



PRODUÇÃO EXPERIMENTAL DE MATERIAL CERÂMICO POR GEOPOLIMERIZAÇÃO DE TRÊS RESÍDUOS: CINZAS DE CARAIPÉ, SEMENTES DE AÇAÍ E LODO DE ETA

Vieira, T.U.^a, Rodrigues, M.L.^a, Machado, L.C.S.^b, Meira, L.D.A.S.^b,

Valverde, K.C.^a, Santos, G.Z.B.^a

^a Universidade Federal do Amapá, ^b Instituto Federal do Amapá

gessicaz@hotmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo caracterizar resíduos gerados no estado do Amapá para fins de aproveitamento como matéria-prima de geopolímeros. A produção de geopolímeros envolve a mistura de materiais precursores ricos em silício e alumínio e um ativador alcalino, geralmente à base de sódio ou potássio. Na produção das amostras foram usados os seguintes materiais na forma de cinzas: caraipé, sementes de açaí e lodo de ETA. Como ativador alcalino empregou-se o hidróxido de potássio. Na produção das amostras adotou-se uma dosagem na qual fez-se, separadamente, duas substituições de lodo de ETA por 20% das demais cinzas. Os resultados do teste de resistência à compressão evidenciaram que os resíduos estudados têm potencial de uso como matéria-prima geopolimérica: aos 50 dias de idade, as amostras produzidas com lodo de ETA calcinado e cinzas de caraipé atingiram 14,17 MPa enquanto as amostras contendo as cinzas de sementes de açaí alcançaram 11,50 MPa.

Palavras-chave: geopolímero, lodo de ETA, sementes de açaí, cinzas de caraipé.

ABSTRACT

This study aimed to characterize waste generated in the state of Amapá for use as raw material for geopolymers. Geopolymer production involves mixing precursor materials rich in silicon and aluminum and an alkaline activator, usually sodium or potassium-

based. The following materials were used in the form of ash in the production of the samples: caraipé, açai seeds and WTP sludge. Potassium hydroxide was used as the alkaline activator. In the production of the samples, a dosage was adopted in which two separate substitutions of WTP sludge were made for 20% of the other ash. The results of the compressive strength test showed that the waste studied has potential for use as geopolymer raw material: at 50 days of age, the samples produced with calcined WTP sludge and caraipé ash reached 14.17 MPa, while the samples containing açai seed ash reached 11.50 MPa.

Keywords: geopolymer, WTP sludge, açai seeds, caraipé ash.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o estado do Amapá teve um elevado crescimento populacional e, conseqüentemente, houve o aumento da geração de resíduos sólidos. Um problema decorrente da geração de resíduos é a demanda proporcional por áreas para sua disposição. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei 12305 (BRASIL, 2010), na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada uma ordem de prioridade na qual a reciclagem antecede a disposição final em aterros sanitários.

Considerando a sustentabilidade da biosfera, ao optar por reciclar resíduos previne-se que grandes áreas terrestres sejam destinadas a aterros sanitários, uma vez que este tipo de empreendimento necessita de grandes áreas para sua implantação, além de causar diversos impactos ambientais, como a contaminação do solo e de água subterrânea por chorume e a supressão de florestas.

Percebe-se, portanto, que a geração de resíduos sólidos está atrelada a sérios impactos ambientais. Porém, iniciativas fundamentadas na economia circular se mostram viáveis para mitigar esses impactos. A indústria da construção, por exemplo, é a maior consumidora de recursos naturais do planeta e, ao mesmo tempo, uma grande geradora de resíduos. Visando mitigar impactos ambientais e torná-la mais sustentável, diversas pesquisas foram desenvolvidas no sentido de empregar resíduos das mais diversas atividades humanas como matéria-prima para a produção de novos materiais, a fim de atender às demandas da indústria da construção.

Geopolímeros são exemplos de aglomerantes alternativos que apresentam

vantagem do ponto de vista ambiental sobre o aglomerante mais utilizado mundialmente pela indústria da construção: o cimento Portland. A produção de geopolímeros envolve a mistura de materiais precursores com alto percentual de silício e alumínio e um ativador alcalino, geralmente à base de sódio ou potássio, desencadeando uma reação química que possibilita a produção de componentes cerâmicos à temperatura ambiente (SANTOS, MELO FILHO, MANZATO, 2018). Seu diferencial em relação ao cimento Portland é que, na maioria das vezes, podem ser produzidos a partir de resíduos.

Estudos comprovam que diversos resíduos como as sementes de açaí (GARCEZ et al., 2024; SILVA et al., 2023) e do saneamento (SANTOS, 2018; SANTOS et al., 2019) são matérias-primas potenciais para novos materiais e podem ser utilizados na produção de tecnologias adequadas às demandas das indústrias de construção. Lodos de estação de tratamento de água (ETA) são compostos majoritariamente por óxidos de silício e alumínio, componentes que podem ser usados como precursores geopoliméricos (SANTOS, 2018; SANTOS et al., 2019). As sementes de açaí, por sua vez, são ricas em óxidos de potássio (GARCEZ et al., 2024; SILVA et al., 2023).

Quando se trata da produção de geopolímeros, outro material interessante presente no estado do Amapá são as cinzas de caraipé, que são ricas em óxidos de silício. De acordo com Rosário e Silva (2023), diferentes povos amazônicos utilizam o caraipé no processo de produção de cerâmica tradicional. Trata-se de uma das substâncias antiplásticas geralmente adicionadas à pasta de argila em proporções e granulações variadas, sendo obtida pela queima da casca e entrecasca de plantas do gênero *Licania* (ROSÁRIO e SILVA, 2023).

Nesse sentido, este estudo experimental teve como objetivo caracterizar três diferentes resíduos gerados no estado do Amapá, lodo de ETA, sementes de açaí e cinzas de caraipé, e avaliar sua adequabilidade como matéria-prima para a produção de geopolímeros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, foram mapeados os resíduos disponíveis no estado Amapá com potencial de uso como matéria-prima para os novos materiais visando à indústria da construção. O nível de avanço tecnológico nessa linha de pesquisa e as iniciativas voltadas à economia circular também foram investigados. Após a delimitação dos

resíduos a serem estudados e dos materiais a serem desenvolvidos, foi realizada uma pesquisa experimental. Esta fase foi realizada nos laboratórios do Instituto Federal do Amapá – IFAP, campus Macapá.

2.1 Materiais:

2.1.1 Resíduos:

Considerando que estudos anteriores haviam confirmado a adequação do lodo de ETA como precursor geopolimérico, na produção das amostras adotou-se uma dosagem na qual fez-se, separadamente, duas substituições de lodo de ETA por 20% das demais cinzas. Para atender à proposta de um novo material, contribuindo assim com a sustentabilidade na construção civil, foram utilizados os seguintes materiais:

- Lodo: resíduo coletado em uma estação de tratamento de água (ETA) da cidade de Macapá, que é abastecida pelo rio Amazonas. Foi utilizado como precursor geopolimérico.
- Sementes de açaí: coletadas em feiras da cidade de Macapá, sendo utilizadas nessa pesquisa como precursor, em substituição parcial do lodo em 20 %.
- Cinzas de caraipé: são obtidas pela queima da casca e entrecasca de plantas do gênero *Licania* (ROSÁRIO e SILVA, 2023). Foram processadas de maneira artesanal pelas louceiras do Quilombo do Maruanum, localidade distante 58 quilômetros de Macapá – AP. Também foram utilizadas nessa pesquisa como precursor, em substituição parcial do lodo em 20 %.

2.1.2 Demais componentes:

- Cimento Portland: cimento de escória de alto forno da marca MIZU, foi usado como fonte adicional de cálcio. Sua composição química, expressa em óxidos, consta na Tabela 1;
- Areia: obtida em comércios de materiais de construção localizados em Macapá, foi peneirada em peneira nº 100 da ABNT. O uso de areia como agregado reduz o uso de cimento e o respectivo custo do material produzido;
- Hidróxido de potássio (KOH): marcas Dinâmica Química e SCIAVICCO,

usados na composição da solução alcalina, necessária para dissolver os componentes secos e proporcionar a reação de geopolimerização do material;

- Microsílica industrial: marca Microsillex, utilizada como fonte adicional de sílica na composição da mistura alcalina, cuja composição química, expressa em óxidos, consta na Tabela 1;
- Água da torneira: utilizada para a dissolução dos componentes secos, na composição da mistura alcalina.

Tabela 1 – Composição química do cimento e da sílica industrial.

Óxidos (peso %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Outros	Total %
Cimento Portland	22,99	6,86	5,91	0,74	0,84	0,00	58,11	0,00	4,07	0,00	0,48	100,00
Sílica Industrial	86,32	4,70	0,88	0,12	0,40	0,00	4,79	0,89	1,81	0,00	0,9	100,00

2.2 Métodos:

Para serem usados como matéria-prima geopolimérica, o lodo de ETA, as sementes de açaí e as cinzas de caraipé passaram pelos seguintes procedimentos:

2.2.1 Processamento dos materiais

- As cinzas de caraipé foram obtidas por queima artesanal realizada pelas louceiras do Maruanum, localidade distante 58 quilômetros de Macapá – AP. As cinzas já fragmentadas foram peneiradas em peneira número 100 da ABNT, para uma melhor reação de geopolimerização.
- O lodo de ETA foi submetido aos seguintes procedimentos:
 - Secagem em estufa: secagem a 110 °C, durante 8 horas, em forno do tipo estufa, marca Lucadema, a fim de retirar a umidade dos resíduos;
 - Moagem: fragmentação de partículas, com moinho do tipo martelo, marca Metaltex, seguida de maceração em almofariz com auxílio de pistilo, marca Chiarotti a fim de possibilitar uma calcinação homogênea;
 - Peneiramento: com uma peneira número 100 da ABNT, marca a

bronzinox, o material foi peneirado, para se tornar uniforme, retirando-se a parte grosseira, a fim de possibilitar uma calcinação homogênea dos materiais;

- o Calcinação: foi realizada em forno do tipo mufla, marca Quimis, modelo Q318S24, a 750 °C, durante 6 horas, visando remover impurezas e tornar os materiais mais reativos.
- Sementes de açaí foram submetidas aos seguintes procedimentos:
 - o Moagem: fragmentação das partículas, com moedor ajustável, marca Hamilton Beach, modelo 80393-BZ127, a fim de possibilitar uma calcinação homogênea dos materiais;
 - o Peneiramento: utilizou-se uma peneira número 100 da ABNT;
 - o Calcinação: foi realizada em forno do tipo mufla, marca Quimis, modelo Q318S24 a 600°C, durante 90 minutos, resultando em cinzas.

2.2 .2 Preparação dos geopolímeros:

A mistura de todos os componentes dos geopolímeros foi realizada com o auxílio de um agitador mecânico, marca Fisatom, modelo FIS715C, durante seis minutos, visando a completa homogeneização. Após a completa mistura dos materiais secos com a solução alcalina, foram moldados corpos de prova cilíndricos, de acordo com a norma pertinente, os quais foram usados para avaliar a resistência mecânica dos materiais.

2.2 .3 Caracterização dos geopolímeros:

- Ensaio de resistência à compressão: foi utilizada uma prensa de ensaios mecânicos da marca Emic, modelo DL30000, em uma velocidade de carregamento de 2 mm/min, para avaliar a resistência mecânica do material à compressão axial.
- Fluorescência de Raios X – FRX: Para determinar a composição química dos materiais empregou-se a técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). Estas análises foram realizadas em um espectrômetro modelo EDX-720, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul – IFMS, campus Corumbá.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Resistência à compressão

Na Tabela 2 constam os resultados de resistência mecânica obtidos para os geopolímeros desenvolvidos. Para melhor compreensão, denominou-se o geopolímero 1 o material desenvolvido com lodo de ETA calcinado e cinzas de açaí. O geopolímero 2 se refere ao material produzido com lodo de ETA calcinado e cinzas de caraipé.

Nas idades iniciais (7 dias), o geopolímero produzido somente com lodo de ETA calcinado atingiu 11,83 MPa de resistência à compressão média enquanto, na mesma idade, o material desenvolvido com lodo de ETA calcinado e cinzas de açaí alcançou somente 2,66 MPa (VIEIRA e SANTOS, 2024).

Os resultados do teste de resistência à compressão evidenciaram que os resíduos estudados têm potencial de uso como matéria-prima geopolimérica: aos 50 dias de idade, o geopolímero 1 alcançou 11,50 MPa e geopolímero 2 atingiu 14,17 MPa.

Tabela 2 – Resistência mecânica dos geopolímeros.

Materiais	Resistência mecânica (MPa)	Idade (dias)
Geopolímero 1	11,50	50
Geopolímero 2	14,17	50

- Composição química

A composição química dos resíduos é apresentada na Tabela 3. Com base nessas informações, pode-se observar que a composição dos resíduos é adequada para a produção de geopolímeros, uma vez que são resíduos compostos majoritariamente por óxidos de silício, alumínio e potássio. Mas, diferentemente do que se esperava, embora as cinzas de sementes de açaí sejam ricas em óxidos de potássio, essa característica do resíduo não influenciou a resistência mecânica do produto resultante, uma vez que esta foi inferior à resistência do geopolímero produzido com cinzas de caraipé. Por esse motivo, inferiu-se que as cinzas de sementes de açaí estão interagindo no produto geopolimérico somente como material de enchimento.

Tabela 3 – Composição química dos resíduos e dos geopolímeros, expressa em óxidos.

Óxidos (peso %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cr ₂ O ₃	Outros	Total %
Sementes de açaí calcinadas	7,30	0,00	5,65	41,37	0,30	5,01	17,09	10,59	10,64	0,96	1,09	100,00
Cinzas de caraipé	86,80	2,94	0,38	1,23	0,11	0,02	3,69	1,35	3,35	0,00	0,13	100,00
Geopolímero 1	37,57	12,60	6,68	26,61	0,92	0,15	11,74	0,75	1,93	0,00	1,05	100,00
Geopolímero 2	45,10	10,92	5,74	23,23	0,80	0,00	10,07	1,02	2,22	0,00	0,90	100,00

CONCLUSÃO

Os resultados do teste de resistência à compressão evidenciaram que os resíduos estudados têm potencial de uso como matéria-prima geopolimérica: aos 50 dias de idade, as amostras produzidas com lodo de ETA calcinado e cinzas de caraipé atingiram 14,17 MPa enquanto as amostras contendo as cinzas de sementes de açaí alcançaram 11,50 MPa. Sendo assim, os materiais produzidos podem ser aperfeiçoados e inseridos no mercado da construção civil. Portanto, os resultados preliminares evidenciam que este tipo de aplicação pode ser uma alternativa ambientalmente sustentável para a destinação de resíduos gerados no estado do Amapá.

Como o desfecho deste trabalho, espera-se desenvolver novos materiais para atender às demandas da indústria da construção e apresentar novas alternativas ambientalmente sustentáveis para a destinação de resíduos gerados no estado do Amapá, amenizando a pressão sobre aterros sanitários e contribuindo para a manutenção da Floresta Amazônica em pé, bastante conservada na região onde será realizado este projeto.

AGRADECIMENTOS

À UNIFAP, pela bolsa de IC destinada à primeira autora. Ao IFAP campus Macapá, pela disponibilização da estrutura e equipamentos necessários para desenvolver este trabalho.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL, Política Nacional de Resíduos Sólidos. Obtido de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 de abril de 2023.
2. ROSÁRIO, S.A.S.; SILVA, C.A.F. O uso do caraipé na cerâmica Caeteuara: interseções entre os saberes da tradição e a termodinâmica. **REMATEC**, v. 18, n. 45, p. e2023005-e2023005, 2023.
3. GARCEZ, L.R. et al. Characteristics of the açai seed (*Euterpe precatoria* Martius) after thermal processing and its potential in soil-cement brick. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02816, 2024.
4. SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica**, v. 64, n. 370, p. 276-283, 2018.
5. SANTOS, G.Z.B et al. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of environmental management**, v. 249, p. 109328, 2019.
6. SILVA, A. A. S. et al. Study of a new potassium phosphate-based waste as an alkaline activator in alkali-activated binders: The açai seed ash. **Construction and Building Materials**, v. 408, p. 133757, 2023.
7. VIEIRA, T.U.; SANTOS, G.Z.B. Novos materiais sustentáveis. XIII CONAIC – Congresso Amapaense de Iniciação Científica, 2024. No prelo.