

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NA FORMULAÇÃO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAULIM: ANÁLISES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.VII-015>

Leonardo Ferreira Junior ¹, Sabrina Luana Dias Pereira, Alex Neves Junior, Priscila Lemes

¹Universidade Federal da Integração Latino-Americana. E-mail: lf.junior.2016@aluno.unila.edu.br

RESUMO

A indústria da construção busca alternativas sustentáveis ao cimento Portland, responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂. Geopolímeros, produzidos a partir de precursores com base de aluminossilicatos e subprodutos industriais, oferecem uma solução promissora. Este estudo investiga a influência do chamote, um resíduo cerâmico sinterizado, nas propriedades mecânicas de pastas geopoliméricas à base de metacaulim. Corpos de prova cúbicos foram preparados com substituição de metacaulim por chamote em 0%, 20%, 30%, 70% e 80%, ativados com silicato de sódio e hidróxido de sódio. As amostras foram caracterizadas por ensaios resistência à compressão. Os resultados mostraram que formulações com 20% e 30% de chamote atingiram resistências à compressão de 40–50 MPa, comparáveis ao cimento Portland. Teores mais altos de chamote (70% e 80%) retardaram a cura e reduziram a resistência, provavelmente devido a desvios nas razões molares. Esses achados destacam o potencial do chamote como substituto parcial sustentável do metacaulim, promovendo princípios de economia circular na construção.

PALAVRAS-CHAVE: Geopolímero, Chamote, Metacaulim, Resíduo, Construção Civil.

ABSTRACT

The construction industry is seeking sustainable alternatives to Portland cement, which is responsible for approximately 8% of global CO₂ emissions. Geopolymers, produced from aluminosilicate-based precursors and industrial by-products, offer a promising solution. This study investigates the influence of chamotte, a sintered ceramic waste, on the mechanical properties of metakaolin-based geopolymer pastes. Cubic specimens were prepared with 0%, 20%, 30%, 70% and 80% of metakaolin replaced by chamotte, activated with sodium silicate and sodium hydroxide. The samples were characterized by compressive strength tests. The results showed that formulations with 20% and 30% chamotte achieved compressive strengths of 40–50 MPa, comparable to Portland cement. Higher chamotte contents (70% and 80%) delayed curing and reduced strength, probably due to deviations in molar ratios. These findings highlight the potential of chamotte as a sustainable partial substitute for metakaolin, promoting circular economy principles in construction.

KEY WORDS: Geopolymer, Chamotte, Metakaolin, Waste, Civil Construction.

INTRODUÇÃO

A demanda por materiais de construção sustentáveis e de alto desempenho tem ganhado cada vez mais relevância nas últimas décadas, impulsionada pela crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir os impactos ambientais, em especial as emissões de carbono geradas pela indústria da construção civil. Diante desse cenário, os geopolímeros emergem como uma solução inovadora, promissora e mais ecológica frente ao clínquer, apresentando-se como uma alternativa ao cimento Portland, cuja produção é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono, sendo em torno de 8% (ANDREW, 2018; MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017).

Os geopolímeros são materiais inorgânicos de alta resistência e durabilidade, formados a partir da reação de ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, como o metacaulim, que é um material pozzolânico fora do equilíbrio termodinâmico, obtida pela calcinação da caulinita entre 600 e 800° C, sendo um dos principais precursores utilizados na síntese de geopolímeros (NEVES E MELO FILHO, 2018). Para a obtenção de geopolímeros estáveis, é essencial que os materiais precursores apresentem elevado amorfismo, baixa exigência de água e capacidade de liberar íons de alumínio de forma eficiente durante a ativação. Como agentes ativadores, são comumente empregados compostos alcalinos, tais como hidróxido de sódio e/ou silicato de sódio (SINGH *et al.*, 2015). Além disso, os geopolímeros

apresentam a vantagem de poder serem produzidos a partir de resíduos industriais, como cinzas volantes, escórias de alto-forno e outros subprodutos (PROVIS, 2018; SINGH *et al.*, 2015).

Dentre esses resíduos, temos o chamote, um subproduto gerado a partir da quebra de materiais cerâmicos em linha de produção, como as de blocos, telhas, pisos e porcelanatos. Esse material, um rejeito sinterizado, pode ser reintroduzido nas linhas de produção ao qual faz parte, como matéria-prima secundária, reduzindo desperdícios. A Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2023), destaca que o Brasil tem uma produção anual de 8,15 bilhões de blocos e telhas, além de 470.550 toneladas de outros produtos cerâmicos e segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres – ANFACER (2025), o país é o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, representando 6% do PIB da indústria da construção. Quanto as perdas neste processo, Gouveia (2008) aponta que nestes segmentos podem chegar a 10%, e Queiroz Neto *et al.* (2016) estimam que 14% da produção anual de cerâmicas vermelhas se transforma em resíduos (chamote), totalizando aproximadamente 7.500 toneladas.

Segundo estudos recentes, como o de Mendes (2022), o chamote de porcelanato é composto principalmente por sílica, alumina e óxidos metálicos, o que o torna um material com potencial para aplicações sustentáveis, como a incorporação em matrizes geopoliméricas. Ao incorporar esses materiais na composição dos geopolímeros, contribui-se para a redução do descarte inadequado e promove a circularidade na economia. Essa abordagem diminui a extração de matérias-primas virgens e agrega valor a subprodutos, fomentando uma cadeia produtiva mais sustentável e ecoeficiente. Dessa forma, os geopolímeros representam um avanço significativo na busca por soluções que aliem desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental (PROVIS, 2018; SINGH *et al.*, 2015).

OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo convém investigar a influência da adição de chamote, um resíduo da indústria de revestimentos cerâmicos, na formulação de pastas geopoliméricas à base de metacaulim. Além de avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais, visando à valorização de resíduos e ao desenvolvimento de um material sustentável com potencial para diversas aplicações na construção civil.

METODOLOGIA

Materiais

As pastas geopoliméricas foram produzidas com metacaulim (Metacaulim HP Ultra, Metacaulim do Brasil Ltda.), chamote de resíduos de telhas de porcelana esmaltada, silicato de sódio (Na_2SiO_3 , 38–40% de sólidos) fabricado pela empresa Quimisul SC Brasil e hidróxido de sódio (NaOH , 97% de pureza), marca Nox, PA ACS.

O metacaulim apresentou faixa de tamanho de partícula de 1–10 μm e alto teor amorfo, confirmado por análise prévia de fluorescência de raios X (FRX). O chamote foi obtido de uma indústria de revestimentos cerâmicos (porcelanato), situada no Sudeste do estado do Paraná, Brasil, sendo este produto triturado em britador de mandíbulas, peneirado em malha #50 (~300 μm) e moído em moinho de bolas por 24 horas para atingir tamanho de partícula mais fino (média: $35,67 \pm 13,65 \mu\text{m}$).

Formulações das misturas

O projeto de mistura seguiu formulações adaptadas de Pereira; Possan; Neves Junior (2024) e Pereira (2024), que abordou a técnica de metodologia de superfície de resposta para otimizar pastas geopoliméricas. Três traços de diferentes resistências mecânicas foram selecionados para este estudo, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Formulações de referência. Fonte: (PEREIRA; POSSAN; NEVES JUNIOR, 2024).

Formulação	Metacaulim (%)	Silicato de Sódio (%)	Hidróxido de Sódio (%)
F1 – O	56,12	27,76	16,12
F2 – E	52,55	34,00	13,45
F3 – F	52,00	30,00	18,00

Cinco formulações foram preparadas substituindo metacaulim por chamote em 0%, 20%, 30%, 70% e 80% em massa, conforme apresentado na Tabela 2.

As razões molares das formulações são apresentadas na Tabela 3 e desviaram das faixas ideais de Davidovits ($0,20 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 > 0,48$; $3,30 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,50$; $0,80 < \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,60$) (DAVIDOVITS, 2020) com o aumento do teor de chamote.

Tabela 2. Porcentagens em massa dos componentes nas formulações geopoliméricas. Fonte: Autor do trabalho.

Formulação	Metacaulim (%)	Silicato de Sódio (%)	Hidróxido de Sódio (%)	Chamote (%)	
F1-0%CM	56,12	27,76	16,12	0,00	0% CM
F2-0%CM	52,55	34,00	13,45	0,00	
F3-0%CM	52,00	30,00	18,00	0,00	
F1-20%CM	44,90	27,76	16,12	11,22	20%CM
F2-20%CM	42,04	34,00	13,45	10,51	
F3-20%CM	41,60	30,00	18,00	10,40	
F1-30%CM	39,28	27,76	16,12	16,84	30%CM
F2-30%CM	36,79	34,00	13,45	15,77	
F3-30%CM	36,40	30,00	18,00	15,60	
F1-70%CM	16,84	27,76	16,12	39,28	70%CM
F2-70%CM	15,77	34,00	13,45	36,79	
F3-70%CM	15,60	30,00	18,00	36,40	
F1-80%CM	11,22	27,76	16,12	44,90	80%CM
F2-80%CM	10,51	34,00	13,45	42,01	
F3-80%CM	10,40	30,00	18,00	41,60	

Tabela 3. Razões molares para as formulações. Fonte: Autor do trabalho.

Formulação	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/Al ₂ O ₃
F1-0%CM	0,722	0,157	0,227	0,314	4,599	1,446
F2-0%CM	0,719	0,147	0,215	0,299	4,891	1,463
F3-0%CM	0,692	0,145	0,251	0,363	4,772	1,731
F1-20%CM	0,740	0,144	0,236	0,319	5,139	1,639
F2-20%CM	0,736	0,135	0,223	0,303	5,452	1,652
F3-20%CM	0,709	0,133	0,259	0,365	5,331	1,947
F1-30%CM	0,749	0,137	0,240	0,320	5,467	1,752
F2-30%CM	0,745	0,129	0,227	0,305	5,775	1,760
F3-30%CM	0,717	0,127	0,263	0,367	5,646	2,071
F1-70%CM	0,786	0,112	0,257	0,327	7,018	2,295
F2-70%CM	0,779	0,105	0,243	0,312	7,419	2,314
F3-70%CM	0,751	0,104	0,279	0,372	7,221	2,683
F1-80%CM	0,795	0,106	0,262	0,330	7,500	2,472
F2-80%CM	0,787	0,099	0,248	0,315	7,949	2,505
F3-80%CM	0,759	0,098	0,283	0,373	7,745	2,888

Preparo dos corpos de prova

Primeiramente, foi preparado uma solução de hidróxido de sódio a 10 Mol/L utilizando um misturador magnético a uma velocidade de aproximadamente 300 rpm até que ocorresse a dissolução completa do hidróxido de sódio. Após a produção, a solução foi deixada em repouso por cerca de 2 horas, até atingir o equilíbrio térmico com o ambiente. A solução ativadora composta de silicato de sódio e hidróxido de sódio foi preparada em um agitador mecânico, operando a uma rotação de 700 rpm por 5 minutos.

Após a homogeneização da fase líquida, o metacaulim e o chamote foram adicionados gradualmente à solução, com agitação manual por um minuto. Em seguida, a pasta foi misturada em agitador mecânico a 1250 rpm por 5 minutos para garantir uniformidade. Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cúbicos de silicone, com arestas de 50 mm. Após 24 horas as amostras foram desmoldadas e submetidas a um processo de cura até o 21º dia, à temperatura ambiente ($25^\circ \pm 2^\circ \text{C}$). Para cada formulação, foram produzidos três corpos de prova.

Para avaliação da resistência mecânica os corpos de prova foram caracterizados via ensaios destrutivos de compressão em uma prensa marca Contenco, sob uma velocidade de avanço do cilindro de 1 mm/min.

RESULTADOS

Os corpos de prova com até 70% de substituição de metacaulim por chamote apresentaram consistência e densificação adequadas após 21 dias de cura, permitindo a realização dos ensaios compressivos. Porém com 70% a desmoldagem só foi possível após cinco dias de cura e com 80% não foi possível a desmoldagem até os 21 dias.

Propriedades Mecânicas

Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Figura 1, os valores com substituição de até 30% de metacaulim com chamote foram satisfatórios e alcançaram resistências entre 40 e 60 MPa, diferentemente dos corpos de prova com 70% de substituição, que obtiveram resistências abaixo de 15 MPa.

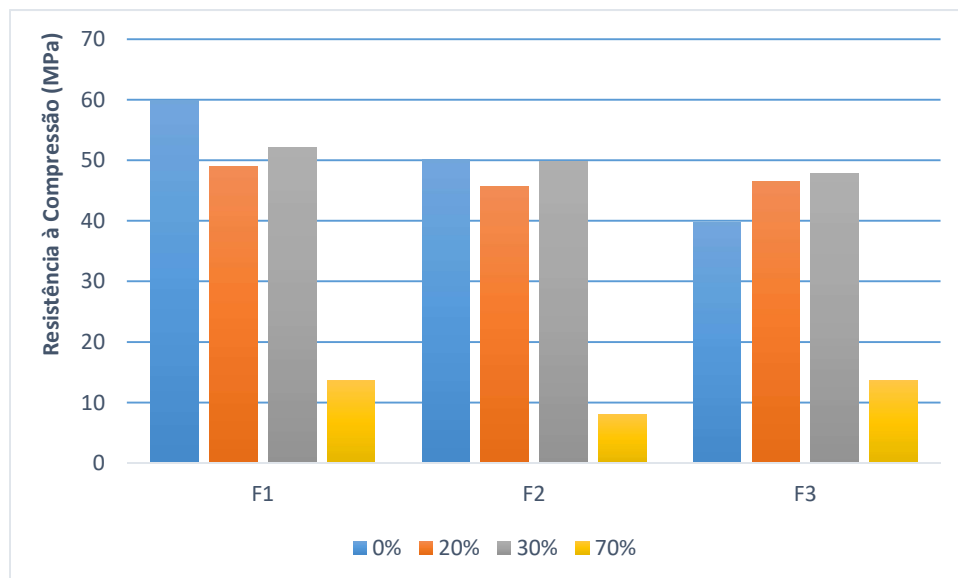


Figura 1. Resistência à compressão média (MPa) para as formulações. Fonte: Autor do trabalho.

Em relação aos valores de referência (0%), a mistura F1 alcançou a maior resistência mecânica em relação às misturas F2 e F3, devido a maior quantidade de metacaulim, conforme mencionado no estudo de referência (PEREIRA; POSSAN; NEVES JUNIOR, 2024).

A substituição de 20% diminuiu as resistências à compressão nas formulações de referência em F1 e F2, no entanto, foi superior à resistência mecânica de referência na formulação F3 em 17%. Sendo os resultados das formulações F2-20%CM e F3-20%CM estatisticamente iguais com 46 MPa.

A substituição de 30% proporcionou aumento da resistência à compressão comparado a substituição de 20% nas três formulações. No entanto, a formulação F2-30%CM obteve resistência mecânica estatisticamente igual à formulação F2-0%CM com 50 MPa. De forma satisfatória, a formulação F3-30%CM obteve resistência mecânica superior à de referência, F3-0%CM em 20%, superior a formulação F2-20%CM em 3% e estatisticamente igual a formulação F1-20%CM com 49 MPa.

As formulações com 20% e 30% de substituição por chamote atingiram resistências de 45–52 MPa, comparáveis às classes CP-I e CP-II do cimento Portland (32–50 MPa, NBR 5732). O desempenho ótimo em 20–30% sugerem um equilíbrio entre o metacaulim reativo e o chamote inerte atuando como microagregado e reforçando a matriz. Esses resultados alinham-se com (MENDES, 2022), que reportaram resistências superiores a 20 MPa com geopolímeros à base de chamote, e destacam a necessidade de formulações otimizadas para maximizar o uso do chamote.

No entanto, devido às formulações, o aumento do teor de chamote contribuiu com o aumento do teor de silício não-reativo e a diminuição da quantidade de metacaulim ocasionou a diminuição do teor de alumínio, ambos resultando na redução da eficiência da geopolimerização, conforme suportado pelas razões molares presentes na Figura 2 e consequentemente na resistência à compressão, apresentado nas formulações com 70% de substituição.

Teores mais altos de chamote (70% e 80%) obtiveram redução significativa da resistência, entre 8 e 13,7 MPa e retardaram a cura. Já os corpos de prova de 80%, não possibilitaram o desmolde em 21 dias, devido aos teores ainda maiores de silício não-reativo e diminuição nos teores de alumínio, impossibilitando a geopolimerização, possivelmente em relação às razões molares estarem fora dos intervalos recomendados por outros autores, como Davidovits (2020). Essas mudanças indicam reatividade reduzida do aluminossilicato e excesso de álcali, dificultando a formação de gel e a densificação.

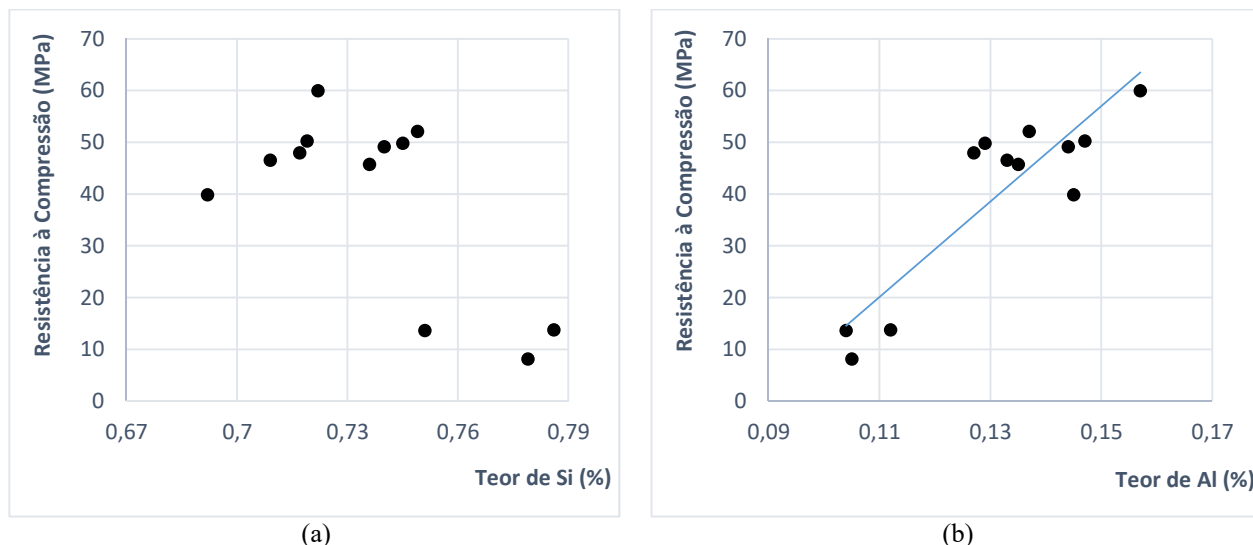


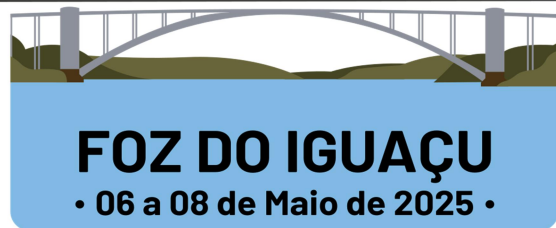
Figura 2. Comparativo dos teores de Silício (Si) e Alumínio (Al) com a resistência à compressão das formulações de 0%, 20% e 30% de chamote. Fonte: Autor do trabalho.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que o chamote pode substituir efetivamente o metacaulim em pastas geopoliméricas em níveis de 20–30%, resultando em resistências à compressão de 40–50 MPa e microestrutura densa, comparáveis ao cimento Portland. Teores mais altos de chamote (70–80%) comprometeram o desempenho devido a razões molares excessivas e reatividade reduzida. Esses achados ressaltam o potencial do chamote como matéria-prima sustentável, reduzindo resíduos e promovendo ecoeficiência na construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREW, R. M. **Global CO₂ emissions from cement production**. Earth System Science Data, v. 10, n. 1, p. 215 - 217, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
2. ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. Números do Setor Cerâmico. São Paulo. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setorceramico/numeros-do-setor>.
3. ANICER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Dados do Setor. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>.
4. DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry e Applications**. 5° ed. Institut Géopolymère. France, 2020.
5. GOUVEIA, F. P. **Efeito da Incorporação de chamote (resíduo cerâmico queimado) em massas cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação para o Distrito Federal-DF. Um estudo experimental**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2008. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33529417.pdf>.
6. 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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003624?via%3Dihub>.
7. MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. **Towards sustainable concrete**. Nature Materials, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
8. NEVES, K. P. L.; MELO FILHO, J. de A. **Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de Presidente Figueiredo, AM**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2018, Brasília. Anais. Brasília: CONFEA, 2018. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/166_pdma_pdcdrdpfa.pdf.
9. PEREIRA, S. L. D.; POSSAN, E.; NEVES JÚNIOR, A. **Otimização de pastas geopoliméricas à base de metacaulim e biochar da casca de arroz através de metodologia de superfície de resposta**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5°, p. 1950-1962 – 5° CLBMCS. Lisboa, Portugal. 2024.
10. PEREIRA, S. L. D. **Desenvolvimento de geopolímeros à base de metacaulim e biocarvão da casca de arroz para captura de CO₂**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Latino-



Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2024. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/8695>.

11. PROVIS, J. L. **Alkali-activated materials**. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 40-48, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
12. QUEIROZ NETO, M. L., et al. **Geração de Resíduo Sólido Proveniente de Resíduo Sólido Proveniente da Fabricação de Cerâmica Vermelha: Caso de Indústria Cerâmica na Região de Assú/RN**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 7. 2016. Campina Grande. Anais Eletrônicos [...] Campina Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016. p. 1-5. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/II-011.pdf>.
13. SINGH, B. et al. **Geopolymer concrete: A review of some recent developments**. Construction and Building Materials, v. 85, p. 78-90, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.