VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM FIBROCIMENTOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081155

BASSAN DE MORAES; MARIA JÚLIA[1]; SOARES TEIXEIRA; RONALDO[1]; PROENÇA DE ANDRADE; MAXIMILIANO [1]; MITSUUCHI TASHIMA; MAURO[2]; ROSSIGNOLO; JOÃO ADRIANO[1]
[1] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS; [2] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MAJU.BAMORAES@USP.BR

RESUMO: Considerando a busca pela sustentabilidade e a melhoria técnica, esse trabalho tem como objetivo o estudo da influência da cinza de folha de bambu (CFB) como substituição parcial do cimento Portland em fibrocimentos confeccionados pelo processo de extrusão. Para isso, foram confeccionados fibrocimentos com diferentes dosagens, as quais foram submetidas a ensaios físicos e mecânicos. O aumento da relação água/aglomerante associado a incorporação de fibras gerou poros mais conectados nos compósitos, tornando-os mais suscetíveis a ruptura e ao aparecimento de fissuras. Porém, a alta reatividade da CFB melhorou o desempenho mecânico da matriz e o comportamento pós-fissuração dos compósitos.

PALAVRAS-CHAVES: Cinza de folha de bambu, sustentabilidade, extrusão, fibrocimento, caracterização físico-mecânica.

ABSTRACT: Considering the search for sustainability and technical improvement, this work aims to study the influence of bamboo leaf ash (BLA) as partial replacement for Portland cement in fiber cement made by extrusion process. The fibercement specimens were prepared with different dosages, which were subjected to physical and mechanical tests. The increase in the water/binder ratio associated with the incorporation of fibers generated pores more connected in the composites, making them more susceptible to rupture and the appearance of cracks. However, the BLA high reactivity improved the mechanical performance of the matrix and the post-cracking behavior of the composites.

KEYWORDS: Bamboo leaf-ash, sustainability, extrusion, fiber-cement, physical-mechanical characterization.

1 | INTRODUÇÃO

A ideia de sustentabilidade nas indústrias pode ser entendida como o equilíbrio entre necessidades humanas e o uso de recursos naturais. Em meio a esse cenário, a indústria cimentícia tem um papel ambíguo, pois ao mesmo tempo que atua na construção e desenvolvimento de infraestrutura, também é responsável por altos consumos de energia e matérias-primas não-renováveis como a argila e o calcário, além da emissão de gases causadores de efeito estufa, advindos da queima de combustíveis fósseis e reações químicas envolvidas no processo, como a calcinação(1).

Com o objetivo de amenizar tais impactos ambientais e de se obter novas

tecnologias, o setor da construção civil já vem utilizando subprodutos da indústria como material pozolânico para substituição parcial do cimento. Porém, as pozolanas derivadas da agroindústria, apesar de serem geradas em maior quantidade em comparação a de outras indústrias, principalmente em países emergentes, de serem amplamente pesquisadas e apresentarem resultados satisfatórios, ainda não possuem aplicação comercial expressiva [2].

Já o processo de produção de fibrocimento por extrusão tende a trazer benefícios técnicos aos compósitos, além da ser uma alternativa economicamente viável por ter um menor custo de implantação em relação a outros métodos de produção de fibrocimento [3].

Dessa forma, o presente trabalho avaliou a influência de um material pozolânico, com campo de pesquisa pouco aprofundado, a cinza de folha de bambu (CFB), subproduto da agroindústria, como substituição parcial ao cimento Portland, aliada às fibras de polipropileno (PP) na produção de fibrocimento por extrusão (produção de peças em fluxo contínuo forçado através de um molde predefinido).

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A pesquisa utilizou folhas de bambu (*Bambusa vulgaris*) coletadas em Ilha Solteira – São Paulo. A CFB foi produzida pelo processo de autocombustão, no qual a temperatura de queima não é controlada, apenas monitorada através de sensores de temperatura (termopares). Após sua calcinação, a cinza foi peneirada (peneira ASTM #50) por sete minutos para remover eventuais impurezas e folhas não queimadas. Posteriormente, a cinza foi moída por 50 minutos para diminuir seu diâmetro médio e aumentar sua superfície específica em um moinho de bolas com capacidade de 15 kg. A caracterização físico-química, estudo de reatividade desse lote de CFB, do qual pertence a cinza utilizada nesse estudo, e estudo da cinza em argamassas pode ser visualizado no artigo publicado por Moraes et al. [2]

Foram escolhidos materiais semelhantes aos utilizados nas indústrias para a produção dos fibrocimentos dessa pesquisa, exceto pela CFB. O cimento utilizado foi o CPV- ARI, o qual possui um teor de clínquer maior que 95%, (sem adição mineral) que não interferirá na avaliação da atividade pozolânica da CFB. Utilizou-se calcário moído como filler. Foram utilizadas fibras sintéticas de Polipropileno (PP) com 9 mm de comprimento como reforço do fibrocimento, uma vez que possuem resistência à alcalinidade. As fibras sintéticas foram fornecidas pela empresa Saint Gobain S/A. Foram empregadas polpas celulósicas branqueadas Kraft, fornecidas pela empresa Suzano Papel e Celulose, como reforço secundário e controle de fissura. As polpas são derivadas da espécie híbrida *Eucalyptus urograndis* e passaram por um processo de desintegração[4] para serem aplicadas nos fibrocimentos. Para que a matriz cimentícia apresentasse o comportamento reológico desejado, foram utilizados o aditivo retentor de água Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), fornecido pela empresa Aditex S.A. e o superplastificante poliéter carboxilato, conhecido comercialmente como ADVA 175, fornecido pela empresa Grace Brasil Ltda.

2.2 Dosagem

As dosagens das matrizes cimentícias foram baseadas no trabalho desenvolvido por Teixeira et al.[5], similar as dosagens utilizadas pela indústria de fibrocimento, apresentada na Tabela 1.

Matérias-primas	Nomenclatura ou formulação	Cimento Portland	Calcário Moído	CFB	Polpa Celulósica	Fibra PP	Relação Água/ Aglomerantes (cimento Portland e CFB)
(CP)	69,95	27,08	-	2,98	-	0,25	
Cimento Portland 1% PP	(CP1)	69,25	26,81	-	2,95	1,00	0,28
CFB 10% 1% PP	(CP1-CFB 10)	62,33	26,81	6,93*	2,95	1,00	0,31
CFB 15% 1% PP	(CP1-CFB15)	58,86	26,81	10,39**	2,95	1,00	0,33

* 10% em relação a massa de cimento ** 15% em relação a massa de cimento

Tabela 1 - Dosagens utilizadas nas dosagens (% em massa)

Fonte: Própria autoria

Ambos os aditivos retentor de água e superplastificante foram adicionados com teores de 1% em relação aos aglomerantes (cimento Portland e cinza).

2.3 Extrusão

Os fibrocimentos foram extrudados em uma extrusora com rosca helicoidal (tipo Auger), com diâmetro de 75 mm e comprimento de 100 mm, da marca Gelenski, modelo MVIG-05, com uma boquilha de 200 mm de comprimento sendo a velocidade adotada de 4 mm/s. O processo de cura foi baseado no trabalho de Teixeira[3], os corpos-de-prova produzidos foram selados em sacos plásticos por cerca de 48 horas. Após esse período, foram transferidos ainda selados para o banho térmico a 60ºC, onde permaneceram por mais cinco dias. Após o processo de cura, foram cortados por uma serra apropriada, adquirindo as medidas de 160 mm x 50 mm x 15 mm e submetidos aos ensaios físicos e mecânicos.

2.4 Ensaios Físicos

Os valores de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram determinados através da norma ASTM C948 – 81[6]. Foram utilizados 20 corpos-de-prova de cada dosagem para esse ensaio.

2.5 Ensaios Mecânicos

O ensaio realizado foi o de tração na flexão com quatro pontos com base no

procedimento experimental de acordo com RILEM, 1984[7] e Savastano Junior[8]. Foram utilizados 20 corpos-de-prova para esse ensaio. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC DL-30000, sendo o vão inferior de 135 mm e o vão superior de 45 mm, com célula de carga de 5 kN e com velocidade de carregamento de 5 mm/min. O ensaio foi realizado com o auxílio de um deflectômetro para a medição de pequenas deformações, sendo sua precisão de 0,001 mm. Através dos valores obtidos foi possível determinar o módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos ensaios físicos

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) para as dosagens estudadas.

Dosagem/Ensaio	Absorção de água (%)	Densidade Aparente (g/cm^3)	Porosidade Aparente (%)
CP	16,20 ± 0,35	2,038 ± 0,109	33,00 ± 1,60
CP1	17,42 ± 0,66	1,795 ± 0,082	31,25 ± 1,82
CP1-CFB 10	18,15 ± 0,59	1,678 ± 0,009	30,44 ± 0,88
CP1-CFB15	18,85 ± 0,51	1,638 ± 0,008	30,87 ± 0,73

Tabela 2 - Resultados obtidos de AA, DA e PA para as dosagens CP, CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15
Fonte: Própria autoria

As dosagens com a CFB apresentaram menor porosidade aparente, o que pode ser justificado devido ao efeito físico (filler) e químico (formação de géis amorfos) da pozolana na matriz.

Porém, apesar das dosagens que contém fibra apresentarem menor porosidade aparente, também apresentaram um aumento na absorção de água, o que tem relação com a conectividade dos poros. Tal fato pode ser explicado pela aumento da relação água/aglomerante dessas dosagens, o que ocasionou poros mais conectados. Para a dosagem controle (CP), foi utilizada a menor relação a/a (0,25), seguida pela CP1 (0,28), CP1-CFB10 (0,31) e CP1-CFB15 (0,33).

Um estudo feito por Teixeira et al.[5] com fibrocimentos extrudados com a incorporação de fibra PP mostrou, por meio de análises de microtomografia de raios - X, que esses compósitos apresentavam maior quantidade de poros de capilaridade com maiores dimensões e macro poros do que os compósitos apenas com a polpa celulósica, devido à dificuldade no empacotamento das partículas e fibras na microestrutura, assim como a baixa densidade da zona de transição fibra-matriz.

3.2 Análise dos ensaios mecânicos

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos de módulo de ruptura (MOR),

limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE) para as dosagens estudadas.

Dosagem/Ensaio	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m²)
CP	12,07 ± 0,62	12,07 ± 0,62	8,94 ± 0,83	0,38 ± 0,04
CP 1	10,38 ± 0,58	8,66 ± 0,94	8,14 ± 0,95	2,85 ± 0,51
CP1-CFB 10	14,07 ± 0,53	8,94 ± 0,80	7,3 ± 0,79	6,36 ± 0,78
CP1-CFB 15	13,53 ± 0,41	9,14 ± 0,74	6,71 ± 0,91	6,35 ± 0,78

Tabela 3 - Resultados obtidos de MOR, LOP, MOE e EE para as dosagens CP, CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15
Fonte: Própria autoria

A partir da Tabela 3, é possível observar que o módulo de ruptura, ou seja, a resistência à tração na flexão, da dosagem CP1 é menor do que da dosagem CP, o que indica que a incorporação de fibras diminuiu o desempenho mecânico do compósito. Resultado semelhante foi observado por Teixeira et al.[9], o qual justificou tal queda no desempenho devido ao aumento de porosidade que a fibra causa devido a deficiência na sua dispersão na matriz o que, consequentemente, gera uma falha na transferência de tensão entre a fibra e a matriz. De fato, a partir dos ensaios físicos foi possível observar poros mais conectados nas dosagens com fibras PP. A presença desse poros com maiores dimensões dificulta a distribuição de tensões matriz-fibra no pós-fissuração, como a matriz cimentícia se trata de um material frágil, o comprometimento da distribuição de tensões causa um decréscimo no comportamento mecânico e um menor módulo de ruptura. Além disso, poros conectados por si só são defeitos que deixam a matriz mais suscetível a ruptura.

Porém, as dosagens com CFB apresentaram uma melhora do MOR em relação ao controle, o que mostra que a alta reatividade da pozolana[2] não apenas mitigou os efeitos negativos da fibra na matriz, como trouxe um aumento de 21,79 e 12,10% em relação ao controle para as dosagens CP1-CFB10 e CP1-CFB15, respetivamente.

A pozolana melhora o desempenho mecânico das matrizes através de sua ação química e física. Quimicamente, as sílicas e aluminas amorfas presentes na pozolana reagem com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, aumentando a resistência da matriz. Fisicamente, a pozolana age através do efeito filler, no qual as partículas pequenas da pozolana preenchem os espaços vazios da matriz, diminuindo sua porosidade como visto nos ensaios físicos, tornando o material mais coeso, dificultando sua ruptura, e através do efeito de nucleação, na qual permite-se uma maior reação da partícula de cimento, aumentando os produtos responsáveis pela resistência mecânica[2].

Essa melhoria é ainda mais expressiva quando se calcula o ganho de resistência proposto por Payá, Monzó e Borrachero[10], parâmetro que compara a resistência de uma dosagem controle, com uma correção baseada na percentagem de substituição. Uma vez que ao se retirar cimento Portland da mistura, a tendência é que a resistência diminua de forma proporcional, como seria o caso de uma substituição por material inerte e de granulometria semelhante, por exemplo. Porém, como a CFB é altamente

reativa[2] ela gerou um ganho de resistência de 29,52% para a dosagem com 10% de substituição e de 31,88% para a dosagem com 15% de substituição, em relação a dosagem controle. Mas em relação a dosagem CP 1, o ganho de resistência foi de 50,61% para a dosagem CP1-CFB10 e de 53,35% para a CP1-CFB15.

O limite de proporcionalidade indica o final do regime de comportamento elástico e começo do comportamento plástico, no ensaio é caracterizado pelo aparecimento da primeira fissura[11]. A dosagem sem incorporação da fibra PP apresentou LOP com o mesmo valor de MOR, tal comportamento é típico de materiais frágeis.

O decréscimo do LOP nas dosagens com fibra pode estar associado ao aumento do teor de água, uma vez que, como visto nos ensaios físicos, essas dosagens apresentaram poros mais conectados, mais suscetíveis ao aparecimento da primeira fissura. Porém, também é possível se observar com os valores do LOP, a influência positiva da CFB no desempenho mecânico do compósito, apesar de apresentar mais poros conectados, a maior resistência da matriz causou um retardo na fissuração. As dosagens com incorporação de fibras apresentaram MOR > LOP, o que caracteriza resistência pós fissuração.

Um estudo feito por Xu, Deng e Chi[12], utilizando a técnica da nanoidentação, mostrou que o aumento da relação água/cimento ocasionou uma queda nos valores do módulo de elasticidade em uma matriz cimento/fibra PP. Tal correlação também pode ser observada nesse estudo, uma vez que os valores de MOE decaíram conforme o aumento do teor de água nas dosagens. O aumento do teor de água causou um aumento nos poros conectados como visto nos ensaios físicos, os quais tornam a matriz mais suscetível a sofrer deformações no regime elástico. Ademais, a incorporação de fibras, uma vez que a mesma apresenta baixo módulo de elasticidade, potencializa a maior deformação da matriz e consequentemente, a diminuição do MOE.

A energia específica representa a tenacidade do material e seu aumento em fibrocimentos ocorre devido a ação das fibras no pós-fissuração, as quais criam pontes através das fissuras propagadas na matriz, evitando-se uma ruptura frágil[13]. A adição da CFB aumentou significativamente a energia específica, o que mostra que a pozolana interagiu muito bem com a fibra sintética, melhorando a propagação dos esforços e, por consequência, seu comportamento mecânico pós-fissuração.

O alto valor da energia específica para os compósitos com CFB também pode ser devido a incorporação de material pozolânico altamente reativo na matriz[2], reagindo com o hidróxido de cálcio, o que pode ter contribuído para a diminuição alcalinidade do compósito e para a preservação da polpa celulósica[14]. Dessa forma, a partir da utilização da CFB obteve-se uma otimização do comportamento mecânico da matriz, aliado a uma melhor condição do reforço secundário, o que permitiu um bom comportamento fibra-matriz e por consequência, um ótimo desempenho pós-fissuração, quando comparado com as dosagens sem fibra e sem CFB.

4 | CONCLUSÕES

Os ensaios físicos mostraram que a incorporação da CFB nas dosagens causa uma diminuição da porosidade aparente devido ao efeito físico-químico da pozolana na matriz. Porém, o aumento da relação água/aglomerante associado com a incorporação

de fibras gerou poros mais conectados nas dosagens CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15. Já os ensaios mecânicos mostraram que esses poros deixam a matriz mais suscetível a ruptura, ao aparecimento de fissuras e a deformações elásticas.

A alta reatividade da CFB melhorou o desempenho mecânico da matriz e mitigou os efeitos negativos da incorporação de fibras, além de possibilitar um melhor trabalho matriz e reforço no pós-fissuração, quando comparado com os compósitos sem a incorporação da pozolana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2019 / 11949-8.

REFERÊNCIAS

1. OLIVEIRA, M.G.F. Roadmap Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019

2. MORAES, M. J. B. *et al*. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 208, p. 369-380, 2019.

3. TEIXEIRA, R. S. **Efeito das fibras de curauá e de polipropileno no desemprenho de compósitos cimentícios produzidos por extrusão**, 2015. 147 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Engenharia de São Carlos (USP), 2015.

4. FILOMENO, R, H. **Avaliação da influência da umidade relativa da atmosfera de cura na carbonatação de materiais de fibrocimento**. 2018. 111f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

5. TEIXEIRA, R. S. et al. Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (Ananas erectifolius) or polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 97–110, 2019.

6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C 948-81: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete.** West Conshohocken, USA, 2016.

7. REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DES RECHECHES SUS LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM. RILEM 49-TRF: testing methods for fibre reinforced cment-based composites. **Matériaux at Constructions**, v. 17, n. 102, p. 441–456, 1984.

8. SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 144 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica (USP), 2000.

9. TEIXEIRA, R. S. et al. Impact of content and length of curauá fibers on mechanical behavior of extruded cementitious composites: Analysis of variance. **Cement & Concrete Composites**, v. 102, p. 134–144, 2019.

10. PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 57–61, 2001.

11. BENTUR, A.; MINDESS, S. Test methods. In: BENTUR, A.; MINDESS, S. (Ed.). **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007. p. 186–234.

12. XU, L.; DENG, F.; CHI, Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 619–638, 2017.

13. BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre–cement interactions: Stress transfer, bond and pull-out. In: BENTUR, A.; MINDESS, S. (Ed.). **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007c. p. 31– 104.

14. MEJIA-BALLESTEROS, J. E. et al. Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. **Cement & Concrete Composites**, v. 98, p. 49–60, 2019.