



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZONIA URBANA BRASILEIRA: TRANSFORMAÇÃO DE LODO DE ETA E SEMENTES DE AÇAÍ EM MATERIAIS CERÂMICOS GEOPOLIMÉRICOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.I-025>

Maysa Rodrigues Lima*, Gessica Zila Batista dos Santos

*Universidade federal do Estado do Amapá, maysarodrigues21ap@gmail.com

RESUMO

Com o elevado crescimento populacional, atender às demandas da sociedade por matérias-primas alternativas é uma necessidade urgente, nesse sentido o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um novo material a partir de resíduos gerados na cidade de Macapá, Amapá Brasil. Por serem gerados em grande quantidade, foram selecionados o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Companhia de Saneamento do Amapá (CSA) e sementes de açaí, um fruto bastante consumido na cidade. Visando à demanda da construção civil por novos materiais e considerando a composição química desses resíduos, nesta pesquisa desenvolveu-se um tipo de material cerâmico denominado geopolímero, que pode ser produzido por meio da combinação de uma solução alcalina ativadora, geralmente à base de sódio (Na) e/ou potássio (K), e de matérias-primas contendo silício (Si) e alumínio (Al), por exemplo. Por meio de análise de Fluorescência de Raios X – FRX, foi constatado que o lodo de ETA era composto majoritariamente de Si e Al, enquanto as sementes de açaí calcinadas eram compostas basicamente de K. Com base nessas informações, decidiu-se desenvolver dois diferentes geopolímeros: o primeiro, denominado geopolímero 1, teve o lodo de ETA como matéria-prima principal e cinzas de sementes de açaí na composição da solução alcalina, preparada à base de potássio, enquanto o segundo, denominado geopolímero 2, teve lodo de ETA e cinzas de sementes de açaí como matéria-prima principal ou precursoras. Para serem usados como matéria-prima, ambos os resíduos foram beneficiados por meio de secagem, moagem, peneiramento e calcinação. Por fim, foram desenvolvidos os geopolímeros, os quais foram avaliados quanto à resistência mecânica e microestrutura. Os resultados obtidos evidenciaram que os geopolímeros 1 e 2 têm características mecânicas e microestruturais muito próximas e adequadas para uso na construção civil em diversas aplicações. Aos 7 dias de idade, alcançaram 9 e 8 MPa de resistência mecânica média, respectivamente, enquanto aos 28 dias atingiram 12 MPa, em média. De modo geral, a microestrutura de ambos se mostrou adequada, com boa interação entre o gel geopolimérico e os agregados. Espera-se que, futuramente, essa proposta possa ser uma alternativa ambientalmente correta para a destinação de lodos de ETA e sementes de açaí, bem como uma matéria-prima alternativa às demandas da indústria da construção.

PALAVRAS-CHAVE: lodo de ETA, geopolímero, sementes de açaí, materiais sustentáveis.

ABSTRACT

With the high population growth, meeting society's demands for alternative raw materials is an urgent need. In this sense, the objective of this research was to develop a new material from waste generated in the city of Macapá, Amapá, Brazil. Due to the large quantities generated, sludge from the Water Treatment Plant (WTP) of the Amapá Sanitation Company (CSA) and açai seeds, a fruit widely consumed in the city, were selected. Aiming at the demand of the construction industry for new materials and considering the chemical composition of these wastes, this research developed a type of ceramic material called geopolymer, which can be produced by combining an alkaline activating solution, usually based on sodium (Na) and/or potassium (K), and raw materials containing silicon (Si) and aluminum (Al), for example. Through X-ray Fluorescence (XRF) analysis, it was found that the wastewater treatment plant sludge was composed mainly of Si and Al, while the calcined açai seeds were composed primarily of K. Based on this information, it was decided to develop two different geopolymers: the first, called geopolymer 1, used wastewater treatment plant sludge as the main raw material and açai seed ash in the composition of the alkaline solution, prepared with potassium, while the second, called geopolymer 2, used wastewater treatment plant sludge and açai seed ash as the main raw material or precursors. To be used as raw material, both residues were processed through drying, grinding, sieving, and calcination. Finally, the geopolymers were developed and evaluated for mechanical strength and microstructure. The results obtained showed that geopolymers 1 and 2 have very similar mechanical and microstructural characteristics and are suitable for use in civil construction in various applications. At 7 days of age, they reached average mechanical strengths of 9 and 8 MPa, respectively, while at 28 days they reached an average of 12 MPa. In general, the microstructure of both proved adequate, with good interaction between the geopolymer gel and the



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



aggregates. It is expected that, in the future, this proposal may be an environmentally sound alternative for the disposal of wastewater treatment plant sludge and açai seeds, as well as an alternative raw material for the demands of the construction industry.

KEY WORDS: sludge, geopolymer, açai seeds, sustainable materials.

INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) prevê que todo resíduo deve ser manejado de forma correta, tendo uma destinação final ambientalmente adequada. Com o aumento da população mundial e a consequente pressão sobre os recursos naturais, alternativas de reciclagem de resíduos tornam-se cada vez mais indispensáveis, pois podem contribuir para a redução de impactos ambientais e a conservação de recursos naturais não renováveis.

Na cidade de Macapá, capital do estado do Amapá, Brasil, há dois tipos de resíduos gerados em grande quantidade que se destacam alterando a paisagem local: o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (ETA) da Companhia de Saneamento do Amapá e as sementes de açai (*Euterpe Oleracea*), fruto amplamente consumido na região. Enquanto o lodo gerado no tratamento de água da CSA é, atualmente, lançado em corpos hídricos próximos à ETA, as sementes de açai podem ser vistas espalhadas por toda a cidade, tanto no solo quanto em corpos hídricos. Ambos os resíduos não possuem valor comercial, o que resulta em grandes quantidades acumuladas e lançadas no ambiente, sem tratamento prévio e sem um manejo ambientalmente correto.

Na literatura científica há várias pesquisas que buscam alternativas para a destinação de lodo de ETA, por exemplo usando-o como material cerâmico para fabricação de telhas (CREMADES *et al.*, 2018), ou misturado com argamassa (ANDRADE *et al.*, 2018), ou utilizando as cinzas do lodo junto com calcário moído para substituição do cimento Portland (HAGEMANN *et al.*, 2019). Segundo estudos de Cordeiro *et al.* (2019), a construção civil pode incorporar em seus materiais resíduos como cinzas de semente de açai para produção de concreto, cimento, argamassa e cerâmicas. E para essas composições são necessárias avaliações do potencial técnico, econômico e ambiental desses resíduos (CORDEIRO *et al.*, 2019).

Na indústria de novos materiais, um certo tipo de cerâmica está ganhando cada vez mais espaço, principalmente na construção civil. Por isso, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas a respeito desse material denominado geopolímero. Enquanto os polímeros são formados por estruturas de carbono, geopolímeros são constituídos de estruturas de silício e alumínio, sendo obtidos por meio da dissolução de materiais aluminossilicatos em solução altamente alcalina (SANTOS, 2016). Dentre as vantagens deste novo material estão: a) a sua produção em temperatura ambiente, diferentemente das cerâmicas convencionais, que necessitam de queima para a cura; b) emitem menos CO₂ que o cimento convencional; c) podem ser produzidos à base de uma variedade de resíduos e d) dentre as possíveis aplicações, podem ser empregados como pastas, argamassas e concretos, em substituição ao cimento Portland, o material aglomerante mais utilizado mundialmente na construção civil (SANTOS, 2016; SANTOS *et al.*, 2019).

O cimento Portland é um dos materiais mais usados nas construções, sendo responsável por 5% a 10% das emissões antrópicas de (CO₂) gerados no globo (IGE, 2021). Por essa razão, substituir o cimento Portland por elementos menos danosos tem sido amplamente debatido. Diante disso, verifica-se que o uso de lodo de ETA e sementes de açai para a produção de materiais de construção pode ser tanto uma alternativa de destinação ambientalmente adequada para esses resíduos e quanto uma solução inovadora para atender às demandas da indústria da construção por novos materiais mais sustentáveis e com menos poluentes para o meio ambiente.

Atender às demandas da sociedade por matérias-primas alternativas é uma necessidade urgente, nesse sentido o objetivo desta pesquisa é desenvolver um novo material de construção a partir de resíduos gerados em grande quantidade na cidade de Macapá. Por serem gerados em grande quantidade, foram selecionados o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (ETA) da CSA e sementes de açai.

OBJETIVO

Objetivo geral: Desenvolver um novo material de construção a partir de resíduos gerados em grande quantidade na cidade de Macapá: lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) e sementes de açai.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Objetivos específicos: Caracterizar quimicamente os resíduos, processá-los (moagem, secagem, calcinação), produzir os geopolímeros e avaliar a sua resistência mecânica e microestrutura.

METODOLOGIA

A metodologia baseou-se em estudos anteriores de Santos (2016) e utilizou os seguintes componentes principais: lodo de ETA, sementes de açaí, cimento Portland (como fonte de cálcio) e areia (agregado). Como solução alcalina ativadora: hidróxido de potássio (KOH), água destilada e microssilica.

Processamento dos resíduos

Para se tornarem reativos, os resíduos passaram por um rigoroso beneficiamento:

- Lodo de ETA: Secagem em estufa a 110°C, moagem mecânica em moinho do tipo martelo, e manual, com auxílio de almofariz e pistilo, peneiramento em peneira nº 100 da ABNT e calcinação em forno mufla a 750°C por 6 horas, visando tornar a sua estrutura amorfa e reativa (Figura 1).



Figura 1: Lodo *in natura*, seco em estufa e calcinado. Fonte: Autora do trabalho.

- Sementes de açaí: Secagem a 110°C em estufa, calcinação em forno mufla a 600°C por 90 minutos, para transformação em cinzas, moagem em moedor ajustável e peneiramento em peneira nº 100 da ABNT (Figura 2).



Figura 2: Semente de açaí após secagem, calcinação, moagem e peneiramento. Fonte: Autora do trabalho.

Produção dos geopolímeros

Foram formuladas duas variações, ambas contendo 6% de cinzas de sementes de açaí na composição total:

- Geopolímero 1: Cinzas de sementes de açaí integradas na solução alcalina (ativador);
- Geopolímero 2: Cinzas de sementes de açaí integradas na matéria-prima seca (precursor) juntamente com o lodo.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Foram moldados corpos de prova cilíndricos, curados à temperatura ambiente, simulando as condições reais de uma obra em clima tropical (Figura 3).



Figura 3: Moldes e corpos de prova geopoliméricos desmoldados. Fonte: Autora do trabalho.

Os percentuais de cada componente empregado na preparação dos geopolímeros constam nas Tabela 1 e 2.

Tabela 1: Materiais utilizados na produção do Geopolímero 1, com a inserção de cinzas de sementes de açaí na composição do ativador. Fonte: Autora do trabalho.

Precursor		Agregado	Ativador			
Lodo de ETA calcinado	Cimento Portland	Areia	KOH	Água	Sílica	Cinzas de sementes de açaí
32%	8%	10%	14%	17%	13%	6%

Tabela 2: Materiais utilizados na produção do Geopolímero 2, com a inserção de cinzas de sementes de açaí na composição do precursor. Fonte: Autora do trabalho.

Precursor		Agregado	Ativador			
Lodo de ETA calcinado	Cimento Portland	Cinzas de sementes de açaí	Areia	KOH	Água	Sílica
32%	8%	6%	10%	14%	17%	13%

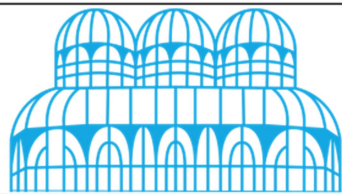
Caracterização das matérias-primas e dos geopolímeros

Caracterização das matérias-primas

A técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) foi empregada para confirmar se a composição química das matérias-primas escolhidas era adequada para a produção de geopolímeros. Assim, para determinar a composição química dos materiais, amostras em pó foram submetidas à análise em um espectrômetro, modelo EDX-720.

Caracterização dos geopolímeros

- Resistência à compressão axial: essa avaliação é eficaz para determinar um limite de carga máxima que o material pode suportar e o seu comportamento mecânico resultante. É a tensão máxima que o geopolímero pode suportar antes de ser rompido. Esses ensaios foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, utilizando uma prensa de ensaios mecânicos da marca Solotest.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



- Microestrutura: a superfície fraturada dos geopolímeros foi analisada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, com o auxílio de um microscópio modelo Hitachi TM3030Plus tabletop microscope. Foram obtidas imagens com aumento variando entre 40 e 180 vezes.

RESULTADO

Caracterização química dos resíduos

Por meio da técnica de Fluorescência de Raios X – FRX, pôde-se confirmar que a composição química das matérias-primas escolhidas era adequada para a produção de geopolímeros, os quais necessitam de compostos majoritariamente à base de silício (Si) e alumínio (Al) como material precursor, ambos encontrados no lodo de ETA, e de potássio (K) no ativador, que foi encontrado na composição das sementes de açaí (Tabela 3).

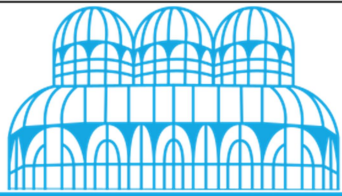
Tabela 3 – Composição química das cinzas de sementes de açaí e do lodo de ETA seco e calcinado.

Fonte: Autora do trabalho.

Óxidos (peso %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	ZrO ₂	Outros	Total %
Cinzas de sementes de açaí	7,30	0,00	5,65	41,37	10,64	10,59	17,09	0,30	5,01	-	2,05	100,00
Lodo Seco	50,75	25,71	12,01	3,41	3,11	1,65	1,45	1,40	0,18	0,10	0,23	100,00
Lodo Calcinado	50,67	26,13	13,25	3,60	1,36	1,33	1,52	1,50	0,19	0,12	0,33	100,00

Caracterização dos geopolímeros

- Caracterização mecânica: Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos geopolímeros constam na Figura 4. Enquanto o geopolímero 1 apresentou resistência mecânica média de 9 MPa, o geopolímero 2 alcançou 8 MPa. Aos 28 dias de idade, ambos os geopolímeros apresentaram resistência mecânica média de 12 MPa. Esses resultados confirmam o potencial de uso destes materiais em diversas aplicações na indústria da construção, tais como: a) pastas, argamassas e concretos não estruturais, em substituição àqueles produzidos com o cimento convencional, além de certos tipos de materiais cerâmicos não estruturais como telhas e tijolos.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

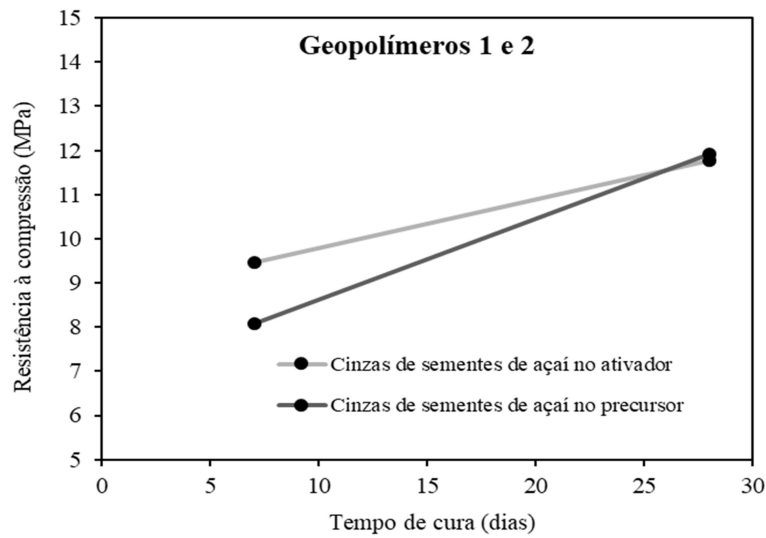


Figura 4: Resultados de resistência à compressão axial dos geopolímeros. Fonte: Autora do trabalho.

Ambos os geopolímeros apresentaram aumento de resistência mecânica com o decorrer dos dias de cura. Isso acontece porque as reações de geopolimerização continuam ocorrendo ao longo do tempo, permitindo o fortalecimento da microestrutura do material.

Embora a resistência final tenha sido similar, o Geopolímero 1 mostrou-se mais estável e com desenvolvimento de resistência inicial superior, indicando que o potássio presente na cinza de açaí reage melhor quando já está em solução. De acordo com as normas brasileiras (NBR), uma resistência de 12 MPa é suficiente para a fabricação de tijolos de vedação e blocos não estruturais.

- Caracterização microestrutural: Nas Figuras 5 e 6 constam as imagens dos geopolímeros obtidas por meio de MEV, com magnificação variando entre 40 e 180 vezes. Nas imagens, verifica-se que a microestrutura de ambos se mostrou adequada, com boa interação entre o gel geopolimérico e os agregados, confirmando o potencial de uso desses materiais como aglomerante, podendo substituir o tradicional cimento Portland, utilizado amplamente na produção de pastas, argamassas e concretos.

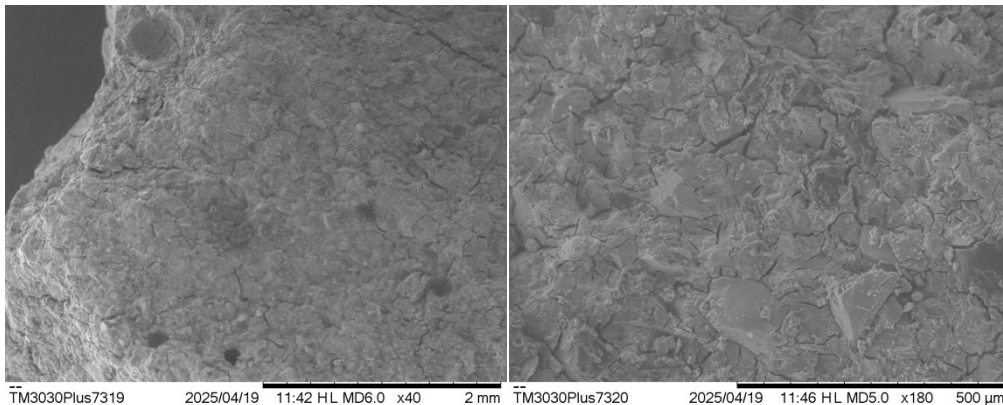
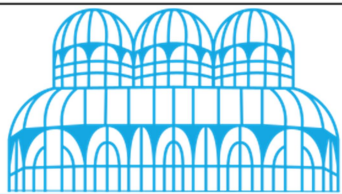


Figura 5: Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero produzido com cinzas de sementes de açaí no ativador. Fonte: Autora do trabalho.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

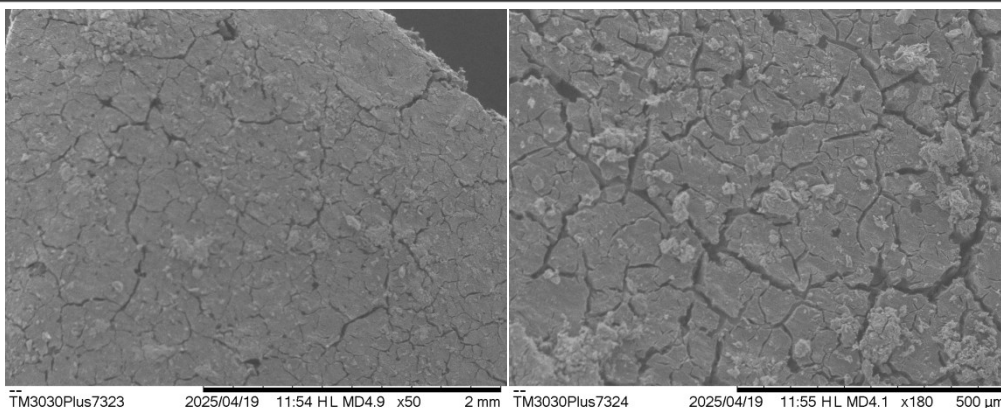


Figura 6: Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero produzido com cinzas de sementes de açaí como precursor. Fonte: Autora do trabalho.

Contudo, no geopolímero 2, no qual as cinzas de sementes açaí foram usadas como material precursor, observou-se maior incidência de microfissuras e de material não reagido. Sendo assim, sugere-se que as cinzas de sementes açaí apresentam melhor dissolução quando utilizadas na solução alcalina do geopolímero. Além disso, aos 7 dias de idade, a resistência mecânica média do geopolímero 1 foi superior à do geopolímero 2, corroborando a possibilidade de uma melhor dissolução das cinzas de sementes de açaí quando utilizadas na solução alcalina do geopolímero.

CONCLUSÃO

Visando à demanda da indústria da construção por novos materiais e considerando a grande quantidade de lodo de ETA e de sementes de açaí gerados em Macapá, estado do Amapá, Brasil, nesta pesquisa foi desenvolvido um novo material de construção, denominado geopolímero, composto de uma mistura desses resíduos. Os geopolímeros produzidos foram avaliados quanto à resistência mecânica e microestrutura.

Os resultados obtidos evidenciaram que é tecnicamente viável utilizar cinzas de sementes de açaí tanto na solução alcalina como no precursor de geopolímeros, pois ambos os materiais produzidos apresentaram características mecânicas e microestruturais muito próximas e adequadas para uso na construção civil em diversas aplicações. Aos 7 dias de idade, alcançaram até 9 MPa de resistência mecânica média, enquanto aos 28 dias atingiram 12 MPa, em média. Além disso, a microestrutura de ambos se mostrou adequada, com boa interação entre o gel geopolimérico e os agregados.

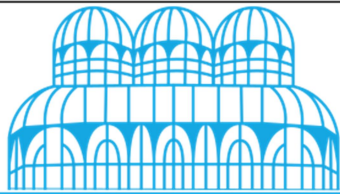
O uso da cinza de açaí como "co-ativador" é uma inovação científica com potencial para reduzir a necessidade de reagentes químicos caros e agressivos. A aplicação desta tecnologia de produção de geopolímeros a partir de lodo de ETA e sementes de açaí, poderia, por exemplo, gerar renda para comunidades que trabalham com o processamento de açaí e reduzir os custos de saneamento para o município.

Espera-se que, em breve, essa proposta possa ser uma alternativa ambientalmente adequada para a destinação de lodos de ETA e sementes de açaí, bem como uma nova matéria-prima para a indústria da construção, uma vez que o material resultante apresenta propriedades mecânicas adequadas para uso na construção civil, oferecendo uma solução de "economia circular" que retira resíduos poluentes do meio ambiente e reduz a dependência do cimento convencional.

Recomendações para trabalhos futuros: Testar a durabilidade do material frente à umidade extrema da Amazônia e realizar testes de lixiviação para garantir a total segurança ambiental do material a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andrade, Jairo *et al.* Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of cleaner production**, [S. l.], v. 192, 10 set. 2018.
2. Brasil. **Lei N° 12.305**, de 02 de agosto 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República, p 1 ,03 ago 2010.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



3. Cremades, L.V *et al.* Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of cleaner production**, [S. l.], v. 201, p. 1071-1080, 10 nov. 2018.
4. Cordeiro, *et al.* Caracterização da cinza de semente de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45-55, jan./mar. 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
5. Hagermann, S.A *et al.* Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of cleaner production**, [S. l.], v. 214, p. 916-926, 20 mar. 2019.
6. Ige, O. E. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. **Journal of Cleaner Production**, 324, 15 nov. 2021.
7. Santos, Gessica Zila Batista dos S. **Argamassa geopolimérica à base de lodo de estação de tratamento de água calcinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.
8. Santos, Gessica ZB *et al.* Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. *Journal of Environmental Management*, v. 249, p. 109328, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>.