XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável

Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Aplicação de resíduos cerâmicos para produção de geopolímeros prensados

Application of ceramic waste to produce pressed geopolymers

Cássia Mirelly Milward de Souza

Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | cassia.milward@ufv.br

Beatryz Cardoso Mendes

Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil |beatryz.mendes@ufv.br

Leonardo Gonçalves Pedroti

Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | leonardo.pedroti@ufv.br

Resumo

A indústria cerâmica é responsável por grande parte do PIB brasileiro dada a alta demanda, mas gera o problema ambiental de se descartar inadequadamente um de seus subprodutos de rejeitos, denominado chamote. Buscando reduzir essa problemática, o presente estudo analisa o reaproveitamento dos resíduos como precursor para fabricação de compósitos geopoliméricos. Foram realizados testes de caracterização das matérias-primas e produzidos corpos de provas que foram avaliados quanto à resistência à compressão. Como resultado, conclui-se que o chamote possui granulometria e composição química adequadas para uso em geopolímeros, sendo viável no âmbito técnico e ambiental.

Palavras-chave: Chamote. Geopolímero. Resíduo cerâmico.

Abstract

The ceramic industry is responsible for a large part of Brazilian GDP given the high demand, but it generates the environmental problem of inappropriately disposing of one of its tailings by-products, called chamotte. Seeking to reduce this problem, the present study analyzes the reuse of waste as a precursor to produce geopolymeric composites. Characterization tests were carried out and specimens were produced that were assessed by the compressive strength test. As a result, it is concluded that chamotte has particle size distribution and chemical composition suitable for use in geopolymers, being viable in the technical and environmental scope.

Keywords: Chamotte. Geopolymer. Ceramic residue.

SOUZA, C. M. M.; MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G. Aplicação de resíduos cerâmicos para produção de geopolímeros prensados. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica brasileira corresponde a 4,8% do setor de construção civil, além de gerar em torno de 900 mil empregos [1]. Logo, diariamente, são produzidos milhares de objetos empregados em edificações, decoração e utilidades. Entretanto, mesmo diante de tamanha importância econômica, esse ramo tem produzido toneladas de resíduos que cotidianamente são descartados de forma incorreta [2], como o chamote, que geralmente não tem uma finalidade nesses locais [3]. Por isso, sua utilização em outros setores pode ser uma alternativa sustentável.

O ramo da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais e significativamente poluente [4], fazendo com que diversos estudos sejam feitos para diminuir esse impacto, inclusive utilizando aglomerantes álcali-ativados, uma vez que não necessitam de calcinar a alta temperatura e diminuem a liberação de gases de queima. Assim, os geopolímeros são um subgrupo dessa classe [5].

O vidro é um material amplamente utilizado e, dada a sua larga aplicação, a taxa de resíduos é alta, fazendo com que o material seja um problema ambiental e econômico. Logo, estudos foram feitos para analisar a possibilidade de ser reciclado ao retornar à indústria de vidro, porém, por se tratar um processo complicado por questões logísticas, sua reutilização para esse fim se tornou impraticável [6]. Assim, outro caminho a seguir para aplicar os resíduos tem sido em materiais de construção, já que apresenta tamanhos de partículas que podem auxiliar em propriedades como a plasticidade e controle de retração.

Portanto, o objetivo do presente trabalho é a produção de compósitos geopoliméricos a partir da adição de chamote (30 e 80%), areia jundu e resíduo de vidro. Para isso, ensaios de caracterização física e mecânica dos corpos de provas foram realizados para comprovar a viabilidade técnica do estudo, que se mostra um viés interessante tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

DESENVOLVIMENTO

1. MATERIAIS

Como precursores dos geopolímeros, foram empregados o chamote e o resíduo de vidro. O chamote (CH) utilizado estava disponível no Laboratório de Materiais de Construção (LMC/UFV), sendo proveniente de uma indústria localizada em Ouro Branco – MG. A temperatura de queima aplicada na indústria foi igual a 850 °C. O material já se encontra em pó, apresentando diâmetro médio (D50) de 22,6 µm. O resíduo de vidro (RV), obtido do processo de corte e polimento de peças de vidro temperado, foi fornecido pela empresa NewTemper, localizada em Rio das Ostras – RJ. Quando adquirido, o resíduo estava úmido com grumos. Este foi submetido a processo de secagem em estufa, a 100 °C, destorroamento e peneiramento em malha de abertura 42,5 µm (ASTM 325 MESH). Os materiais utilizados são representados na Figura 1.

Figura 1: Resíduo cerâmico (chamote) e resíduo de vidro em pó.



Fonte: o autor.

Com a função de agregado miúdo, foi utilizada a areia jundu, que já estava disponível em laboratório. Ela é proveniente da Mineração Jundu, localizada em Descalvado – SP. O material, quando adquirido, já se encontrava em pó com granulometria inferior a da peneira com abertura de 75 µm (ASTM 200 MESH).

Nesta pesquisa, utilizou-se do hidróxido de sódio (NaOH) como ativador, material esse que é conhecido popularmente como soda cáustica e é vendido em flocos, pós, compostos ou grânulos, sendo que o mesmo foi concedido pelo Laboratório de Materiais de Construção (LMC/UFV). Logo, foi preparada uma solução com 5 mol/l de concentração de NaOH e água destilada.

2. MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As matérias primas que foram utilizadas para a produção dos geopolímeros foram o chamote, o resíduo de vidro e a areia jundu. A caracterização física do chamote e do resíduo de vidro consistiu na determinação da: massa específica dos sólidos (ABNT NBR 16605)[7]; área específica pelo método de Blaine (ABNT NBR 16372)[8] e distribuição granulométrica das partículas, utilizando a técnica de granulometria a laser (equipamento *Bettersize 2000*). A areia jundu foi caracterizada apenas em relação à distribuição granulométrica, também obtida por granulometria a laser.

A caracterização química foi obtida por fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva, utilizando o espectrômetro *Shimadzu Micro-EDX-1300*. Foi aplicada uma voltagem de 50 keV e corrente de 50 µA, sendo mapeados 1200 pontos. A composição mineralógica do chamote e resíduo de vidro foi avaliada por difração de raios X (DRX), utilizando o equipamento *D8 - Discover*. Para a análise de DRX, foi aplicada radiação CuKα (1.5418 Å), com o ângulo 2θ variando de 3° a 70°, com passo de 0,05° e taxa de 1.0 s/passo.

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nos materiais geopoliméricos, o teor de água em relação ao ligante – que consiste nos precursores e ativadores - é um parâmetro que influencia propriedades no estado

fresco e endurecido. Para auxiliar na definição de uma faixa ótima de trabalho para o parâmetro “relação água/ligante”, que em inglês é traduzido como “water/binder ratio” (w/b), foram moldados corpos de prova a partir de três composições distintas, sendo que cada composição contém o teor máximo admissível de cada matéria-prima empregada na fase sólida. Na presente pesquisa, o ligante corresponde à soma das frações de chamote, resíduo de vidro e álcalis (Na_2O). A areia jundu foi adicionada como agregado à mistura, desempenhando apenas o papel de preenchimento. As porcentagens máximas de chamote, resíduo de vidro e areia foram determinadas de acordo com pesquisas bibliográficas e testes experimentais realizados anteriormente, utilizando os materiais em questão. Nestes, observou-se que a proporção entre areia e os precursores, em compósitos geopoliméricos, não poderia ser superior a 1:2 (precursor:areia).

Cada mistura foi avaliada quanto à densidade aparente e à curva de compactação, ou seja, a variação no peso específico seco em função do teor de umidade, que neste caso foi substituído pela relação “w/b”. As relações w/b testadas foram 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40. Os limites mínimo (0,20) e máximo (0,40) também foram determinados de maneira experimental, de modo a manter uma quantidade mínima de água, necessária para a mistura e dissolução dos álcalis, e o teor máximo que possibilita condições adequadas de prensagem. Para cada relação w/b, e cada mistura, foram produzidos dois corpos de prova.

O segundo estudo executado foi em relação à carga ótima de prensagem. Para tal, selecionou-se uma única mistura, com teores intermediários de areia, chamote e resíduo de vidro. Foram testadas três cargas de prensagem: 1, 2 e 3 toneladas-força. Neste estudo, a relação w/b foi mantida fixa e igual a 0,25. Para cada carga, foram produzidos três corpos de prova.

Os dois estudos realizados, o teor de álcalis foi mantido igual a 3,14%, constante para todas as misturas. Dessa forma, pode-se avaliar apenas os fatores desejados, que seriam a relação água/ligante e a carga de prensagem.

2.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

Na Tabela 1 são mostradas as composições de cada mistura considerada no estudo da relação w/b. Conforme dito anteriormente, para cada mistura foram testadas cinco relações w/b, totalizando dez corpos de prova por mistura.

Inicialmente, os materiais sólidos - areia, chamote e resíduo e vidro - foram misturados a seco, até a completa homogeneização. Então, para cada corpo de prova, foram selecionados 60 gramas da mistura, sendo adicionadas as quantidades necessárias de água e solução alcalina (NaOH 5 mol/L) para alcançar a relação w/b de interesse. A massa foi novamente homogeneizada e colocada em um molde metálico para a operação de prensagem.

Foram produzidos exemplares cilíndricos, com dimensões aproximadas de 3 cm x 4,5 cm (diâmetro x altura), como apresentado na Figura 2. Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica automática, da marca

EMIC, sendo mantida fixa uma carga de prensagem de 3 toneladas-força para todas as misturas.

Tabela 1: Composição das misturas preparadas com os resíduos

Misturas	Areia (%)	Chamote (%)	Resíduo de vidro(%)	Álcalis (%)
1	50	30	20	3,14
2	0	80	20	3,14
3	0	30	70	3,14

Fonte: o autor.

Figura 2: Corpos de prova obtidos por prensagem.



Fonte: o autor.

Após a prensagem, os exemplares foram pesados em balança analítica e medidos em termos de diâmetro e altura, utilizando um paquímetro. Com esses dados, foi possível calcular a densidade aparente e o peso específico seco dos corpos de prova. A densidade aparente é a relação entre a massa do corpo de prova, obtida experimentalmente, e o seu volume. Já o peso específico seco (γ_d) é determinado pela Equação 1, sendo γ o peso específico natural e *w* o teor de umidade do corpo de prova.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1+w)}$$

(Equação 1)

Com relação ao estudo de carga ótima de prensagem, novamente foi utilizada a máquina universal de ensaios para a conformação dos exemplares. O preparo da mistura de cada corpo de prova foi semelhante ao descrito anteriormente. Após a prensagem, foram tiradas as medidas dos diâmetros, altura e massa de cada peça obtida.

Após as medições, os corpos de provas foram submetidos a cura hidrotérmica em um reservatório com água sob temperatura de 60°C, durante 24 horas. Decorrido este período, os exemplares foram levados para a câmara úmida, ambiente com temperatura controlada, até completarem 7 dias de cura. Nesta idade, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial, utilizando a prensa *Marshall* manual, representada na Figura 3, segundo as prescrições da NBR 13279:2005 [9].

A expressão utilizada para cálculo da resistência à compressão em MPa é dada pela Equação 2, com a força máxima em Newton e área em mm².

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

(Equação 2)

Figura 3: Ensaio de determinação de resistência à compressão axial.



Fonte: o autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

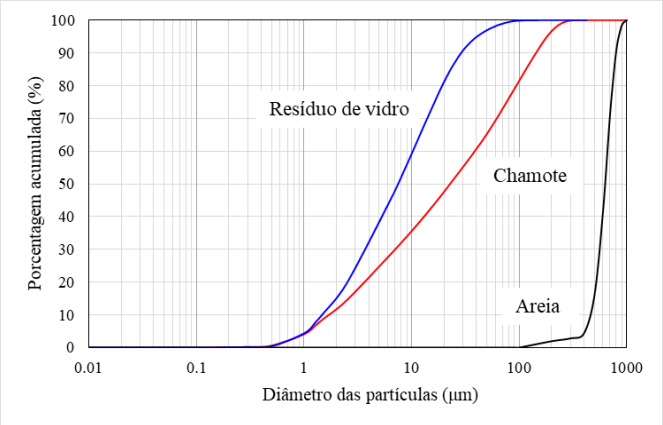
Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização do chamote e do resíduo de vidro quanto à massa específica, área específica pelo método Blaine e distribuição granulométrica das partículas são apresentados na Tabela 2 e Figura 4. Na Figura 4 também é mostrada a granulometria da areia jundu.

Tabela 2: Resultados da caracterização física do chamote e resíduo de vidro.

Matéria-prima	Massa específica (g/cm³)	Área específica (m²/kg)	Diâmetro médio das partículas – D50 (μm)
Chamote	2,75	652,98	22,74
Resíduo de vidro	2,40	1073,09	7,46

Fonte: o autor.

Figura 4: Distribuição granulométrica das partículas do chamote, resíduo de vidro e areia.



Fonte: o autor.

Observa-se que o chamote apresenta massa específica superior à do resíduo de vidro. Em relação à área específica, a correspondente ao resíduo de vidro é cerca de 64,3% superior em comparação à do chamote. Isso sugere uma maior reatividade do resíduo de vidro em relação ao chamote, uma vez que quanto maior a área específica, maior é a área de contato do precursor com o meio líquido e, consequentemente, maior é a possibilidade de ocorrência das reações químicas [10].

Com relação à distribuição granulométrica das partículas, o diâmetro médio referente ao resíduo de vidro (7,46 µm) é inferior quando comparado ao do chamote (22,76 µm), demonstrando que o primeiro é um material mais fino. Logo, uma granulometria mais fina é benéfica para a cinética das reações de dissolução dos precursores e posterior geopolimerização [11].

Na Tabela 3 é mostrada a composição química do chamote e do resíduo de vidro. Ambas as matérias-primas apresentam composições químicas semelhantes às relatadas na literatura para os mesmos materiais, com aplicação em álcali-ativação [12], como a presença de sílica, alumina e óxidos.

Tabela 3: Resultados da caracterização física do chamote e resíduo de vidro.

Matéria-prima	Composição química (%)									L.O.I. (%)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	Ti_2O	Na_2O	Other	
Chamote	49.7	30.6	5.3	0.5	1.3	1.6	1.1	1.5	6.1	2.3
Resíduo de vidro	60.2	2.9	0.3	7.4	0.2	1.6	0.0	2.6	4.9	19.7

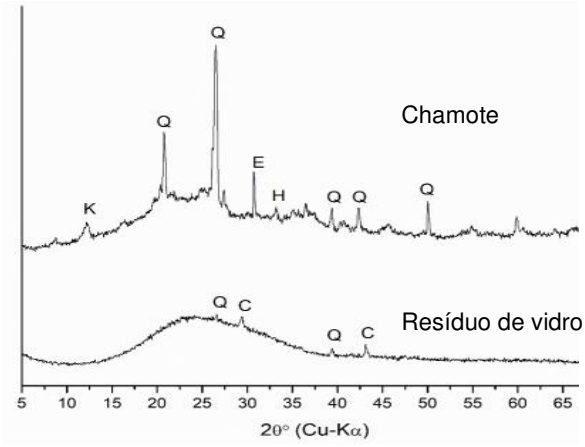
Fonte: o autor.

Os resultados da análise mineralógica são mostrados na Figura 5. No chamote foi possível detectar os minerais quartzo, caulinita, hematita e epidote. A ocorrência de

apenas um pico de caulinita, com baixa intensidade, sugere que a caulinita presente nas argilas que deram origem ao chamote foi parcialmente transformada em metacaulinita, fase instável e, portanto, reativa.

O resíduo de vidro apresentou aspecto predominantemente amorfo, com picos de quartzo e calcita. As fases amorfas, identificadas sobretudo no difratograma do resíduo de vidro, indicam a existência de parcela do material reativa, que é a parcela de interesse na sintetização de geopolímeros.

Figura 5: composição mineralógica do chamote e resíduo de vidro (K – caulinita (ICDD: 00-029-1488); Q – quartzo (COD:96-900-9667); E – epidote (COD ID: 1529622); R – rutilo (ICDD: 00-034-080); H – hematita (ICDD: 01-085-0987; C – calcita ICDD: 01-072-1937)).



Fonte: o autor.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

ESTUDO DA RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE

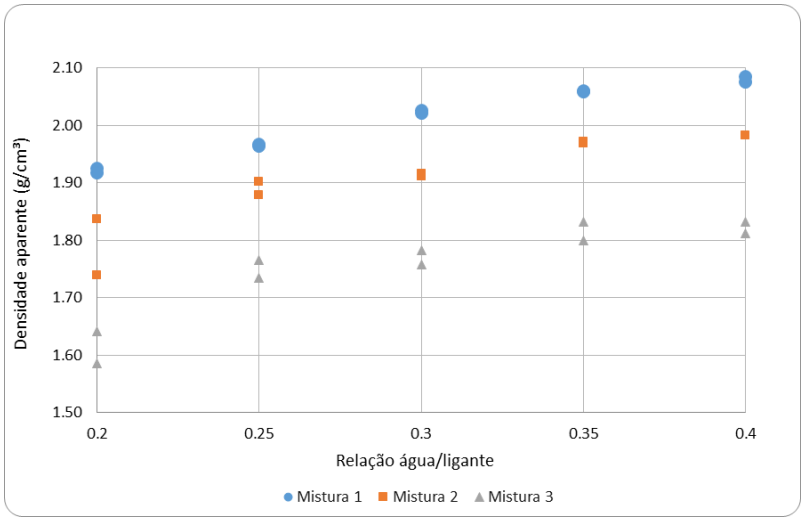
Os resultados de densidade aparente, obtidos para as três misturas produzidas no estudo da relação w/b, são mostrados na Figura 6. Observa-se que a mistura 1 apresentou os maiores valores de densidade aparente em relação às demais misturas. A mistura 3, com 70% de resíduo de vidro e 30% de chamote, apresentou os menores valores, na faixa de 1,55 a 1,85 g/cm³. Essas diferenças relacionam-se com as características granulométricas dos materiais, que influenciam no volume de mistura que pode ser alocado no molde, bem como na absorção da água de mistura pelas partículas.

Não há uma faixa de densidade aparente especificada para materiais geopoliméricos. Para materiais cerâmicos, por exemplo, que também podem ser produzidos por prensagem, alguns autores sugerem que entre 1,75 e 1,90 g/cm³ resultam em peças com resistência mecânica satisfatória [12]. Considerando essa faixa, nenhuma das relações w/b seriam adequadas para a mistura 1; para as misturas 2 e 3, seriam indicadas as relações 0,2 e 0,3, respectivamente.

Todas as misturas apresentaram um aumento da densidade aparente com o aumento da relação w/b. Isso porque o maior teor de água adicionado resultou em uma maior massa final do corpo de prova. Entretanto, para fins de verificação do empacotamento

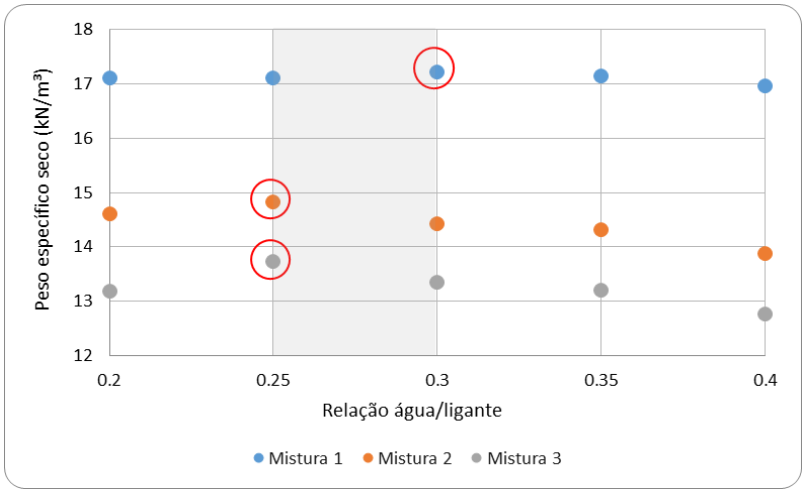
das partículas, é importante a análise do peso específico seco do material. Os resultados deste parâmetro são mostrados na Figura 7.

Figura 6: Densidade aparente dos corpos de provas das misturas 1, 2 e 3.



Fonte: o autor.

Figura 7: Peso específico seco dos corpos de provas das misturas 1, 2 e 3.



Fonte: o autor.

Para todas as misturas, observou-se que o peso específico seco aumenta até uma determinada relação w/b; a partir desse ponto, o peso específico seco sofre decréscimo. Esse ponto máximo está relacionado ao teor de umidade, que favorece o empacotamento das partículas, aumentando o peso específico seco e reduzindo vazios. Na mistura 1, o peso específico seco máximo foi alcançado em uma relação w/b igual a 0,30. Nas misturas 2 e 3, esse ponto correspondeu a uma relação w/b igual a 0,25.

Determinou-se que a faixa de relação w/b entre 0,25 e 0,30 seria a adequada para a produção das possíveis misturas que podem ser feitas de acordo com os intervalos de incorporação dos materiais: 0-50% para areia jundu; 30-80% para chamote; 20-70% para resíduo de vidro.

ESTUDO DA CARGA DE PRENSAGEM

Com relação à carga de prensagem, os resultados obtidos para a densidade aparente, peso específico seco e resistência à compressão axial estão apresentados na Tabela 4. Tanto em relação à densidade aparente, como ao peso específico seco, os corpos de prova obtidos com a carga de prensagem de 2t apresentaram os maiores valores (em média). No entanto, as diferenças percentuais entre os valores de peso específico seco obtidos com as cargas 2t e 3t em relação à carga de 1t foram baixas, correspondendo a 2,6% e 0,9%, respectivamente.

Os resultados de resistência à compressão aumentaram com o aumento da carga de prensagem, o que era esperado, uma vez que uma carga mais elevada tende a tornar o corpo de prova mais compacto, com menor ocorrência de vazios e mais resistente. Nota-se que as diferenças percentuais de resistência à compressão entre as cargas 2t e 3t em relação à carga de 1t foram iguais a 21,6% e 25,3%, respectivamente. Entre as cargas 2t e 3t, a diferença percentual foi igual a 3,0%, apenas.

Tabela 4: Resultados do estudo da carga de prensagem.

Carga de prensagem (tf)	Densidade aparente (g/cm³)	Peso específico seco (kN/m³)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
1	1,76	14,30	5,2	
1	1,78	14,44	5,7	5,3
1	1,76	14,32	4,9	
2	1,82	14,73	6,1	
2	1,80	14,60	6,6	6,4
2	1,83	14,84	6,6	
3	1,80	14,60	6,6	
3	1,81	14,66	6,4	6,6
3	1,75	14,20	6,7	

Fonte: o autor.

Foi considerado que a carga de prensagem igual a 2t é a mais viável para a produção dos geopolímeros. Os estudos apresentados no presente artigo servirão como base para o desenvolvimento de um programa experimental mais completo envolvendo os materiais propostos, tendo em vista o desenvolvimento de um novo material.

A partir da análise da Tabela 4, nota-se que os corpos de provas demonstraram desempenho físico e mecânico suficiente para aplicação na construção civil como tijolos cerâmicos, uma vez que atendem à compressão mínima de 4,0 MPa exigida pela ABNT NBR 15270-1:2017 para tijolos cerâmicos maciços [13]. Portanto, mostra-se que a utilização do chamote, resíduo de vidro e areia para compor esse novo material é viável do ponto de vista ambiental e técnico. Em relação à viabilidade econômica, deve ser realizado um estudo mais aprofundado, mas ressalta-se que os precursores utilizados são de baixo custo, e podem ser obtidos em qualquer localidade, o que reduz os custos relacionados ao transporte.

CONCLUSÃO

O presente estudo foi realizado a fim de analisar a utilização de rejeito de indústrias cerâmicas e resíduos de vidro como matérias primas para a produção de compósitos geopolímeros. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O chamote, resíduo de cerâmica, apresenta características físicas que possibilitam o seu uso em geopolímeros, uma vez que possui granulometria e composição química adequadas.
- O resíduo de vidro possui características que permitem inferir uma alta reatividade - como a granulometria fina e elevada área específica - e, portanto, elevado potencial para aplicação em álcali-ativação como fonte de sílica solúvel.
- A faixa de relação água/ligante de 0,25 a 0,30 foi a que apresentou os melhores resultados de peso específico seco para as três misturas avaliadas.
- Em relação à carga de prensagem, a mais viável em termos técnicos (produção) e de desempenho dos geopolímeros foi a de 2 toneladas.
- Este estudo demonstrou que a produção de geopolímeros a partir de chamote, resíduo de vidro e areia é uma alternativa com viabilidade técnica e ambiental. Logo, evita-se que o rejeito, de baixo custo, seja disposto inadequadamente no ambiente e permite que este seja utilizado para o desenvolvimento sustentável.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. Os autores também agradecem à FAPEMIG pelo suporte financeiro, e ao grupo de pesquisa SiCon pelo suporte técnico.

REFERÊNCIAS

[1] ACCIOLY, G. **Cenário da Indústria Cerâmica no Brasil e Seus Produtos**. 2018. Disponível em: https://www.ligaconsultoriajr.com.br/post/industria-ceramica.

[2] CASTRO, R. J. S. et al. **Produção de revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamote de telhas**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

[3] MEDEIROS, V. S. C. et al. Study of mixtures using simplex design for the addition of chamotte in clay bricks. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 16, n. 6, p. 2349–2361, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/ijac.13346.

[4] LOUZADA, B. et al. Aplicação de rejeito de mineração da bauxita na produção de tijolos cerâmicos. In: 74° CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2019. **Proceedings [...]** São Paulo: ABM, 2019. DOI: 10.5151/2594-5327-33216.

[5] SAMARAKOON, M. H. et al. Recent advances in alkaline cement binders: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 70–87, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.103.

[6] MENCHACA-BALLINAS, L. E. et al. Low CO_2 emission cements of waste glass activated by CaO and NaOH. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p.117992, dez. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117992.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

[10] MUCSI, G. et al. Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash. **International Journal of Mineral Processing**, v. 143, p. 50-58, out. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.08.010.

[11] TONG, K.T. et al. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. **Journal of Cleaner Production**, v.201, p. 272–86, jun. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.

[12] MENDES, B.C. et al. Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00847.

[13] MENDES, B.C. et al. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 227, dec. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.