

DURABILIDADE DE ESPUMAS SINTÁTICAS DE CIMENTO COM USO DE CAULIM E CINZA DE CASCA DE ARROZ

THAMIRES ALVES DA SILVEIRA¹; FELIPE VAHL RIBEIRO², RAFAEL AVILA DELUCIS³

¹*Universidade Federal de Pelotas – thaamiresasilveira@gmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – felipe.vs.ribeiro@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil devido a seus altos níveis de resistência mecânica, durabilidade e viabilidade econômica. Em 2020, foram consumidas cerca de 4,1 gigatoneladas do material em todo o mundo (DA SILVA et al., 2021). No entanto, sua cadeia produtiva é marcada pelo elevado consumo energético e uso intensivo de recursos não renováveis. Diante desse cenário, têm-se intensificado os esforços para reduzir os impactos ambientais por meio da substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (SCMs), como resíduos industriais, pozolanas naturais e materiais ativados.

Paralelamente, cresce a demanda por materiais de construção mais leves e com propriedades funcionais ajustáveis. Nesse contexto, espumas sintéticas cimentícias ganham destaque por combinarem baixa densidade, boa resistência mecânica e propriedades térmicas e acústicas superiores, graças à incorporação de microesferas de vidro (AFOLABI; KANNY; MOHAN, 2021). Essas espumas têm se mostrado promissoras como núcleo em painéis sanduíche pré-fabricados, que proporcionam redução de peso, agilidade construtiva e melhor desempenho funcional (O'HEGARTY; KINNANE, 2020). O presente trabalho propõe o desenvolvimento e a caracterização de espumas cimentícias com reutilização de subprodutos (caulim e cinza de casca de arroz) em forma de uma blenda binária.

2. METODOLOGIA

Para confecção da matriz foi utilizado cimento Portland branco da marca Axton, que seguiu os padrões da ASTM C150-07. A matriz foi incorporada com microesferas de vidro modelo S38HS (semelhante a K46) da marca 3M™, com densidade de 0,38 g/cm³, feitas de vidro de borossilicato, as quais atuaram como agente espumante. As cinzas de casca de arroz usadas foram obtidas mediante queima controlada e doadas pelo Grupo Pilecco Nobre. O caulim residual foi doado pela empresa baiana Monte Pascoal. Previamente ao processo de moldagem, o caulim passou por secagem em estufa a 105 °C por 24 h. Após, o material foi moído em moinho de jarros por 3,5 h. Conforme o ensaio de Chapelle modificado, o caulim não apresentou atividade pozolânica com um com consumo de hidróxido de cálcio de 152,47 mg de Ca(OH)₂, enquanto que a CCA apresentou alta atividade, tendo atingido 1236,96 mg de Ca(OH)₂ para essa propriedade. Ademais, para manter a plasticidade e slump em torno de 24 ± 2 mm, foi utilizado o aditivo MC-Powerflow 1180 nas misturas com a blenda.

Os materiais residuais e o cimento foram caracterizados quanto à granulometria e à composição química. A distribuição do tamanho de partículas foi determinada por difração a laser em um analisador CILAS 1180, utilizando álcool isopropílico como dispersante e agitação contínua a 200 rpm. A composição química dos espécimes foi obtida por fluorescência de raios X (FRX) em um equipamento Rigaku RIX 2000, técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes ($Z > 10$) e quantificar suas concentrações.

Os traços foram elaborados seguindo a metodologia utilizada nos estudos de Bas et al., (2019) e Jiang et al. (2016). Níveis iniciais de 0,3 de relação água cimento e 5% de microesferas em relação à massa de cimento foram testados. A partir desse primeiro traço, os subprodutos foram testados em proporções de 5% e 10% e 20%. Em relação ao processo de moldagem das espumas, foi realizado conforme o trabalho de Bas et al., (2019), em que a primeira etapa envolveu a mistura primária dos ingredientes da matriz de forma uniforme, juntamente com a água, a blenda de resíduos e os aditivos plastificantes. Pela sua estrutura frágil, as microesferas foram misturadas por último, como uma segunda etapa. A mistura foi feita com auxílio de misturador de argamassa.

A trabalhabilidade das misturas foi avaliada por meio de um ensaio de mini-slump, resultando em níveis de 24 ± 2 mm em todos os casos. Amostras endurecidas foram mantidas a 20°C e 60% de umidade relativa por 24 h. Aos 28 dias de cura, alguns corpos de prova foram envelhecidos por meio de 10 ciclos de molhagem (por imersão em água por 24 h) e secagem (em estufa a 60°C por 24 h). Após, os corpos de prova foram analisados por microscopia ótica e ensaiados mecanicamente em compressão a uma taxa de carregamento de 500 N/s, usando uma máquina universal de ensaios modelo DL30000 da marca EMIC. Em relação as propriedades de densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente, os corpos de prova, após os períodos de cura, foram imergidos em água por 24 h e em estufa (105°C), pelo mesmo período.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da composição elementar e da composição granulométrica dos materiais podem ser observados na Tabela 1 e na Figura 1, respectivamente. Os valores encontrados para as composições elementares, com destaque para os teores altos de silício e alumínio, estão de acordo com a literatura. As curvas granulométricas demonstram que a cinza de casca de arroz é um material mais fino que o caulin. Já em relação ao caulin, é um material mais grosso que a CCA e que o cimento, com diâmetro médio de $67.80\text{ }\mu\text{m}$.

Tabela 1 – Composição química elementar dos materiais.

	Si	Al	Fe	Ti	Zr	K	Ca	Mg	Mn	S	Outros
Caulim	64,94	24,17	3,77	3,94	1,54	0,91	0,56	-	-	-	0,15
CCA	90,57	-	0,24	-	0,028	6,04	1,59	-	1,41	-	0,11
Cimento branco	22,50	4,50	0,40	-	-	-	66,30	1,00	-	2,80	-

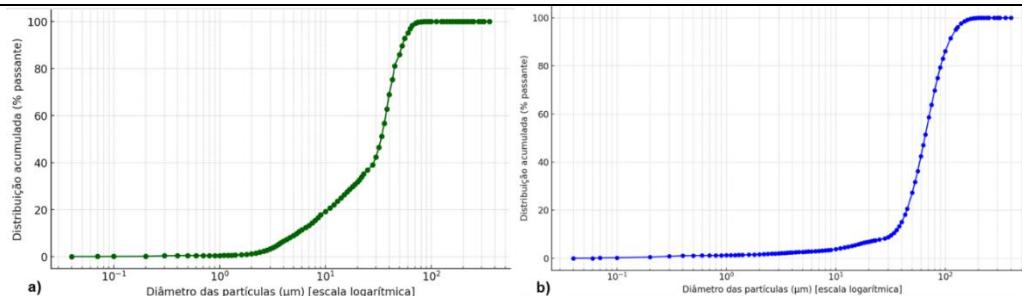


Figura 1 - Curvas granulométricas da CCA (a) e do caulin (b).

Em relação ao ensaio mecânico de resistência à compressão, nas amostras curadas ao ar por 28 dias e as que foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem, estão apresentados na Figura 2. Após 10 ciclos de molhagem e secagem, as curvas de compressão indicam materiais mais frágeis, com quedas de pico e de deformação, conforme apresentado na Figura 2 (a e b) e também com valores de resistência (Figura 2 c)) menores, sendo o controle o mais sensível (\approx

50% de resistência). Esse comportamento está coerente com os resultados físicos (Figura 3), que indicaram para o controle maior absorção de água (17%) e porosidade aparente (26%), o que favoreceu a deterioração mecânica.

Por outro lado, a formulação com 20% de caulim mostrou melhor desempenho, apresentando valores de resistência superiores ao controle tanto nas condições envelhecidas quanto não envelhecidas, com ganhos da ordem de 40%. Esse resultado está associado ao efeito filer do caulim, que promoveu maior empacotamento de partículas e aumento da densidade aparente ($1,77 \text{ g/cm}^3$), resultando em menor porosidade (15%) e, consequentemente, maior resistência.

As composições contendo CCA (5–10%) também apresentaram ganhos importantes. O acréscimo de sílica amorfia contribuiu para o refino da microestrutura, reduzindo a conectividade de poros e melhorando a resistência frente aos ciclos de degradação. Destaca-se a formulação com 10% de caulim + 10% de CCA, que alcançou a maior resistência inicial (51 MPa) e manteve desempenho satisfatório após envelhecimento, com queda de cerca de 35%, ainda superior ao controle. Além disso, a porosidade dessas formulações permaneceu em torno de 18–20%, significativamente menor que a do controle. Resultados similares foram relatados por outros autores que observaram que a incorporação de fileres minerais e adições pozolânicas refinam a estrutura porosa e aumentam a durabilidade de compósitos cimentícios submetidos a ciclos de molhagem e secagem (WARDHONO; SOFIANTO; WULANDARI, 2025).

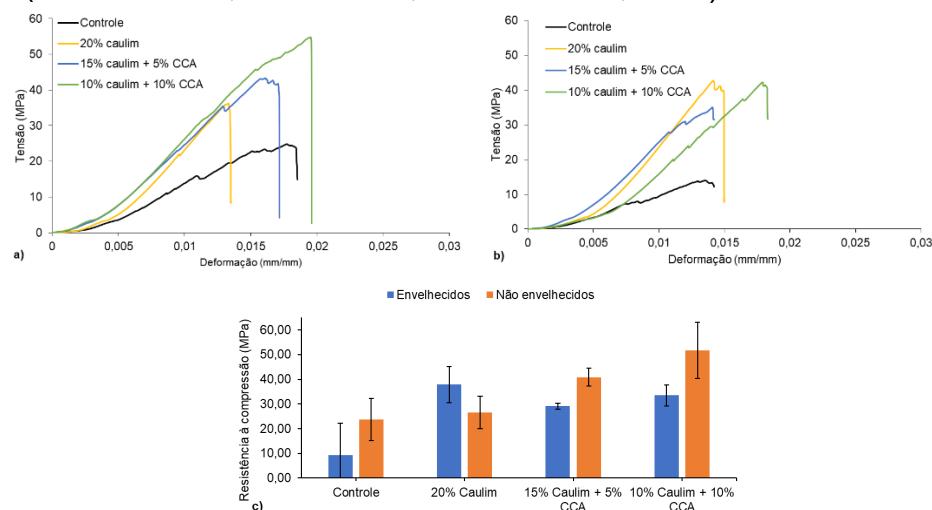


Figura 2 - Curvas tensão x deformação das espumas não envelhecidas (a) e envelhecidas (b) e resistência à compressão (c).

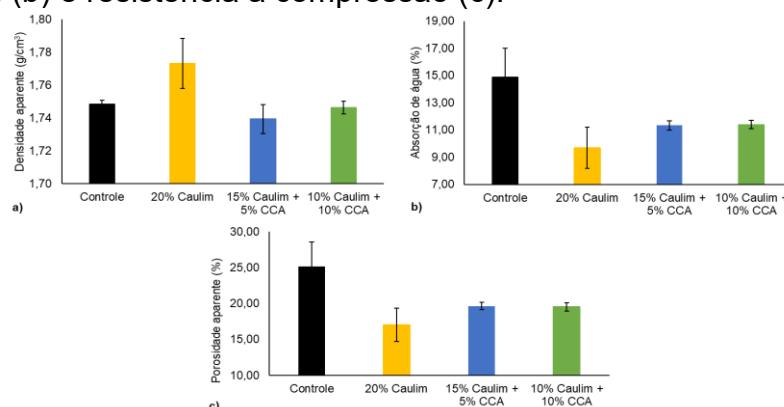


Figura 3 – Propriedades físicas dos compósitos em relação a densidade aparente (a) absorção de água (b) e porosidade aparente (c).

A análise microestrutural confirma os resultados físicos e mecânicos. Na amostra com CCA (Figura 4a), observam-se partículas bem distribuídas que atuam no preenchimento dos vazios e refinamento da porosidade, o que explica a menor absorção de água e a manutenção da resistência após o envelhecimento. Já na amostra com caulim (Figura 4b), nota-se boa interação com a matriz cimentícia, atuando como efeito filer e aumentando a densificação, o que justifica os maiores valores de resistência à compressão. Assim, tanto o caulim quanto a CCA contribuíram para reduzir a porosidade e melhorar o desempenho.

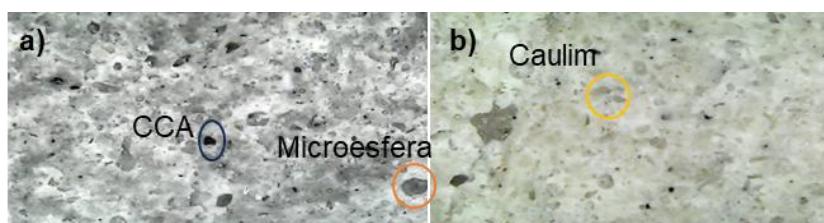


Figura 4 - Imagem microscópio digital 10% caulim + 10% CCA (a) e 20% caulim (b).

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que a incorporação de caulim residual (filer) e cinza de casca de arroz (pozolana) em espumas sintéticas de cimento é uma solução tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, pois combina empacotamento e refino de poros para mitigar a degradação em ciclos de molhagem–secagem, além de proporcionar melhores desempenhos mecânicos e físicos. Essa combinação promove o empacotamento de partículas e o refino da porosidade, reduzindo os danos decorrentes de ciclos de molhagem e secagem, além de melhorar propriedades físicas e mecânicas em comparação ao controle. Dessa forma, a formulação proposta se apresenta como uma solução promissora para aplicação em núcleos leves de painéis sanduíche, contribuindo para a redução do consumo de clínquer e para o desenvolvimento de materiais construtivos mais duráveis e de menor impacto ambiental.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFOLABI, O. A.; KANNY, K.; MOHAN, T. P. Processing of Hollow Glass Microspheres (HGM) filled Epoxy Syntactic Foam Composites with improved Structural Characteristics. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 28, n. 1, p. 116–127, 2021.
- BAS, H. et al. Strain rate-dependent compressive behavior and failure mechanism of cementitious syntactic foams. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. March 2018, p. 70–80, 2019.
- DA SILVA, M. R. C. et al. Valorization of kaolin mining waste from the Amazon region (Brazil) for the low-carbon cement production. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, n. October, 2021.
- JIANG, J. et al. Investigation of the properties of high-porosity cement foams based on ternary Portland cement – metakaolin – silica fume blends. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 181–190, 2016.
- O’HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117145, 2020.
- WARDHONO, A.; SOFIANTO, M. F.; WULANDARI, M. Investigation on the effect of natural kaolin substitution on geopolymers mortar made by a combination of fly ash and rice husk ash. **Edelweiss Applied Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 1077–1087, 13 mar. 2025.