CAPÍTULO 32 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/6brrdk16
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/dbs37y80

ESTUDO DO DESEMPENHO DE ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) COM CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO SOLUÇÃO DE RECAPEAMENTO DE PAVIMENTOS

Débora Pedroso Righi[1]*, Thiago Favarini Beltrame Luiz[2]; 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

ECC - Engineered Cementitious Composites, ou concretos flexíveis (*bendable concretes*), são uma classe especial de compósitos cimentícios avançados, inicialmente propostos pelo Professor Victor Li, com matrizes projetadas e incorporação de fibras, desenvolvidos para produzir materiais mais duráveis e com melhor desempenho. Com base nesse conceito, mas com o objetivo de reduzir custos e aumentar o desempenho ambiental, este trabalho investiga a possibilidade de utilizar cinza de casca de arroz, um subproduto local muito comum em alguns países, como material cimentício suplementar para produzir misturas de ECC mais sustentáveis. A CCA foi moída por 4 e 8 horas para melhorar sua atividade pozolânica, uma vez que a cinza utilizada foi originada de processos de queima não controlados, o que gera um resíduo menos homogêneo, porém mais ambientalmente amigável e economicamente atrativo. O comportamento mecânico, em termos de resistência à flexão e à tração, foi avaliado. Também foram analisadas a resistência ao trincamento reflexivo, uma vez que esses ensaios fornecem indicações do comportamento potencial do material quando utilizado na reabilitação de pavimentos. Os resultados mostraram que as misturas com CCA apresentam desempenho semelhante ao das misturas de ECC de referência com materiais cimentícios tradicionais, apresentando uma curva de encruamento por deformação (*strain hardening*) bem definida e o comportamento esperado de fissuração múltipla. Não foram observadas diferenças significativas entre as misturas com cinza moída por 4 e 8 horas. Portanto, recomenda-se o uso de CCA moída por 4 horas, pois reduz o consumo de energia e o tempo de moagem.

Palavras-chave: ECC; cinza de casca de arroz; reabilitação pavimentos.

ABSTRACT

ECC – Engineered Cementitious Composites, or bendable concretes, are a special class of advanced cementitious composites, initially proposed by Professor Victor Li. They consist of designed matrices with fiber incorporation, developed to produce materials with greater durability and improved performance. Based on this concept, but aiming to reduce costs and improve environmental performance, this study investigates the possibility of using rice husk ash, a local by-product very common in some countries, as a supplementary cementitious material to produce more sustainable ECC mixtures. The RHA was ground for 4 and 8 hours to improve its pozzolanic activity, since the ash used originated from uncontrolled burning processes, which generate a less homogeneous residue, but one that is more environmentally friendly and economically attractive. The mechanical behavior, in terms of flexural and tensile strength, was evaluated. Reflective cracking resistance was also analyzed, since these tests provide indications of the potential behavior of the material when used in pavement rehabilitation. The results showed that mixtures with RHA present performance similar to that of reference ECC mixtures with traditional cementitious materials, showing a well-defined strain-hardening curve and the expected multiple cracking behavior. No significant differences were observed between mixtures with ash ground for 4 and 8 hours. Therefore, the use of RHA ground for 4 hours is recommended, as it reduces energy consumption and grinding time.

Keywords: ECC; rice husk ash; pavement rehabilitation.

1. INTRODUÇÃO

Os Engineered Cementitious Composites (ECC) são uma geração especial de compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho que foram concebidos através dos princípios da micromecânica. Possuindo uma adição máxima de 2% de fibras em relação ao volume total, esses compósitos foram projetados para resistir a altas tensões de tração e elevadas cargas de cisalhamento. Uma das características mais inerentes a esse material é a alta ductilidade que proporcionam à estrutura (LI, 2003). O ECC apresenta uma alta capacidade de deformação pós-pico de carregamento, cujo comportamento foi denominado de strain-hardening. Este comportamento proporciona o desenvolvimento de múltiplas fissuras através da transferência de carregamentos entre as fibras existentes

Devido a sua elevada ductilidade, o ECC possui uma elevada capacidade de absorção de energia e alta capacidade de deformação sob carregamentos de tração, resultando na formação de diversas múltiplas fissuras de pequena espessura durante o processo de ruptura deste compósito. Para se alcançar esta alta ductilidade, é dispensado o uso de agregados graúdos na mistura, apenas uma pequena quantidade de areia fina é aplicada na matriz para controlar a tenacidade da mesma. É importante também controlar a resistência da matriz no ECC, conforme onde a baixa resistência da matriz resulta em um aumento da capacidade de tensão da fibra, assim proporcionando o efeito chamado de múltipla fissuração (WANG, LI, 2007).

Uma das aplicações propostas é na reabilitação de pavimentos rígidos, devido ao potencial de evitar o trincamento reflexivo, um problema sério geralmente encontrado quando se utilizam revestimentos de concreto tradicionais não aderidos (overlays) (QIAN et al., 2013; ZHAO et al., 2015). Outras características do ECC, como controle de fissuração por retração, elevada resistência e durabilidade, além da possibilidade de aplicação em camadas delgadas, também são atrativas. Soma-se a isso o fato de que as juntas podem ser reduzidas ou até mesmo eliminadas, conforme sugerido por Qian et al. (2013).

Zhang et al. (2016), que estudaram a viabilidade da aplicação do ECC, indicam que o material pode resultar em um revestimento mais sustentável, com menor espessura quando comparado às estruturas convencionais de revestimento de tabuleiros de pontes. O uso de ECC como uma boa solução para revestimentos de pavimentos de concreto também foi relatado por Zhao et al. (2015).

O ECC tem sido estudado principalmente com o uso de fibras de álcool polivinílico (PVA) (SAID et al. 2015, LIN et al. 2015), embora alguns estudos tenham se baseado no uso de outras fibras (HALVAEI et al. 2012, RATHOD E PATODI, 2010), como polietileno, polipropileno, poliéster, acrílico, náilon e aço, e alguns estudos consideraram o uso de uma mistura de fibras para melhorar a resistência ao impacto.

Neste trabalho, fibras de polipropileno foram escolhidas para reforçar o ECC, devido ao menor custo e maior disponibilidade desse tipo de fibra no mercado brasileiro, e aos bons resultados obtidos em estudos anteriores (Garcez et al. 2011). No Brasil, trabalhos de pesquisa muito promissores têm sido realizados utilizando cinzas de casca de arroz como material de adição ou substituto do cimento (RIGHI et al. 2017, COSTA et al. 2019). Possui boa atividade pozolânica, melhor capacidade de retenção de cloreto e bom comportamento reológico. Também se adapta bem à economia local, oferecendo a possibilidade de agregar valor e dar destino a um grande volume de resíduos gerados pela indústria arrozeira. Muitas empresas arrozeiras utilizam a casca de arroz como combustível para geração de energia e/ou vapor. Geralmente, são empresas de pequeno porte

e não possuem processos para reutilizar ou descartar corretamente as cinzas geradas pelo processo de combustão.

A cinza da casca de arroz geralmente apresenta em sua composição dióxido de silício, ou comumente denominado sílica (SiO2), carbono (C), óxido de potássio (K2O), óxido fosfórico (P2O5), óxido de cálcio (CaO) e também, em menores quantidades, compostos de magnésio (Mg), ferro (Fe) e sódio (Na). A combustão da casca de arroz leva a cinzas com alto teor de sílica, com formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina). A quantidade de sílica e a forma estrutural dependem, entre outros fatores, do tipo de equipamento utilizado para queimar a casca de arroz, do intervalo de tempo em que a casca permanece dentro do forno, da temperatura de queima e da taxa de resfriamento das cinzas (Machado et al. 2007).

Com o objetivo de reduzir o impacto ambiental causado pelo alto teor de cimento, bem como controlar a ligação química entre as fibras e a matriz, esta pesquisa foi desenvolvida considerando o uso de cinza de casca de arroz não processada (CCA) como substituição parcial do cimento em misturas de ECC. Para contribuir com o estudo da aplicação desse material como revestimento (overlay) de concreto, os resultados são apresentados em termos de comportamento à tração e à flexão, bem como do desempenho quanto à resistência ao trincamento reflexivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os principais componentes da matriz de ECC são cimento Portland, areia fina, cinza de casca de arroz, água e aditivo superplastificante. O cimento Portland utilizado para a produção dos ECCs foi o CP V-ARI de alta resistência inicial, com sua massa específica de 3,11 g/cm³, diâmetro médio de 9,65 μm e perda ao fogo de 3,06%. A areia utilizada foi de origem natural, tipo quartzoza, com massa específica de 2,52 g/cm³, módulo de finura de 0,67 e diâmetro máximo de 0,3.

No estudo, foi usado o aditivo superplastificante com base de éter policarboxílico. Este tipo de aditivo possui alta eficiência na redução de teor de água, comparado com os mais comumente utilizados. Fibras de polipropileno foram incorporadas como fibras de reforço a matriz cimentícia do ECC. Com um custo baixo, as fibras de polipropileno possuem características especificas destacando-se perante as outras. Essas se devem a sua cadeia polimérica, a qual afeta diretamente a sua resistência e o seu comportamento. O polipropileno caracteriza-se por ser um plástico inodoro, incolor e atóxico tendo uma densidade de 900 kg/cm³. Neste estudo foi estudada a porcentagem de 2% de fibras de polipropileno do volume total com alta tenacidade, suas propriedades estão destacadas 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 (CCA) de queima sem controle de temperatura utilizada neste trabalho foi utilizada como combustível no processo de parbolização dos grãos de arroz. Esta queima se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas, resultando como rejeito deste processo, uma cinza de cor predominantemente preta ou cinza escuro.

A CCA teve sua granulometria reduzida, utilizando-se um moinho de bolas com dimensões de 310 mm de altura e diâmetro de 275 mm contendo 75 bolas de 38 mm de diâmetro. Foi moído 1 quilo de CCA por vez nos tempos de 4 e 8 horas, realizando-se, desse modo, a moagem com o intuito de aumentar a finura da cinza. A composição química e as propriedades físicas das cinzas de casca de arroz estudadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades químicas e físicas da CCA

Composição Química (%)	CCA (4 horas)	CCA (8 horas)
SiO_2	63,26	65,83
K_2O	1,46	1,07
CaO	0,73	0,44
P_2O_5	0,52	0,33
Fe_2O_3	0,32	0,34
MnO	0,30	0,27
SO_3	0,18	0,05
Al_2O_3	0,13	0,06
MgO	0,12	0,08
CO_2	32,71	31,33
Propriedades Físicas		
Massa específica (g/cm³)	2,03	2,06
Tamanho médio do grão (µm)	7,29	3,59
Perda ao fogo (%)	19,44	13,99
Atividade pozolânica (%)	174,37	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 especial para argamassas com capacidade de 2 litros. Os materiais secos (cimento; areia e CCA) foram colocados no misturador e misturados até se obter uma mistura de pós uniforme. Após procedeu a adição da água de amassamento e do aditivo super plastificante.

A pasta obtida nesta etapa de mistura é extremamente fluida, de modo a permitir a completa dispersão das fibras. Após a adição das fibras, foram necessários 3 minutos de rotação em velocidade elevada para garantir sua total dispersão.

2.3 Programa experimental

Neste programa experimental foram analisadas sete misturas de ECC, das quais seis foram preparadas para investigar o potencial da CCA em matrizes de ECC. Na Tabela 3 está descrito os traços utilizados com suas proporções, e com dois tipos de CCA, uma moída por quatro horas, adotada a nomenclatura de CCA 4 horas e a outra moída por 8 horas com a nomenclatura de CCA 8 horas. Para estes dois tipos de CCA, foram estudadas porcentagens de substituição de cimento

por CCA de 10%, 20% e 30% com substituição em volume. Os ensaios mecânicos foram realizados aos 28 dias.

Tabela 3 - Dosagem dos Traços Estudados

Nomenclatura	Descrição	CP-V	CCA	Areia Fina	Fibra PP	Aditivo	Água
ECC-REF	Referência	1009,16	/	757,53	17,90	7,05	348,55
4CCA10	10% CCA 4 horas	908,24	65,87	757,53	17,90	7,05	348,55
4CCA20	20% CCA 4 horas	807,32	131,74	757,53	17,90	7,05	348,55
4CCA30	30% CCA 4 horas	706,41	197,61	757,53	17,90	7,05	348,55
8CCA10	10% CCA 8 horas	908,24	68,14	757,53	17,90	7,05	348,55
8CCA20	20% CCA 8 horas	807,32	136,28	757,53	17,90	7,05	348,55
8CCA30	30% CCA 8 horas	706,41	204,43	757,53	17,90	7,05	348,55

Fonte: os autores.

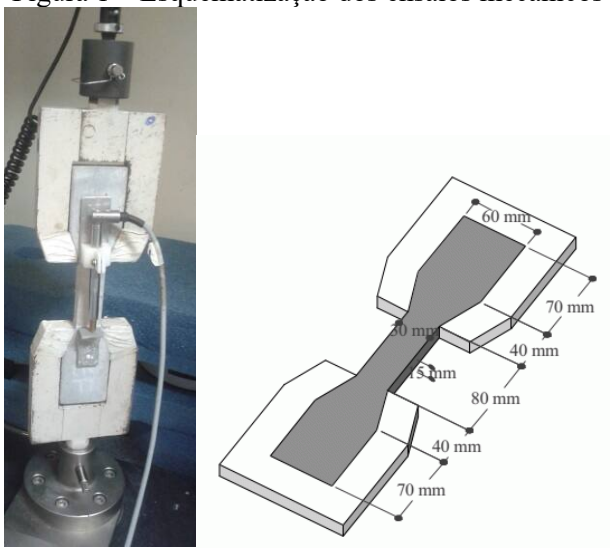
Com o intuito de avaliar o desempenho mecânico dos ECCs com CCA foram realizados ensaios de tração direta e flexão à quatro pontos, e para avaliar o ECC como camada de overlay para pavimentos foi realizado o ensaio de reflexão de fissuras. Para avaliar a tração direta este estudo seguiu o proposto por Boshoff e Zijl (2005) com velocidade de carregamento de 5 N/s, onde as dimensões dos corpos-de-prova e a execução do ensaio são apresentados na Figura 1.

O ensaio de flexão que foi utilizado nesta pesquisa foi baseado em Magalhães (2010), o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 (2019), realizados em quatro pontos do corpo de prova. Os corpos-de-prova tem dimensões de 300mm 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 possui 231 mm de distância entre os apoios, cada corpo-de-prova possui dois LVDTs para medir o deslocamento, um posicionado na vertical e outro na horizontal.

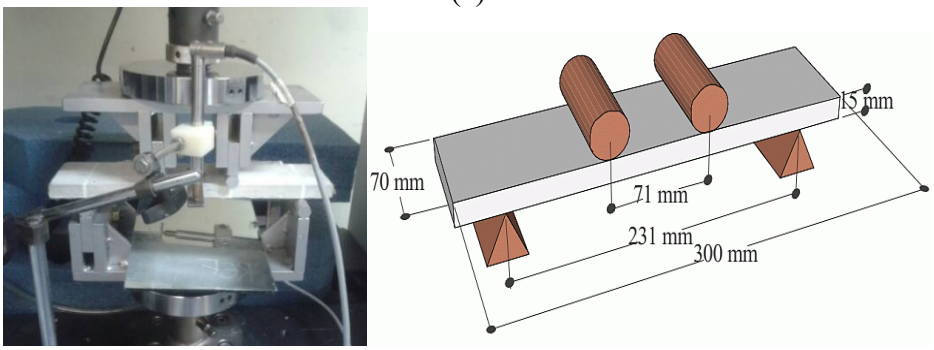
Para o ensaio de reflexão de fissuras, com o objetivo de investigar a influência da ductilidade na resistência à fissuração refletiva do compósito, utilizou-se o método de Qian (2007), por meio de ensaio de flexão estática. Para esse ensaio, foram moldados ECCs que apresentaram o melhor desempenho nos ensaios de tração direta e de flexão a quatro pontos, considerando os dois tipos de CCA moídas. Os corpos de prova foram formados por duas camadas – ECC e substrato de concreto –, constituindo vigas compostas. As bases dos corpos de prova, com dimensões de 355 × 150 × 50 mm, também foram moldadas com o mesmo concreto usual para pavimentos, com classe de resistência C30.

Após o processo de desmoldagem e um período de cura de 14 dias, foi realizado um corte transversal na região central, com o auxílio de uma serra diamantada, resultando em dois blocos de 355 x 75 x 50 mm. Esses dois blocos serviram de base para a aplicação do ECC na espessura de 5 cm. A Figura 1 detalha a configuração de ambos os ensaios de tração direta (a), flexão à quatro pontos (b) e reflexão de fissuras (c).

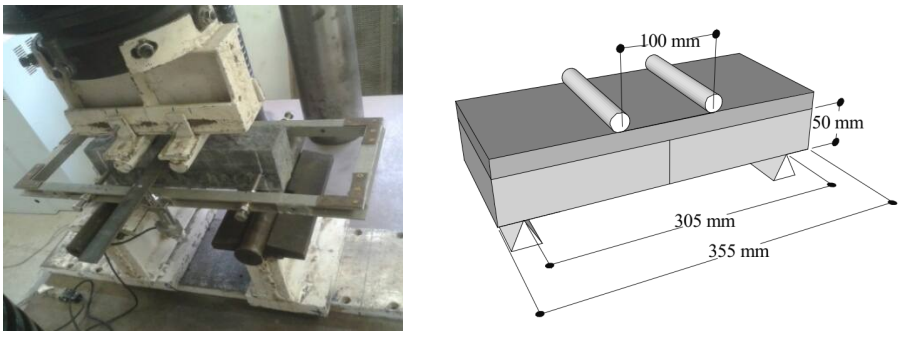
Figura 1 – Esquematização dos ensaios mecânicos



(a)



(b)



(c)

Fonte: os autores.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Resistência à tração direta

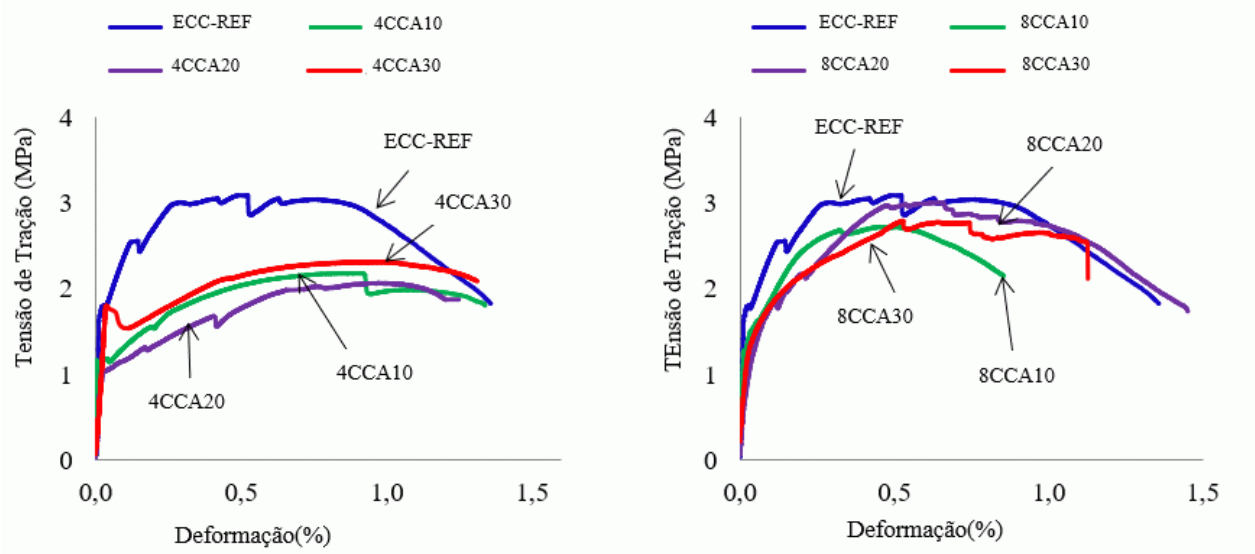
Os resultados dos ensaios de tração uniaxial das misturas com cinza de casca de arroz moída por 4 horas são apresentados na Figura 2 (a) e na Tabela 4. Observa-se um aumento efetivo na capacidade de deformação do compósito após o aparecimento da primeira fissura. Todas as misturas de ECC com CCA moída por 4 horas demonstram uma abertura da primeira fissura em tensões de tração que variam de 0,92 a 1,64 MPa em 28 dias.

As misturas com CCA moída por 4 horas apresentaram uma pequena perda de desempenho em relação ao ECC-baseline, as misturas apresentam o processo de strain-hardening com tensões máximas em torno de 2,06 a 2,26 MPa, tensões estas reduzidas em relação ao ECC-baseline que foi de 3,09 MPa. O traço 4CCA10 (10% de substituição) apresentou o processo de múltipla fissuração com tensão máxima em torno de 2,18 MPa e uma deformação de 1,3%. O traço 4CCA20 (20% de substituição) apresentou uma perda de desempenho em relação às outras porcentagens, tendo uma abertura da primeira fissura de 0,92 MPa, resultado inferior as outras misturas com CCA com 4 horas de moagem.

Já o traço 4CCA30 (30% de substituição) apresentou o melhor desempenho entre essas misturas, com uma tensão máxima de 2,26 MPa e uma deformação de 1,3%. Nota-se, ainda, que a múltipla fissuração não é tão notável como no ECC-REF; em contrapartida, a capacidade de deformação supera a do ECC-REF.

Para as misturas com CCA com 8 horas de moagem (Figura 2 (b)) observa-se um aumento na deformação. Este aumento de deformação deve-se ao processo de strain-hardening o qual gera múltiplas pequenas fissuras durante o carregamento da estrutura. Isto ocorre devido às pontes de transferência da tensão entra as fibras espalhadas por todo o compósito. Na Tabela 4 é possível perceber que as deformações das misturas com CCA moída por 8 horas é de 1,1 a 1,4 %, muito semelhante ao ECC-REF. Já o traço 8CCA10 demonstra uma perda de desempenho significativa em relação as outras porcentagens, a múltipla fissuração não se mostra evidente, a abertura da primeira fissura inicia-se com 1,14 MPa e sua tensão máxima chega a 2,67 MPa.

Figura 2 – Curva tensão x deformação – tração direta (a) CCA 4 horas (b) CCA 8 horas



Fonte: os autores.

O traço 8CCA20 apresentou comportamento muito semelhante ao ECC-REF, com múltipla fissuração bem visível. A primeira fissura teve início com uma tensão de 1,85 MPa e uma deformação de 1,4%. Para a mistura 8CCA30, a abertura da primeira fissura ocorreu em uma deformação maior que a observada nos demais traços, com uma tensão também superior, de 2,78 MPa, valor igualmente superior ao do ECC-REF. A múltipla fissuração é bem evidente nessa mistura, que apresentou tensão máxima de 2,76 MPa e deformação de 1,1%.

Tabela 4 – Tensão x deformação – tração direta

Nomenclatura	Descrição	Abertura 1ª Fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)
ECC-REF	Referência	1,8 ± 0,2	3,09 ± 0,1	1,2 ± 0,3
4CCA10	10% CCA 4 horas	1,09 ± 0,4	2,18 ± 0,2	1,3 ± 0,2
4CCA20	20% CCA 4 horas	0,92 ± 0,2	2,06 ± 0,5	1,1 ± 0,1
4CCA30	30% CCA 4 horas	1,64 ± 0,3	2,26 ± 0,3	1,3 ± 0,2
8CCA10	10% CCA 8 horas	1,14 ± 0,1	2,67 ± 0,4	1,4 ± 0,2
8CCA20	20% CCA 8 horas	1,85 ± 0,6	3,01 ± 0,3	1,4 ± 0,5
8CCA30	30% CCA 8 horas	2,78 ± 0,2	2,76 ± 0,1	1,1 ± 0,4

Fonte: os autores.

4.2 Resistência à tração na flexão

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de flexão a quatro pontos, e a Tabela 5 apresenta os resultados quantitativos das duas CCAs estudadas. Para os traços com utilização de cinza de casca de arroz, percebe-se que as deformações ocorreram sob tensões ligeiramente acima ou abaixo daquelas observadas para o ECC-REF, com valores médios em torno de 8 MPa. Além disso, à medida que se aumentou o teor de substituição, observou-se um ganho nas deformações últimas. Esse comportamento pode ser atribuído à presença das partículas da cinza, que contribuem para a melhoria do desempenho na dispersão das fibras.

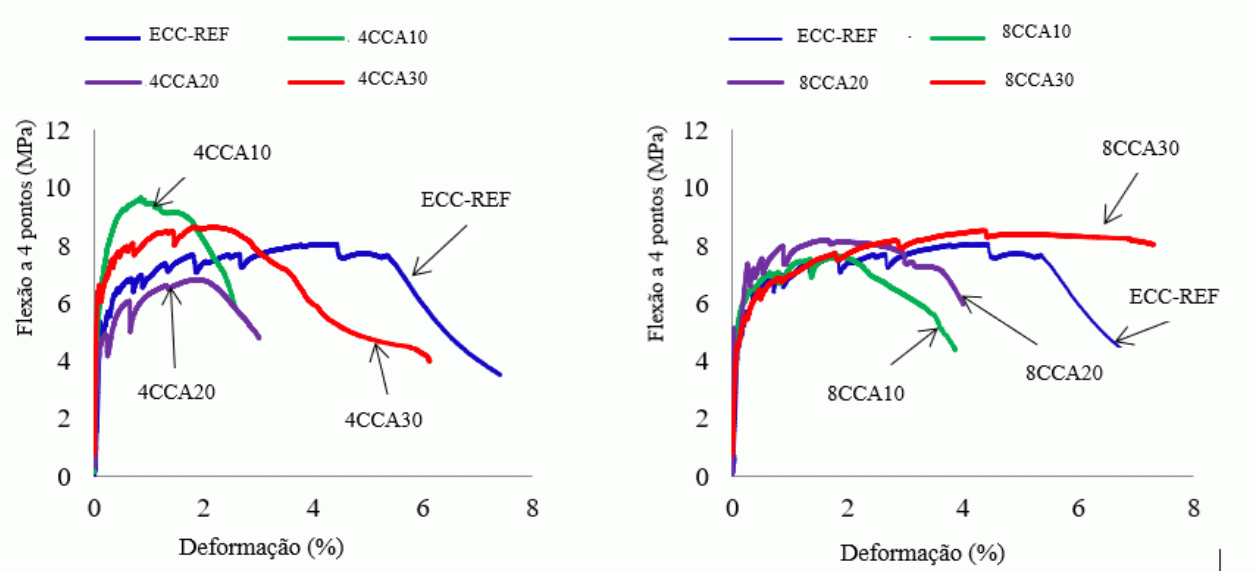
Segundo Kim et al. (2007), a dispersão das fibras provém da melhora na trabalhabilidade. Esta tendência, no entanto, deve ser verificada através da realização de ensaios de dispersão de fibras, os quais não foram realizados no presente trabalho. O autor ainda comprova a obtenção de um aumento da deformação em seus compósitos com a utilização de escória de alto forno. Para demonstrar a hipótese de que as partículas fornecem uma força motriz para a dispersão das fibras e consequentemente alta capacidade de deformação, foi realizado um teste de dispersão da fibra, através da análise de uma imagem binária convertida em imagem transversal fluorescente. Os resultados dos testes indicaram que os compósitos com escória possuíram coeficientes de distribuição mais elevados, demonstrando a distribuição mais homogênea das fibras. Segundo o autor, o resultado sugere que a contribuição das partículas da escória para a trabalhabilidade supera o efeito de diminuição do potencial de múltiplas fissurações.

A mistura 4CCA10 (Figura 3(a)) apresenta uma tensão máxima superior à do ECC-REF, em torno de 9,59 MPa. Em contrapartida, esse traço apresentou uma deformação menor que a dos demais traços estudados, com valor máximo de 2,4%. O processo de múltipla fissuração não é evidente para esse traço, e acredita-se que esse comportamento possa ser explicado pelo deslizamento das fibras na matriz cimentícia.

O traço de 4CCA20 obteve um comportamento muito semelhante ao traço de 4CCA10, com uma tensão máxima de 6,8 MPa e a abertura de fissuras em 4,20 MPa como visto na Tabela 5. O traço de 4CC30 apresenta o comportamento strain-hardening bem evidente, o processo de costura gerado pelas fibras permitiu que o comportamento de fissuração múltipla se desenvolvesse. Esta mistura obteve uma deformação máxima de 8,58 MPa superior ao ECC-REF e uma deformação de 5,8%.

Este traço se mostra uma alternativa viável visando ao ganho de sustentabilidade ambiental. A porcentagem de 30% já favorece muito a diminuição do uso de cimento e a moagem de 4 horas se torna mais viável devido ao menor consumo de energia para a moagem.

Figura 3 – Curva tensão x deformação – flexão a 4 pontos (a) CCA 4 horas (b) CCA 8 horas



Fonte: os autores.

Para as misturas com CCA moída por 8 horas, é possível notar que o processo de múltipla fissuração se desenvolve de forma mais pronunciada à medida que se aumenta o teor de substituição. O traço 8CCA10 apresentou a abertura da primeira fissura em 4,52 MPa, e o comportamento strain-hardening foi desenvolvido, favorecendo o processo de múltipla fissuração, com deformação última de 3,9%. O traço 8CCA20 apresentou comportamento semelhante ao do traço 8CCA10, com abertura da primeira fissura em torno de 5 MPa e deformações últimas próximas de 3,6%. Além disso, essa mistura apresentou uma tensão máxima superior à do ECC-REF, atingindo 8,17 MPa.

O traço 8CCA30 apresentou um comportamento de múltipla fissuração bem evidente como mostra a Figura 3 (b). Percebe-se que as deformações ocorreram com a mesma tensão média do ECC-baseline, sendo elas na média de 8,49 MPa (Tabela 5). Também apresenta um ganho de deformações últimas em torno de 7,2%, superior ao ECC-REF. Este traço apresentou o melhor comportamento mecânico dos compósitos com cinza de casca de arroz, seu desempenho ficou muito semelhante ao ECC-REF.

Tabela 5 – Tensão x deformação – flexão a 4 pontos

Nomenclatura	Descrição	Abertura 1ª Fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)
ECC- Linha de base	Linha de base	4,.79 ± 0,3	8,02 ± 0,1	5,8 ± 0,5
4RHA10	10% RHA 4 h	6,10 ± 0,4	9,54 ± 0,2	2,4 ± 0,1
4RHA20	20% RHA 4 h	4,20 ± 0,2	6,8 ± 0,5	2,8 ± 0,6
4RHA30	30% RHA 4 h	6,49 ± 0,6	8,58 ± 0,2	5,8 ± 0,2
8RHA10	10% RHA 8 h	4,52 ± 0,2	7,60 ± 0,3	3,9 ± 0,4
8RHA20	20% RHA 8 h	5,0 ± 0,5	8,17 ± 0,2	3,6 ± 0,1
8RHA30	30% RHA 8 h	4,26 ± 0,3	8,49 ± 0,2	7,2 ± 0,3

Fonte: os autores.

4.3 Reflexão de Fissuras

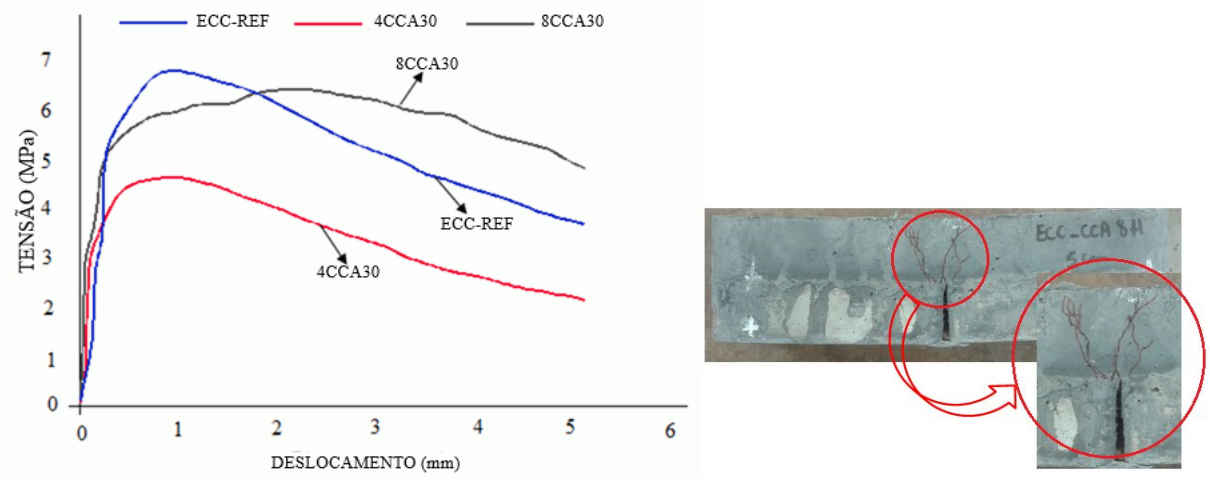
Os resultados em termos de carga × deslocamento vertical, obtidos nos ensaios de resistência à fissuração reflexiva, são apresentados na Figura 4(a). As curvas mostradas no gráfico representam a média de três amostras. Para os ECCs com CCA, tanto moída por 4 horas quanto por 8 horas, a porcentagem que apresentou melhor desempenho nos ensaios de tração direta e de flexão a quatro pontos foi de 30%. Assim, para o ensaio de reflexão de fissuras, foram moldados ECCs utilizando apenas essa porcentagem de substituição.

Para o ECC-REF, a carga máxima atingida pelos corpos de prova foi, em média, de 6,0 kN. Nota-se que a múltipla fissuração se desenvolve com melhor desempenho para menores deslocamentos. A partir de um deslocamento de 3,0 mm, observa-se uma perda de desempenho no desenvolvimento do comportamento strain-hardening. O traço 8CCA30 também atingiu uma carga máxima média de 6,0 kN, resultado semelhante ao observado para o ECC-REF. Observa-se, ainda, que a múltipla fissuração parece mais evidente em relação ao ECC-REF, sem perda de desempenho aparente. A abertura da primeira fissura ocorre para cargas em torno de 4,0 kN. Após a abertura da primeira fissura, percebe-se que o comportamento strain-hardening passa a se desenvolver no corpo de prova.

Para o traço 4CC30 é observada uma perda de desempenho em relação aos demais traços. A carga máxima encontrada para estes compósitos com CCA moída por 4 horas foi de 4,0 kN. A múltipla fissuração para este traço se desenvolve com curvas mais suaves e observa-se que a partir do deslocamento de 2,5 mm existe uma perda de desempenho.

A Figura 4 (b) mostra os padrões típicos de fissuração obtidos no ensaio. É possível observar que as fissuras se concentram próximas à fissura induzida na base de concreto. Observa-se também a ocorrência de fissuração múltipla, mesmo quando as fissuras atravessam toda a seção da camada de revestimento (overlay), o que pode levar a problemas de durabilidade do sistema caso as fissuras não sejam impermeáveis (LI e LI, 2011).

Figura 4 – (a) Gráfico



(a) (b)

Fonte: os autores.

A mistura 8CCA30 apresentou o melhor comportamento em termos de desempenho pós-fissuração. O ensaio de resistência à fissuração reflexiva demonstrou que o ECC pode aderir efetivamente à base de concreto, de modo que as fissuras originadas no ensaio de flexão ficaram concentradas próximas à ponta da fissura induzida na base de concreto. Esse é um resultado promissor em termos de desempenho potencial para o eventual uso do material como *overlay* em aplicações reais.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização de cinza da casca de arroz (CCA) no ECC contribui para a preservação do meio ambiente, uma vez que esse resíduo deixa de ser destinado a aterros sanitários. Os resultados do ensaio de tração direta demonstraram que o percentual de 30% de cinza, independentemente do tempo de moagem, apresentou o melhor desempenho. No ensaio de flexão a quatro pontos, observou-se que a CCA contribuiu para o aumento da tenacidade da matriz, possibilitando a ocorrência do processo de múltiplas fissuras em todas as porcentagens de substituição, destacando-se novamente a substituição de 30%, que apresentou maiores deformações últimas. Mesmo que o ensaio de tração direta não seja utilizado diretamente para dimensionar camadas de recapeamento, ele fornece a base para entender o mecanismo de fissuração do material. Já a tração na flexão (módulo de ruptura) tem aplicação mais direta, pois representa melhor o estado de tensões que ocorre em campo, onde a camada está submetida a flexão devido às cargas de tráfego.

O ensaio de reflexão de fissuras indicou que o compósito, quando utilizado como material de reparo, é capaz de absorver esforços e apresentar boa aderência na interface compósito–concreto, mesmo em regiões de juntas do material. Além disso, os ensaios de caracterização mecânica dos ECCs demonstraram que o traço 8CCA30 apresentou os melhores resultados, evidenciando um desempenho mecânico superior ao ECC-REF. Em contrapartida, o traço 4CCA30 também apresentou resultados satisfatórios e, sob a perspectiva ambiental, mostra-se mais viável devido ao menor tempo de moagem necessário e, consequentemente, ao menor custo energético. De forma geral, o ECC desenvolvido no Brasil com a utilização de CCA e fibras de polipropileno mostrou-se viável para aplicação, apresentando o comportamento de strain-hardening, uma das principais características dos Engineered Cementitious Composites. Além disso, verifica-se a viabilidade da produção desse compósito com materiais disponíveis e fabricados no Brasil.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) por subsidiar financeiramente a realização deste trabalho. E ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) onde foi desenvolvida esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASTM International. ASTM C 1609: **Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)**. United States, 2019.

BOSHOFF, W.P.; ZIZL, G. P. A. G. **Time-dependent response of ECC: characterization and modeling of creep and creep fracture**. *In*: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON HPFRCC IN STRUCTURAL APPLICATIONS, Honolulu. USA: RILEM Publications, PRO 49, p. 125-134, 2005.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC): a review of the material and its aplications.** Journal of Advanced Concrete Technology, v.1, n. 3, p.215-230, 2003.

COSTA, F. B. P.; RIGHI, D. P.; GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. P. **Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers.** Construction and Building Materials, v. 213, p. 505-513, 2019

GARCEZ, E. O.; YANG, E.; AND LI, V.C. **Development of pigmentable engineered cementitious composites for architectural elements through integrated structures and materials design.** Materials and Structures, v. online, p. 1-8. 2011

HALVAEI, M., JAMSHIDI, M., AND LATIF, M. **Application of low modulus polymeric fibers in engineered cementitious composites.** Journal of Industrial Textiles, v. 43, p. 511-524, 2012.

KIM, JIN-KEUN; KIM JEONG-SU; HA. G.; KIM, Y. **Tensile ande fiber dispersion performace of ECC (engineered cementitious composites) produced with groud granulated blast furnace slag**. Cement and Concrete Research, v.37, p. 1096-1105, 2007.

LI, M.; LI, V.C. **Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment.** ACI Materials Journal, v. 108, p. 333-340, 2011.

LIN, Y.W.; WOTHERSPOON, L.; INGHAM, J.M. **Tensile properties of an engineered cementitious composite shotcrete mix.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, p. 1-1, 2015

MACHADO, M.M.; ALFARO, E.F.; FERRO, W.P. **Estudo da viabilidade da substituição do talco por cinza da casca de arroz como carga em Polipropileno**, *In*: 9 CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2007. **Anais** .Campina Grande, 2007.

QIAN, S.Z.; LI, V. C.; ZHANG, H.; KEOLEIAN, G. A. **Life cycle analysis of pavement overlays made with engineered cementitious composites.** Cement and Concrete Research, v. 35, p. 78-88, 2013.

QIAN, S.; LI, V.C. **Simplified inverse method for determining the tensile strength capacity of strain hardening cementitious composites.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 5, p. 235-246, 2007.

RIGHI, D.P., DA COSTA, F.B.; GRAEFF, A.G.; SILVA FILHO, L. C. P. **Tensile Behaviour and Durability Issues of Engineered Cementitious Composites with Rice Husk Ash**.Revista Matéria, v. 22 (2), p. 1–9, 2017.

SAID, S.H.; RAZAK, H.A.; OTHMAN, I. **Strength and deformation characteristics of engineered cementitious composite slabs with different polymer fibres.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 34, p. 1950-1962, 2015.

ZHANG, J.; WANG, Q.; WANG, Z. **Optimizing design of high strength cement matrix with supplementary cementitious materials.** Construction and Building Materials, v. 120, p. 123-136, 2016.

ZHAO, A.; YANG, J.; YANG, E.-H. **Self-cleaning engineered cementitious composites.** Cement and Concrete Composites, v. 64, p. 74-83, 2015.

RATHOD, J.D.; PATODI, S.C. **Interface tailoring of polyester-type fiber in engineered cementitious composite matrix against pullout.** ACI Materials Journal, v. 107, p. 114-122, 2010.