP-V	CCA	Areia Fina	Fibra PP	Aditivo	Água
30ECC	30% de CCA	747,29	295,27	738,19	18	5,90	435,04
50ECC	50% de CCA	566,47	476,09	714,14	18	5,71	476,09
70ECC	70% de CCA	397,06	645,50	691,61	18	5,53	533,00

Fonte: os autores.

Com o objetivo de minimizar a baixa trabalhabilidade do ECC contendo cinza de casca de arroz residual, realizou-se inicialmente um estudo da reologia das misturas com CCA nos três teores de substituição indicados na Tabela 3 deste estudo. Para isso, foram conduzidas análises reológicas e de trabalhabilidade tanto da matriz cimentícia sem a presença de fibras quanto do compósito reforçado com fibras.

Para obter diferentes níveis de trabalhabilidade, foi proposta a variação do teor de aditivo superplastificante em diferentes intervalos. Esses intervalos foram definidos com o intuito de identificar possíveis efeitos mais sensíveis sobre os parâmetros de projeto que influenciam o comportamento no estado fresco, bem como as propriedades reológicas e mecânicas dos compósitos (Tabela 4).

Tabela 4 – Nomenclatura dos traços adotados

Denominação	Código
30ECC com proporção de aditivo 0,6%	30ECC-0,6
50ECC com proporção de aditivo 0,6%	50ECC-0,6
70ECC com proporção de aditivo 0,6%	70ECC-0,6
30ECC com proporção de aditivo 0,7%	30ECC-0,7
50ECC com proporção de aditivo 0,7%	50ECC-0,7
70ECC com proporção de aditivo 0,7%	70ECC-0,7
30ECC com proporção de aditivo 0,8%	30ECC-0,8
50ECC com proporção de aditivo 0,8%	50ECC-0,8
70ECC com proporção de aditivo 0,8%	50ECC-0,8

Fonte: os autores.

Com o objetivo de avaliar o comportamento reológico das misturas de ECC, foram realizados ensaios para determinação da viscosidade plástica e do torque, utilizando-se o modelo de Bingham, amplamente empregado para a determinação dos parâmetros reológicos — tensão de escoamento e viscosidade plástica — de argamassas e concretos.

A viscosidade plástica foi determinada por meio de um viscosímetro rotacional cilíndrico concêntrico de paredes lisas (Brookfield DV-II + Pro), operando a uma temperatura de 23 ± 2 ºC. A viscosidade da matriz cimentícia do ECC foi medida em diferentes velocidades de rotação, variando de 0 a 100 rpm, o que corresponde a uma taxa de cisalhamento de aproximadamente

34 s^{-1}. Posteriormente, a velocidade de rotação foi gradualmente reduzida de 100 para 0 rpm. Durante o ensaio, as amostras foram submetidas à tensão de cisalhamento por um período de 20 segundos em cada taxa de cisalhamento estabelecida.

Para o ensaio mecânico foi realizado o ensaio de flexão à quatro pontos. Baseado em Magalhães (2010), o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 – Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, realizados a quatro pontos. Os corpos de prova têm dimensões de 300 mm x 70 mm x 15 mm onde a carga aplicada concentra-se igualitariamente dividida entre os dois terços do vão, a uma distância de 77 mm dos apoios e o vão possuir 231 mm de distância entre os apoios. O mesmo possui dois LVDTs com comprimento de 10 mm, para medir deslocamento do corpo de prova, um posicionado na vertical e outro na horizontal. A velocidade adotada no carregamento foi de 1,2 mm/minuto.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Viscosidade Plástica e Torque

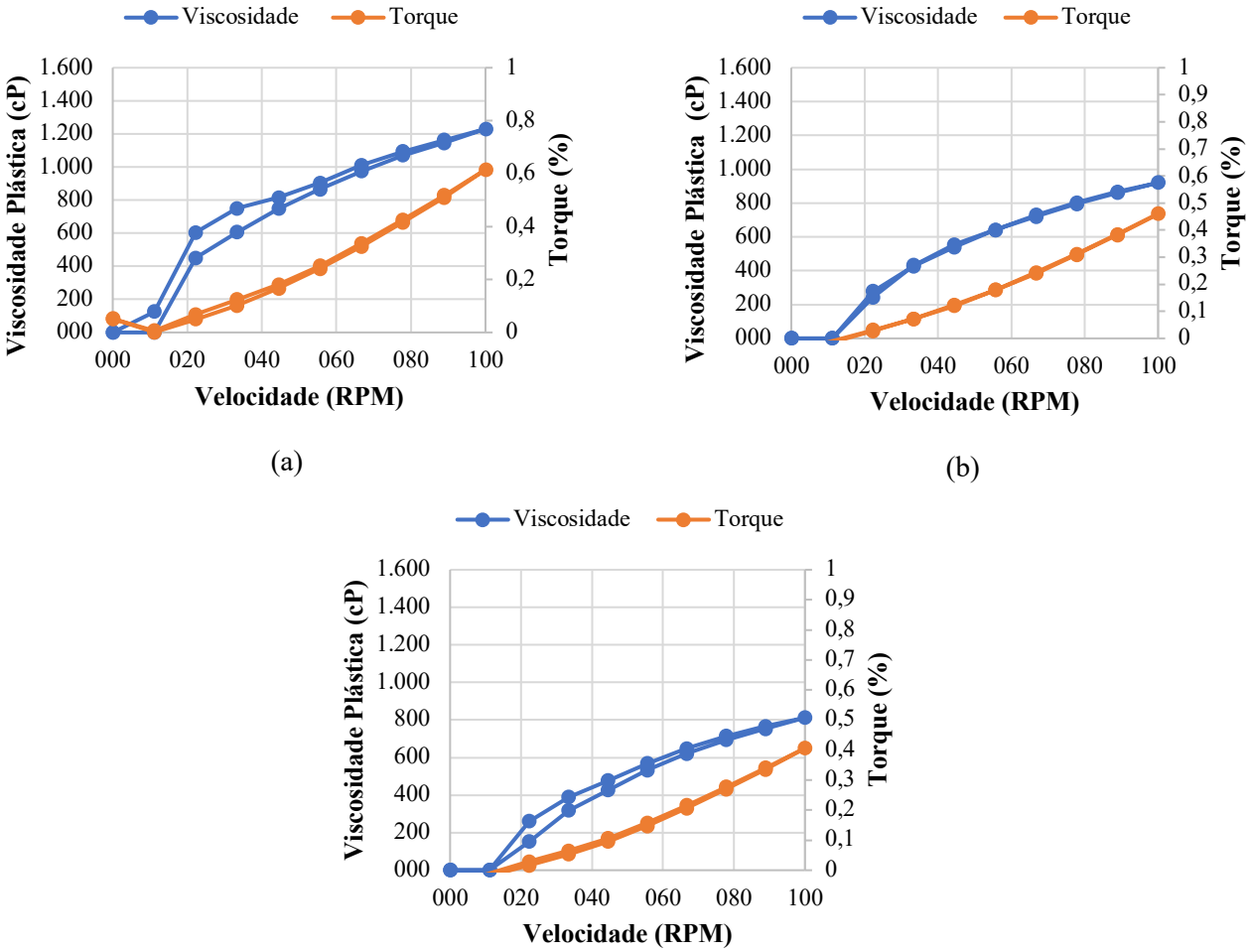
A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais, analisando a relação entre tensão, deformação e tempo. A avaliação da viscosidade plástica é fundamental para verificar a eficiência da dispersão das fibras de polipropileno na matriz cimentícia do ECC. De acordo com Sahmaran et al. (2013), a viscosidade plástica deve ser suficientemente elevada para garantir a estabilidade da matriz e favorecer uma melhor dispersão das fibras.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para os três traços com CCA, considerando teores de aditivo superplastificante de 0,6% (Figura 2(a)), 0,7% (Figura 2(b)) e 0,8% (Figura 2(c)). Para o traço 30ECC-0,6, a viscosidade plástica atinge aproximadamente 800 cP na velocidade máxima de 100 rpm. À medida que a velocidade é reduzida de 100 rpm para 0 rpm, observa-se que a viscosidade permanece praticamente constante até cerca de 70 rpm; abaixo dessa velocidade ocorre uma leve redução. Na análise do torque, expresso em porcentagem, verifica-se que não há perda de desempenho com a diminuição da velocidade, apresentando valor máximo de aproximadamente 0,4%.

No traço com aumento do teor de aditivo para 0,7% (30ECC-0,7), observa-se um acréscimo na viscosidade plástica, passando de 800 cP para cerca de 920 cP na velocidade de 100 rpm. Além disso, não se verifica perda de viscosidade com a redução da velocidade de rotação. O torque também apresenta um leve aumento na velocidade máxima em comparação ao traço 30ECC-0,6, correspondendo a um acréscimo de aproximadamente 13,04%.

Para o teor de 0,8% de aditivo, verifica-se um aumento ainda maior da viscosidade na velocidade de 100 rpm, atingindo um valor máximo de aproximadamente 1230 cP. Esse resultado representa um incremento de 53,75% em relação ao traço 30ECC-0,6 e de 33,60% em relação ao traço 30ECC-0,7. Observa-se também uma redução gradual da viscosidade à medida que a velocidade diminui até 0 rpm, sendo essa queda mais evidente a partir de cerca de 30 rpm. Consequentemente, o aumento da viscosidade resultou também em um aumento do torque da mistura, que atingiu um valor máximo de aproximadamente 0,6% na velocidade de 100 rpm.

Figura 2 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 30% de CCA residual (a) 30ECC1-0,6, (b) 30ECC-0,7 e (c) 30ECC-0,8



(a) (b)

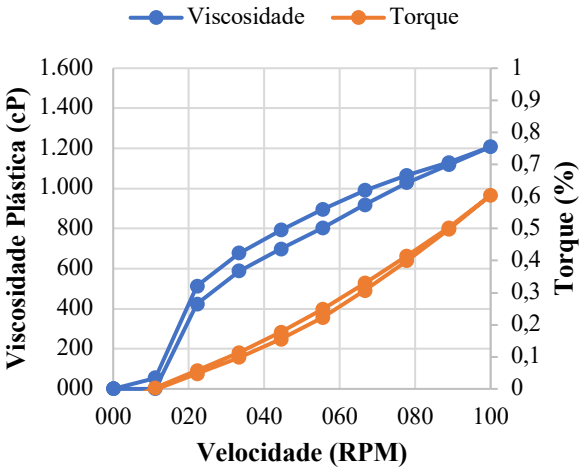
(c)

Fonte: os autores.

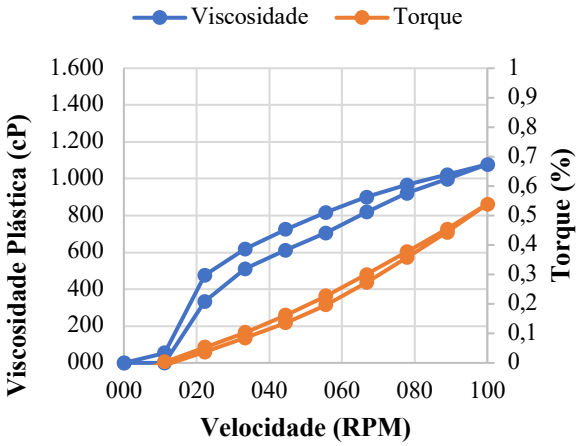
Para os traços com 50% de CCA residual, nas três porcentagens de aditivo, é possível observar que, em relação aos traços com 30% de CCA residual, ocorre um aumento da viscosidade e do torque das misturas (Figura 4). Os traços 50ECC-0,6 (Figura 3(a)) e 50ECC-0,7 (Figura 3(b)) apresentaram comportamento muito semelhante entre si, tanto para a viscosidade plástica quanto para o torque das misturas. Ambos os traços apresentaram valores máximos de viscosidade e torque da ordem de 1000 cP e 0,5%, respectivamente.

Para o traço 50ECC-0,8 (Figura 3(c)), percebe-se um aumento da viscosidade na velocidade máxima de 100Rpm, obtendo um valor de 1230 cP e um torque de 0,6%. Conforme Aïtcin e Jolicoeur (1994) a melhora na fluidez pode ser explicada por ter ocorrido uma melhor dispersão das partículas sólidas por meio de forças de repulsão do aditivo superplastificante.

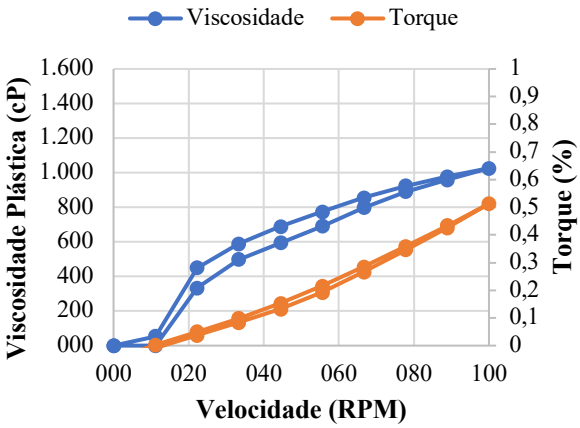
Figura 3 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 50% de CCA residual (a) 50ECC-0,6, (b) 50ECC-0,7 e (c) 50ECC-0,8



(a)



(b)



(c)

Fonte: os autores.

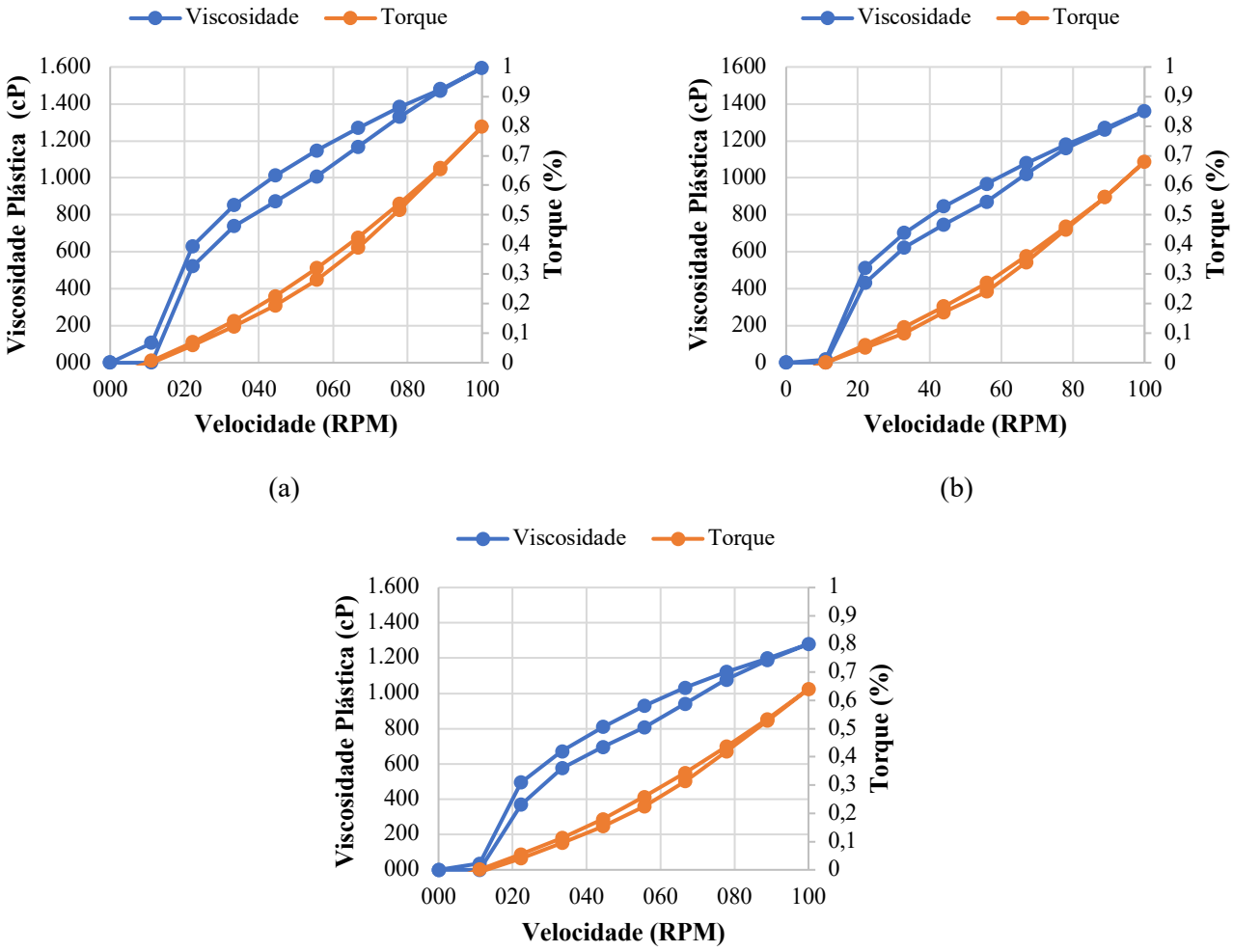
As forças atuantes entre as partículas de cimento compreendem as forças de van der Waals (forças de atração) e as forças de repulsão eletrostática geradas pela carga elétrica presente na superfície das partículas. Com a adição de aditivos, as forças de repulsão eletrostática são intensificadas e, consequentemente, forças de repulsão estérica são geradas, resultando no aumento da densidade local devido à sobreposição de camadas de aditivo adsorvido (FLATT; BOWEN, 2003).

Outro fator que pode explicar o aumento da viscosidade com o incremento do teor de aditivo está relacionado às forças viscosas, que são proporcionais à diferença de velocidade de deslocamento entre as partículas de cimento e a água circundante, bem como entre os agregados e a pasta de cimento que os envolve. Como os materiais à base de cimento se enquadram na faixa de suspensões densas, as partículas precisam se afastar, especialmente quando aglomerados são formados, processo influenciado pela ação dos aditivos superplastificantes (MA et al., 2021).

A Figura 5 ilustra a porcentagem de 70% de CCA residual para as três porcentagens de aditivos escolhidas para esta etapa. É possível observar que à medida que se aumentou o teor de substituição do cimento Portland CP V-ARI RS por CCA residual houve um aumento do torque e da viscosidade plástica. O traço 70ECC-0,6 (Figura 4(a)) obteve uma viscosidade máxima de 1280 cP e um torque

máximo de 0,65%. Também é possível perceber que ocorre uma perda da viscosidade conforme a velocidade sofre uma redução de 100 Rpm até 0 Rpm, já as curvas de torque se mantiveram semelhantes tanto na aceleração quanto na redução da velocidade.

Figura 4 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 70% de CCA residual (a) 70ECC1-0,6, (b) 70ECC-0,7 e (c) 70ECC-0,8



Fonte: os autores.

O traço 70ECC-0,7 (Figura 4(b)) apresentou um leve incremento no valor máximo da viscosidade plástica em relação ao traço 70ECC-0,6, de aproximadamente 11,34%. Também é possível observar um comportamento muito semelhante ao do traço 70ECC-0,6, com curvas de aceleração e redução da velocidade bastante análogas. Em relação ao traço 70ECC-0,8 (Figura 4(c)), nota-se um aumento da viscosidade em comparação às demais porcentagens de aditivo, bem como em relação aos demais traços com diferentes níveis de substituição de cimento por CCA residual.

A viscosidade máxima na velocidade de 100 Rpm foi de 1594 cP e um torque de 0,8%. Acredita-se que o aumento da viscosidade neste caso possa estar atrelado ao aumento da porcentagem de CCA residual, pois o aumento da viscosidade está muito correlacionado com a distribuição granulométrica e da forma das partículas presentes.

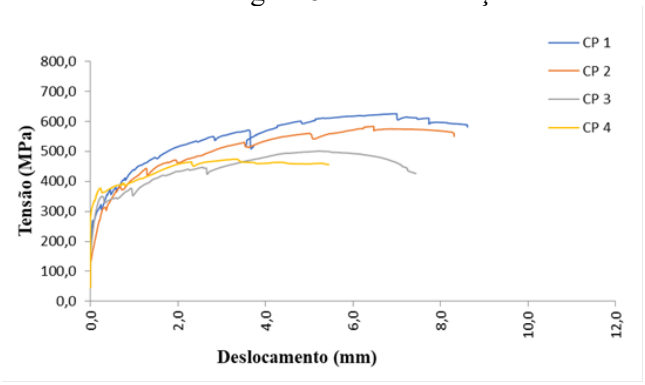
Segundo Nehdi et al. (1998) a viscosidade geralmente aumenta à medida que se afasta da curva granulométrica ideal e atinge um mínimo para um determinado volume de água e para um arranjo de partículas mais compacto. Além do mais, qualquer divergência da forma esférica implica no aumento da viscosidade para um volume de pasta constante. Assim, na presença superplastificante, quanto mais fina e mais esférica for a adição mineral incorporada, melhores serão as propriedades reológicas da mistura.

4.2 Resistência à tração na flexão

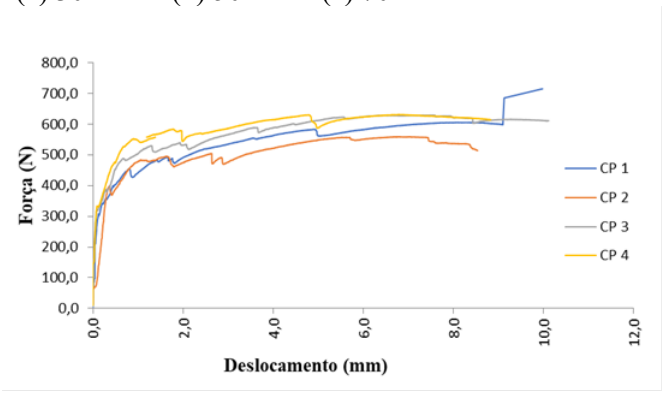
Para o ensaio mecânico de flexão a quatro pontos, foram moldados apenas os traços que apresentaram melhor desempenho nos ensaios de viscosidade e torque; assim, foram utilizados os traços com 0,7% de aditivo. A Figura 5 apresenta as curvas força × deslocamento para os traços com 30% de CCA (Figura 5(a)), 50% de CCA (Figura 5(b)) e 70% de CCA (Figura 5(c)).

Para o traço com 30% de CCA residual (30ECC), é possível observar que todos os corpos de prova apresentaram comportamento mecânico muito semelhante entre si. Observa-se o comportamento strain-hardening após a abertura da primeira fissura, o que resulta no desenvolvimento da múltipla fissuração. Esse comportamento também foi observado por diversos autores, como Li (2007) e Yang et al. (2007).

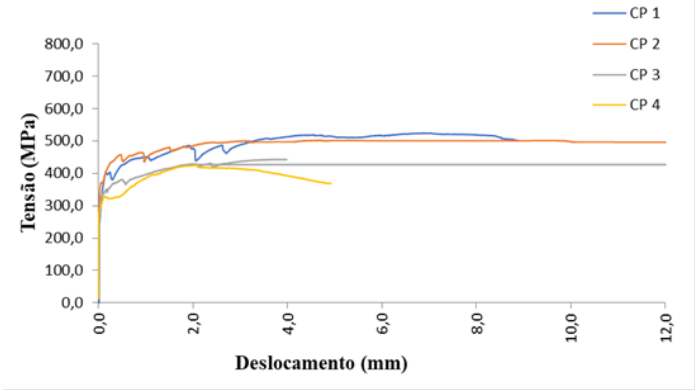
Figura 5 – Curvas força x deslocamento (a) 30ECC 1 (b) 50ECC1 (c) 70ECC1



(a)



(b)



(c)

Fonte: os autores.

A flecha média obtida para o traço 30ECC1 ficou em torno de ± 7 mm caracterizando a elevada capacidade de deformação pós-pico de carregamento. O comportamento strain-hardening foi desenvolvido no traço 30ECC1, ou seja, ganho de resistência após a abertura da primeira fissura e

o desenvolvimento da múltipla fissuração. O traço de 50ECC também obteve uma uniformidade entre os corpos de prova, garantindo a confiabilidade nos resultados. Analisando o traço com 50% de CCA (50ECC) com o traço de 30% de CCA (30ECC) é possível notar que o traço 50ECC1 possui deslocamentos muito semelhantes ao traço 30ECC, em torno de 8mm, e que o comportamento *strain-hardening* fica muito evidente neste traço.

O processo de costura gerado pelas fibras permitiu que o comportamento de múltipla fissuração desenvolvesse. Para o traço 50ECC, o comportamento *strain-hardening* pode ser melhor observado entre os três traços estudados, com o desenvolvimento da múltipla fissuração e ganhos de deslocamento da ordem de 8 mm em todos os corpos de prova. Já o traço 70ECC apresentou uma leve redução na força aplicada em relação aos demais traços; entretanto, a múltipla fissuração e o comportamento *strain-hardening* também foram observados.

A porcentagem de 70% de CCA residual apresentou um comportamento levemente inferior aos demais traços estudados. Após o aparecimento da primeira fissura, o processo de múltipla fissuração tornou-se evidente em todos os corpos de prova. No entanto, após um deslocamento de 5 mm, iniciou-se uma estabilização da força, sem maiores ganhos de resistência, e o desenvolvimento da múltipla fissuração tornou-se menos evidente.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios indicaram que há um excesso de partículas grossas e uma deficiência de partículas mais finas, deixando o empacotamento das partículas descontínuo, o que descaracteriza as propriedades de micromecânica deste tipo de compósito.

Em relação aos termos reológicos das misturas de ECC estudadas, é possível perceber que há necessidade de estudar com maior riqueza de detalhes a reologia, para que se possa modificar a trabalhabilidade atual do ECC em diferentes condições, para que assim possa-se compreender onde melhor deve ser empregado este tipo de material na construção civil brasileira.

Em relação ao ensaio de viscosidade plástica e à análise do torque, foi possível observar que, à medida que o teor de substituição aumentou, ocorreu um leve incremento nos valores de viscosidade plástica e de torque. Também se observa que o aumento da porcentagem de aditivo resultou em um leve aumento nos valores dessas duas variáveis analisadas.

Com relação ao ensaio de flexão, observou-se que no aumento de 50% para 70% de CCA residual, o comportamento *strain-hardening* não fica tão evidente, o que consequentemente não favorece o desenvolvimento da múltipla fissuração, descaracterizando assim as principais propriedades do ECC.

Os ECCs associados com a CCA residual na porcentagem de 50%, para os ensaios estudados apresentaram melhores resultados, e se constituem de uma alternativa promissora para utilização no Brasil, como material para a construção civil.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't.** Concrete International, v.16, n. 5, p. 45–52, 1994.
AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609/C1609M – Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete**. Pennsylvania, p. 9, 2016.

FEI, W.; YUTONG, Y.; SHIPING, Y. **Thermal and moisture performance parameters of high toughness engineered cementitious composite (ECC) with PVA fibers**. Journal of Building Engineering, v. 43, p. 102905–102912, 2021.

FISCHER, G., Li, V. C. **Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions.** ACI Structural Journal, v. 99, p. 781–790, 2002.

FLATT, R. J.; BOWEN, P. **Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: domain of validity of linearized Poisson-Boltzmann equation for nonideal electrolytes.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 6, 781–791, 2003.

KESNER, K.; BILLINGTON, S. L. **Experimental response of precast infill panels made with DFRCC**. JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC), p. 289–298, 2002.

LI, M.; LI, V. C. **Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites.** Materials and Structures, v. 46, p. 405–420, 2013.

LI, V. C. **Integrated structures and materials design.** Materials and Structures, v. 40, n. 4, p. 387–396, 2007.

LI V. C.; WANG, S. **Flexural behavior of GFRP reinforced engineered cementitious composites beams.** ACI Materials Journal, v. 99, p.11–21, 2002.

MA, H.; YI, C.; WU, C**. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC).** Construction and Building Materials, v. 287, p. 122719–122730, 2021.

MAGALHÃES, M. S.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E**. M. R. Influence of local raw materials on the mechanical behaviour and fracture process of PVA-SHCC.** Materials Research, v. 17, p. 146–156, 2014.

PARRA-MONTESINOS, G.; WIGHT, J. K. **Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections.** Journal of Structural Engineering, v. 126, p. 1113–1121, 2000.

RIGHI, D. P.; COSTA, F. B. P.; GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. P. **Tensile behaviour and durability issues of engineered cementitious composites with rice husk ash.** Matéria, v. 22, n. 2, p. 1–9, 2017.
YANG, E. H.; YANG, Y.; LI, V. **Use of high volumes of fly ash improve ecc mechanical properties and material grenness.** ACI Materials Journal, v. 104, p. 620–628, 2007.

ZHANG, Z.; ZHANG, Q. **Matrix tailoring of engineered cementitious composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber.** Construction and Building Materials, v. 161, p. 420–431, 2018.