



ESPUMAS VÍTREAS DE VIDRO RECICLADO E CINZA DE CASCA DE ARROZ: AVALIAÇÃO PARA POTENCIAIS APLICAÇÕES EM ISOLAMENTO TÉRMICO

Bertolo, C.K.; Stadler, P.A.; Klekte, C.; Venquiaruto, S.D.; Menezes, J.W. e Valsecchi, C.^{1,*}

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), av. Tiarajú 810, Ibirapuitã - Alegrete, RS 97546-550.

carlosbertolo.aluno@unipampa.edu.br; pedrostadler.aluno@unipampa.edu.br;
carissomkletke.aluno@unipampa.edu.br; simonevenquiaruto@unipampa.edu.br;
jacsonmenezes@unipampa.edu.br; *chiaravalsecchi@unipampa.edu.br

Resumo

Neste trabalho, resíduos ambientais como o vidro não reciclado e a cinza da casca de arroz (CCA) foram utilizados na produção de espumas de vidro como uma alternativa sustentável para melhorar o conforto térmico em edificações e diminuir o impacto ambiental. Espumas vítreas com misturas 80/20% - x% de vidro reciclado/CCA e diversos teores (x% = 0%, 2% e 5%) de calcita como agente espumante foram produzidas. A espumação aconteceu em forno mufla entre 925 e 1000°C por 30 min. O processo foi avaliado por densidade aparente, distribuição de poros e resistência à compressão axial. As espumas apresentam uma ótima eficiência de espumação e homogeneidade de poros, com baixas densidades entre 0,3036 e 0,4152 g/cm³, e resistências à compressão entre 0,4018 e 1,322 MPa. A condutividade térmica de 0,1193 W/mK foi obtida para a melhor espuma, respeitando os parâmetros comerciais e demonstrando ser própria como isolante térmico em edificações.

Palavras-chave: sustentabilidade, espumas isolantes, economia circular

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a construção civil tem sido reconhecida como um dos setores que impacta negativamente o meio ambiente devido à larga exploração e consumo de matérias-primas de origem natural, e também pela produção de vastos volumes de resíduos em aterros.

Além disso, as mudanças climáticas também associadas à degradação ambiental, estão cada vez mais presentes e recorrentes. cada vez mais recorrentes (1). Essas fenômenos no clima promovem desconforto térmico no interior das edificações e fomentam um aumento no consumo de energia (2).

O isolamento térmico de uma edificação é o meio mais eficaz para se alcançar o conforto térmico no interior e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia (3). Embora já existam na indústria da construção civil diversos materiais de origem inorgânica que podem ser aplicados como revestimentos térmicos, tais como poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS), espuma de poliuretano, dentre outros, as matérias-primas que dão origem a esses materiais geralmente advém de recursos naturais não renováveis, o que impacta negativamente o meio ambiente (3).

Diante disso, materiais que sejam originados de resíduos e/ou subprodutos de origem urbana ou industrial tem ganhado destaque na produção de elementos construtivos, como uma forma de promover construções mais sustentáveis (4,5).

As espumas vítreas são materiais porosos originados a partir da sinterização de misturas contendo vidro moído e agente(s) capaz(es) de gerar gás durante sua decomposição (agentes espumantes), geralmente compostos por carbono ou substância carbonáceas. Devido à sua elevada porosidade, apresentam baixa densidade e condutividade térmica, tornando-as ideais para aplicações em isolamento térmico de edificações. Além do vidro e do agente espumante, alguns agentes de origem mineral, como a sílica (SiO_2) podem ser incorporados (6).

De fato, estima-se que cerca de 1,3 milhões toneladas de resíduos de vidro sejam produzidos anualmente no Brasil e descartados em aterros sanitários (7). Além disso, o Brasil é um forte produtor de arroz mundialmente, com 10 milhões de toneladas anuas (8). O beneficiamento do grau gera um resíduo volumoso, a casca de arroz, ou após sua queima, a cinza da casca de arroz (CCA) (9). Este resíduo é predominantemente constituído em sílica (10), e já apresentou interessante para diferentes aplicações, como aditivo para concreto e matéria prima para produção de vidro, entre outras (10,11).

Nesse sentido, as espumas vítreas a partir de vidro reciclado tendo como aditivo a cinza da casca de arroz tornam-se materiais alternativos atraentes para a sustentabilidade, reduzindo o acúmulo de resíduos em aterros, minimizando a extração de novas matérias-primas de origem natural e o consumo de energia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das espumas vítreas foram utilizados pó de vidro (PV) oriundo de reciclagem, passante na peneira de 150 μm ; cinza da casca de arroz (CCA) fornecida pela empresa SVA (Alegrete, RS) como aditivo, nas granulometrias passantes de 150 μm ou 75 μm ; carbonato de cálcio (CaCO_3 , P.A., Synth) como agente espumante. As amostras foram produzidas tendo uma massa total de 40 g, sendo 2% ou 5% de CaOH (0,8 g ou 2 g) e 98% de mistura PV-CCA, na proporção 80-20% (31.4 g e 7.8g, respectivamente). Duas amostras controle foram produzidas sem a CCA e sem o agente espumante, conforme as composições detalhadas na Tabela 1, em percentagem em massa.

Figura 1. a) Pó de vidro reciclado peneirado ($< 150 \mu\text{m}$); b) cinza da casca de arroz peneirada ($< 75 \mu\text{m}$).



Tabela 1. Composição das espumas produzidas

	AM 1	AM 2	AM 3	CT 1	CT 2
PV	78,5%	78,5%	76%	80%	98%
CCA	19,5%	19,5%	19%	20%	-
CaCO_3	2%	2%	5%	-	2%
Temp	1000 °C	1000 °C	1000 °C	925 °C	925 °C

Em detalhes, a diferença entre a Amostra 1 e 2 está na granulometria da CCA, passante da peneira 150 μm (Amostra 1) ou da peneira de 75 μm (Amostra 2). Após a pesagem e homogeneização dos materiais, para a moldagem foi adicionada água destilada em 4% em massa (1,6 g). A moldagem foi realizada com uma prensa manual (Bovenal), aplicando-se uma força de 15 toneladas, em moldes metálicos de 39,70 mm x 74,60 mm. Após a desmoldagem, as amostras foram colocada em uma estufa por 24 horas a uma temperatura de 55°C para remover toda a umidade residual.

Figura 2. Amostras após compressão manual e desmoldagem



Posteriormente, as amostras foram levadas ao forno mufla (Inti) por 30 minutos, em diversas temperaturas entre 925°C e 1000°C, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. O intervalo escolhido foi avaliado para encontrar as temperaturas ótimas de espumação para cada composição inicial da mistura: as melhores condições encontradas estão relatadas na Tabela 1. As espumas produzidas foram comparadas em termos de variação de distribuição de tamanho de poros, densidade aparente, resistência à compressão e condutividade térmica.

A distribuição do tamanho dos poros foi realizada a partir das imagens das espumas retificadas, utilizando o software ImageJ, considerando 200 poros para cada amostra. Para compensar a falta de esfericidade perfeita, o diâmetro relatado foi o valor médio de três medidas ao longo de três direções para cada poro.

A densidade aparente das espumas vítreas foi determinada dividindo-se a massa (g) pelo volume (cm^3). As densidades inicial e final foram calculadas medindo a massa com balança analítica e as dimensões com paquímetro antes e após o processo de espumação. As espumas foram primeiramente regularizadas e cortadas em retângulos de ca. 5cm x 3 cm; as medições foram coletadas em triplicata.

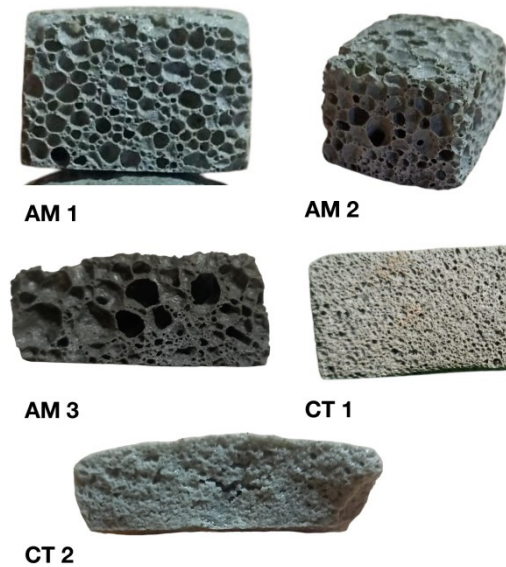
A resistência à compressão da espuma vítrea foi determinada com auxílio de uma prensa (AGS-X, SHIMADZU) aplicando a carga com uma velocidade de 1 mm/min até a ruptura da espuma (força máxima aplicada). A resistência à compressão (MPa) foi calculada dividindo a força máxima (N) encontrada pela área (mm²) da amostra ensaiada.

A condutividade térmica do material foi medida através do equipamento LaserComp, modelo FOX 200, nas faixas de temperatura entre 10 °C a 35 °C e outro entre 35 °C e 60 °C, simulando assim as condições reais de temperatura no inverno e no verão do sul do Brasil. As espumas testadas foram retificada em formato quadrado, possuindo uma área 276,91 cm² e espessura de 2,147 cm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme relatado por Fernandez *et al.*, o processo de espumação é um balanço delicado do amolecimento do vidro, que precisa manter uma densidade elevada, para poder reter os gases gerado ao seu interno (12). Se fundir demais, as bolhas podem escapar do material, diminuindo as chances de espumação. Por isso, diferentes temperaturas entre 925 °C e 1000 °C foram testadas para as 5 composições de amostras apresentadas, e somente os melhores resultados de espumação, encontrados nas temperaturas descritas na Tabela 1, serão discutidos.

Figura 3. Espumas produzidas nas melhores condições de temperatura de espumação



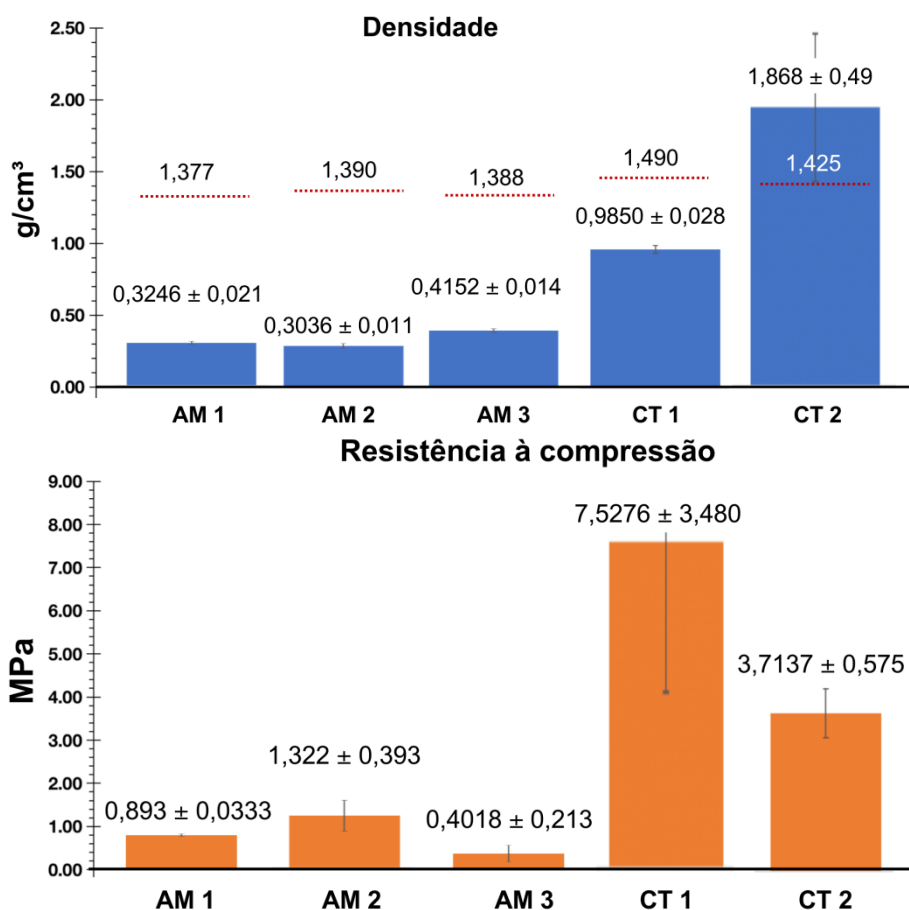
As espumas produzidas são representadas na Figura 3, assim como as distribuições de tamanho de poros após avaliação de 200 poros para cada espuma, estão resumidas na Tabela 2. Comparando as imagens, é possível perceber algumas diferenças importantes tanto no processo de espumação, quanto na homogeneidade da distribuição dos poros. As amostras 1 e 2, contendo 19,5% de CCA e 2% de calcita, apresentam uma espumação eficiente e homogênea ao longo de todas as dimensões das amostras, sem diferenças perceptíveis devido à diferente granulometria da CCA. Em particular, as espumas AM 1 e AM 2 apresentam 79,8% e 82,1% de poros inferiores a 1,545 mm, assim como somente 1,1% e 1,6% de poros superiores a 3,99 mm, respectivamente. Já a amostra 3 (AM 3), com 5% de calcita, apresenta uma espumação eficiente, porém, com distribuição de tamanho de poros desigual. Na parte inferior da amostra, em contacto com o material refratário dentro do forno, apresenta poros menores, que vão aumentando em direção à parte superior da amostra. De fato, somente 68,8% dos poros são encontrados inferiores a 1,545 mm, e uma percentagem maior, de 4,3%, de poros acima de 3,989 mm foram medidos. Quanto às amostras controle, a amostra sem calcita (CT 1) teve uma espumação homogênea, porém apresentando poros muito pequenos em respeito às amostras com agente espumante: 97,8 % apresenta poros inferiores a 1,545 mm de tamanho. Por fim, o controle sem CCA (CT 2) não espumou de forma efetiva, dentro do intervalo de temperatura testado. Aumentar a temperatura não contribuiu com a melhora da espumação, já que houve fusão completa do pó de vidro, vitrificando o material.

Tabela 2. Distribuição percentual do diâmetro médio de 200 poros para cada espuma

Diâmetro médio	AM 1	AM 2	AM 3	CT 1
<0,892 mm	22,4 %	23,9 %	20,43 %	31,9 %
<1,055 mm	49,82 %	47,4 %	41,9 %	60,4 %
< 1,545 mm	79,8 %	82,1 %	68,8 %	97,8 %
> 3,99 mm	1,1 %	1,6 %	4,3 %	-

O tamanho médio dos poros influi diretamente na densidade aparente das espumas produzidas (13), conforme representado em Figura 4a. As linhas tracejadas vermelhas representam a densidade da amostra antes da espumação.

Figura 4. a) Densidade iniciais e finais, e b) resistência à compressão das espumas



No gráfico, é possível perceber que as espumas AM 1, AM 2 e AM 3 possuem densidades aparentes próximas do valor 0,3 g/cm³, considerado o patamar ótimo para espumas de vidro comerciais (14). Particularmente, aplicando um test t de

Student ($p < 0.05$), as amostras AM 1 e AM 2 são estatisticamente iguais e significativamente diferentes da amostra AM 3, se tornando assim ainda mais viáveis como espumas comerciais ($0,3246$ e $0,3036$ g/cm³, respectivamente). As espumas controle possuem densidades mais elevadas, em particular o controle sem CCA (CT 2), que acabou vitrificando e apresentou densidade aumentada após o processo de combustão (15). A amostra controle CT 1, sem agente espumante, embora apresentou um bom processo de espumação, o mesmo não foi eficiente o suficiente para alcançar as densidades características das espumas comerciais. Com isso, a sinergia entre calcita e CCA se torna importante para uma espumação eficiente, nos teores avaliados.

Por outro lado, em Figura 4b são representadas as resistências à compressão axial das espumas produzidas: conforme a literatura, um aumento de densidade aparente é relacionado com uma maior resistência (13). Em particular, espumas de vidro comercial possuem resistência à compressão axial entre 0.4 e 6 MPa, dependendo do nível de porosidade. Assim, as espumas AM 1, AM 2 e AM 3, apresentando valores de 0,893, 1,322 e 0,401 MPa, respectivamente, encontram os requerimentos das espumas comerciais. Novamente, aplicando um test t de Student ($p < 0.05$), as amostras AM 1 e AM 2 são estatisticamente iguais e significativamente diferentes da amostra AM 3. Os valores de densidade e resistência à compressão são similares a quanto já relatado na literatura: Wu *et al.* encontrou densidades de 0.2 a 0.4 g/cm³ e resistência de 1.5 MPa para espumas de vidro com 2% cinzas de carvão e SiC como agente espumante (16); Owwoeye *et al.* relataram densidades entre 0,34 e 0,46 g/cm³ com resistências entre 0,9 e 2.65 MPa para espumas de vidro reciclado (85%) e vidro de água (silicato de sódio, 15%), usando diferentes granulometria do pó de vidro inicial (17). Por fim, Fernandez *et al.* relataram uma densidade de 0.36–0.41 g/cm³ e resistência de 0.51 MPa, em espumas utilizando cinza da casca de arroz e calcita como agente espumante, na proporção de 78% PV, 16% CCA e 6% calcita (13). As espumas neste trabalho se tornam assim mais sustentáveis e eficientes economicamente, já que é aproveitada uma maior quantidade de resíduo agrícola e utilizada uma menor concentração de agente espumante.

Considerando os resultados de densidade, homogeneidade de distribuição de poros e resistência à compressão, as espumas AM 1 e AM 2 apresentam as melhores qualidades de forma comparável, independentemente da granulometria da CCA

utilizada. Com isso, a AM 1 foi escolhida para a análise de condutividade térmica, a qual foi encontrada $0,1193 \pm 0,0069$ W/m.K na faixa de 10-35°C e $0,1270 \pm 0,0101$ W/m.K na faixa de 35-60°C. De acordo com Scheffler e Colombo, geralmente quanto mais denso for o material, menor será sua condutividade térmica, ou seja, melhor será sua capacidade de isolamento térmico (6). A condutividade encontrada também reflete valores relatados na literatura, para espumas similares (12, 13, 15, 17). Considerando que o requerimento padrão para utilização de um material como isolante térmico é não ultrapassar uma condutividade de 0.25 W/m.K (17), podemos assim concluir que as espumas de vidro deste trabalho, produzidas utilizando cinza da casca de arroz como aditivo e somente 2% de carbonato de cálcio como agente espumante podem ser classificadas e usadas em edificações como isolante térmico sustentável.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, diferentes espumas de vidros foram produzidas utilizando pó de vidro, cinza da casca de arroz como aditivo, nas granulometrias inferiores a 150 μm e 75 μm , e 2% e 5% de teor de carbonato de cálcio como agente espumante. Após encontrar a temperatura de espumação mais eficiente, as amostras foram comparadas em respeito à distribuição de poros, densidade aparente e resistência à compressão axial. Entre todas, a amostra AM 1 com 78,5% de vidro reciclado, 19,5% de CCA (< 150 μm) e 2% de calcita se demonstrou a mais eficiente, demonstrando uma densidade aparente de $0,3246 \pm 0,022$ g/cm³, resistência de $0,893 \pm 0,033$ MPa e condutividade térmica de $0,1193 \pm 0,0069$ W/m.K. Estes valores encontram-se de acordo com os parâmetros das espumas comerciais. Assim, esta espuma de vidro se torna uma alternativa sustentável e economicamente viável para materiais utilizados como isolantes térmicos em edificações.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao suporte financeiro dado pela Fapergs e CNPq (Bolsista Probic e PITIB; projeto 407045/2021-0).

REFERÊNCIAS

1. MEHRZAD, S. *et al.* Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings. *BUILDING AND ENVIRONMENT*, v. 211, p. 108753, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108753>.
2. AHMAD, M. *et al.* Potential use of recycled materials on rooftops to improve thermal comfort in sustainable building construction projects. *FRONTIERS IN BUILT ENVIRONMENT*, v. 8, p. 1014473, 2022. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1014473>.
3. CETINER, I.; SHEA, A. D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *ENERGY AND BUILDINGS*, v. 168, p. 374-384, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.019>.
4. MA, L.; ZHANG, L. Evolutionary game analysis of construction waste recycling management in China. *RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING*, v. 161, p. 104863, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104863>.
5. AMIN, M. N. *et al.* Prediction model for rice husk ash concrete using AI approach: Boosting and bagging algorithms. *STRUCTURES*. Elsevier, p. 745-757, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.080>.
6. SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2005.
7. PIZZATTO, F. O. *et al.* Análise de desempenho de placas cerâmicas porosas obtidas com resíduo de vidro e lama de cal para aplicação em fachadas ventiladas. *CERÂMICA*, v. 67, p. 388-398, 2021. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673843037>.
8. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Arroz – Brasil: Série Histórica de Produção. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 28 de jan. de 2024.
9. STRACKE, M. P. *et al.* Cinza de casca de arroz como reservatório molecular de água para a produção de soja. *BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT*, v. 6, n. 1, p. 949-962, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-066>.
10. GONÇALVES, J.; DA SILVA, G.; LIMA, L.; MORGADO, D.; NALIN, M.; ARMAS, L.E.G.; VALSECCHI, C.; MENEZES, J.W. Production of Transparent Soda-Lime Glass from Rice Husk Containing Iron and Manganese Impurities. *CERAMICS*, v.3, p. 494-506, 2020. <https://doi.org/10.3390/ceramics3040040>
11. LI, J. *et al.* Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 175, p. 64-76, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158>.
12. FERNANDES, H. R.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *CERAMICS INTERNATIONAL*, v. 35, n. 1, p. 229-235, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019>

13. FERNANDES, F. A. *et al.* Glass foams produced from soda-lime glass waste and rice husk ash applied as partial substitutes for concrete aggregates. *PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*, v. 128, p. 77-84, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.044>
14. GIBSON, L.J.; ASHBY, M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press; 2nd ed. New York, 1997.
15. Teixeira, L.B.; Fernandes V.K.; Maia, B.G.O.; Arcaro, S.; Novaes de Oliveira, A.P. Vitrocrystalline foams produced from glass and oyster shell wastes, *CERAMICS INTERNATIONAL*, v. 43, p. 6730–6737, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.078>
16. Wu, J.P.; Boccaccini, A.R.; Lee, P.D.; Kershaw, M.J.; Rawlings, R.D. Glass ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterisation, *ADV. APPL. CERAM.*, v. 105, p. 32–39, 2006.
<https://doi.org/10.1179/174367606X81632>
17. OWOEYE, S. S. *et al.* Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations. *CERAMICS INTERNATIONAL*, v. 46, n. 8, p. 11770-11775, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.211>

VITREOUS FOAMS FROM RECYCLED GLASS AND RICE HUSK ASH: EVALUATION FOR POTENTIAL APPLICATIONS IN THERMAL INSULATION

ABSTRACT

In this work, environmental waste such as non-recycled glass and rice husk ash (RHA) were used in the production of glass foams as a sustainable alternative to improve thermal comfort in buildings and reduce environmental impact. Glass foams with 80/20% - x% recycled glass/RHA mixtures and various levels (x% = 0%, 2% and 5%) of calcite as a foaming agent were produced. The foaming took place in a muffle furnace between 925 and 1000°C for 30 min. The process was evaluated by apparent density, pore distribution and axial compressive strength. The foams presented excellent foaming efficiency and pore homogeneity, with low densities between 0.3036 and 0.4152 g/cm³, and compressive strengths between 0.4018 and 1.322 MPa. The thermal conductivity of 0.1193 W/mK was obtained for the best foam, respecting commercial parameters and proving to be suitable as a thermal insulator in buildings.

Keywords: sustainability, circular economy, insulating foams