COMPARATIVO ENTRE AGLOMERANTES GEOPOLIMÉRICOS PRODUZIDOS COM REJEITO DE BAUXITA E RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO COMO PRECURSORES: ANÁLISE MECÂNICA E FÍSICA

Comparison between geopolymeric binders produced with bauxite tailings and marble and granite residue as precursors: mechanical and physical analysis

Cássia Mirelly Milward de Souza
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | cassia.milward@ufv.br

Beatryz Cardoso Mendes
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | beatryz.mendes@ufv.br

Leonardo Gonçalves Pedroti

Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | leonardo.pedroti@ufv.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto

Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

José Maria Franco de Carvalho

Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | josemaria.carvalho@ufv.br

Resumo

O rejeito de bauxita, subproduto da obtenção do alumínio, é gerado em grande volume e polui o ambiente em que é depositado. Semelhantemente, o resíduo do beneficiamento de mármore e granito tem sido produzido em larga escala, ocasionando o assoreamento dos rios e poluição de grandes aterros os quais o abrigam. Buscando reduzir essas problemáticas, o estudo visou a produção aglomerantes geopoliméricos utilizando tanto o rejeito de bauxita, quanto o resíduo de mármore e granito como precursores, com o objetivo compará-los e verificar a viabilidade de aplicação na construção civil. Foram produzidos os aglomerantes geopoliméricos e obtidas sua resistência à compressão axial, densidade aparente e porosidade. Como resultado, concluiu-se que os precursores possuíam características semelhantes, mas os geopolímeros fabricados a partir do rejeito da bauxita apresentaram melhor estrutura e resistência à compressão axial. Ademais, ambos alcançaram resistência condizente com tijolos maciços cerâmicos, sugerindo sua aplicabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Geopolímeros; Lama vermelha; Rochas ornamentais; Resíduos.

ABSTRACT

Bauxite residue, a byproduct of aluminum production, is generated in large volumes and pollutes the environment where it is deposited. Similarly, the waste from marble and granite processing has been produced in significant quantities, causing river siltation and pollution of large landfills that contain it. Aiming to reduce these issues, the study focused on producing geopolymetric binders using both bauxite residue and marble and granite waste as precursors, with the objective of comparing them and verifying their application feasibility in the construction industry. Geopolymeric binders were produced, and their axial compressive strength, apparent density, and porosity were measured. As a result, it was concluded that the precursors had similar characteristics, but the geopolymers made from bauxite residue showed better structure and axial compressive strength. Furthermore, both achieved strength levels similar to solid ceramic bricks, suggesting their applicability in the construction industry.

Keywords: Geopolymer; Red mud; Ornamental rocks; Wastes.

1 INTRODUÇÃO

O resíduo do beneficiamento da bauxita é um composto insolúvel proveniente do processo Bayer na produção de alumínio, o qual é produzido em alta quantidade e comumente descartado em lagoas ou barragens voltadas para rejeitos. Segundo Sucharita (2015), estima-se que 90 milhões de toneladas deste resíduo são descartados anualmente, ocasionando contaminação do ambiente ao redor e impedindo o desenvolvimento da vegetação (DEGEN *et al*., 2023). O resíduo do beneficiamento de mármore e granito também é um grave poluente ambiental, sendo descartado cerca de 240 mil toneladas anuais (ROSATO, 2017) em rios e grandes aterros. Essas formas de descartes são extremamente poluentes, acarretando tanto no assoreamento e poluição das águas, quanto levando a perda de área útil devido a esses grandes aterros com estoque de resíduos. Nota-se que ambos os materiais são problemas ambientais que necessitam de uma nova destinação.

Os geopolímeros, uma subclasse dos materiais álcali-ativados, são uma opção viável para o emprego dos resíduos. Estudos como os de Souza *et. al* (2024) e Cardoso (2015) analisaram geopolímeros feitos a partir de resíduo cerâmico e de granito, respectivamente, e alcançaram valores de resistência mecânica semelhantes aos de materiais cimentícios. Esses elementos são formados pela união de um ativador, ou seja, uma solução altamente alcalina, e um precursor, que deve ser fonte de aluminossilicato. Ambos os resíduos estudados são fontes de aluminossilicatos (SOUZA *et al.,* 2024; MOURA *et al.,* 2023), sendo possível aplicá-los como precursores em aglomerantes geopoliméricos. A melhora das propriedades dos geopolímeros pode ser feita pela adição do metacaulim, uma argila calcinada que eleva o teor de material amorfo disponível para a reação de geopolimerização (SANTA, 2012). Portanto, o objetivo principal deste estudo foi comparar aglomerantes geopoliméricos produzidos a partir de rejeito de bauxita (RB) e resíduo de mármore e granito (RMG), analisando suas propriedades físicas e mecânicas para avaliar sua aplicabilidade na construção civil.

2 METODOLOGIA

2.1 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DO PRECURSOR

O resíduo de bauxita foi coletado e transportado da empresa Bauminas, em Miraí/MG, enquanto o resíduo do de mármore e granito é oriundo da empresa Decolores, de Cachoeiro do Itapemirim/ES. Ambos tiveram o mesmo tratamento inicial, que consistiu em ser seco ao ar e destorroado. O rejeito de bauxita foi colocado em estufa por 24h e, posteriormente, passou pelo processo de peneiramento utilizando a peneira ASTM 8 mesh (abertura de 2,38 mm), sendo que o resíduo de granito passou pelo mesmo peneiramento. A determinação granulométrica do rejeito de bauxita foi realizada via laser, pelo equipamento Bettersize 2000. Para o resíduo do beneficiamento de mármore e granito, foi produzida a curva granulométrica com base na NBR 7181 (ABNT, 2016).

Para ambos, a composição química foi obtida via ensaio de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o equipamento Shimadzu Micro-EDX-1300. A composição mineralógica foi determinada via difratometria de raios X (DRX), empregando o difratômetro D8 Discover (Bruker), de radiação CuKα (1,5418 Å), com o ângulo 2θ variando de 3° a 70°, 0,05° 2θ step-scan e 1,0 s/step. Para utilização na geopolimerização, o rejeito de bauxita passou por queima a 800°C por 3h, enquanto o resíduo de mármore e granito foi moído a 120 minutos. A areia quartzosa e o metacaulim utilizados foram obtidos comercialmente.

2.2 FASE EXPERIMENTAL

Foi utilizado o software Minitab®, na função desejabilidade, para definir uma mistura ótima a qual, baseada em estudos anteriores, teria uma previsão de resistência à compressão de, pelo menos, 4 MPa. Essa composição foi aplicada considerando tanto o rejeito de bauxita como precursor (MRB), quanto para o resíduo de mármore e granito sendo o precursor (MRMG). Em ambos os casos, foi utilizado o metacaulim como um segundo precursor e solução de NaOH 10 mol/L como o ativador. O teor de álcalis (ALK) foi fixado em 10%. No Quadro 1 está apresentada a composição.

Quadro 1: Composição definida via planejamento experimental

Mistura	RMG (%)	RB (%)	AQ (%)	MK (%)	ALK (%)
MRB	0,00	20,00	29,00	51,00	10,00
MRMG	20,00	0,00	29,00	51,00	10,00

Fonte: O autor (2025)

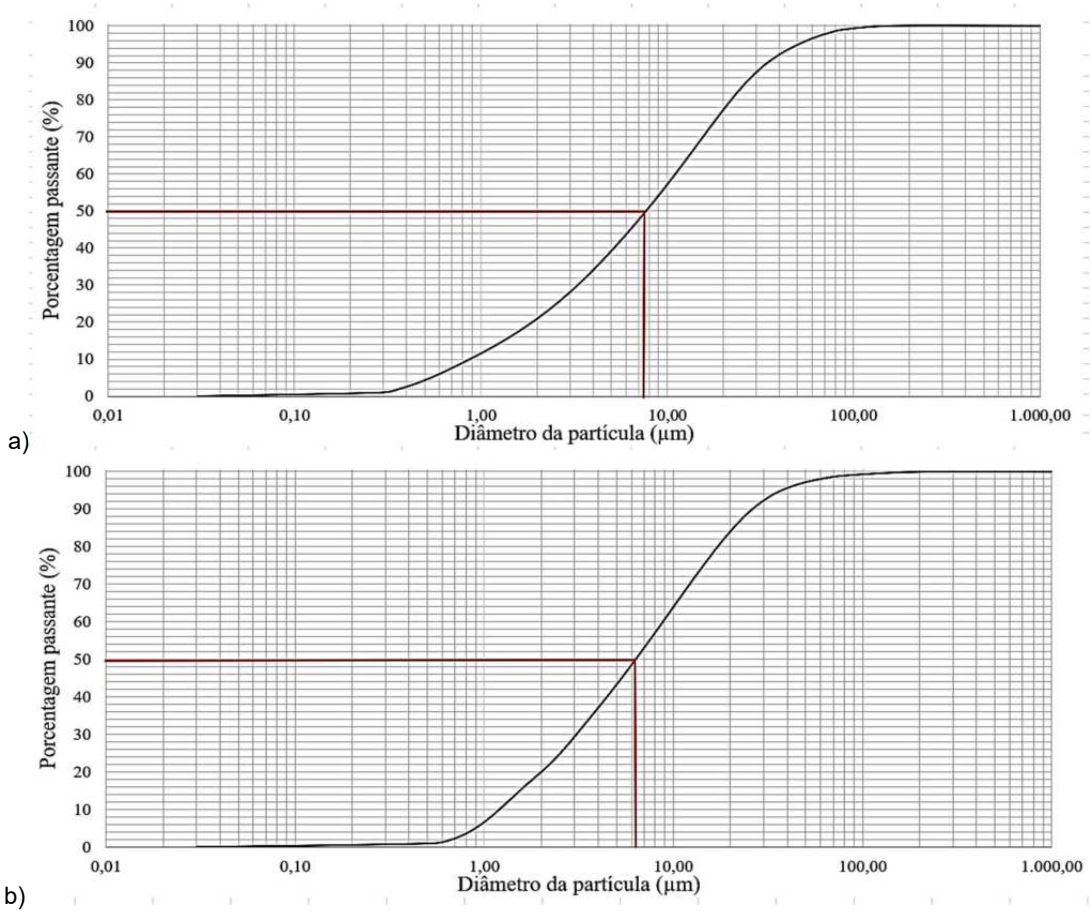
A produção dos corpos de provas foi realizada misturando primeiramente os materiais sólidos a seco, e posteriormente adicionando a solução alcalina e água. Utilizando-se de moldes cilíndricos, os exemplares foram conformados em prensa hidráulica manual, revestidos de plástico filme e inseridos em sacos herméticos. Foram produzidos 3 corpos de provas para cada resíduo. Foi realizada cura hidrotérmica a 60°C nas primeiras 24 horas, enquanto nos demais dias permaneceram em câmara úmida. Os corpos de provas foram ensaiados a 28 dias de cura, sendo obtida a resistência à compressão axial. Posteriormente, foi determinada a densidade aparente e porosidade. Assim, foi possível estabelecer um comparativo entre ambos e determinar qual das duas misturas tem propriedades mais favoráveis à aplicação na construção civil.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A distribuição granulométrica das partículas do rejeito de bauxita está presente na Figura 1a. O diâmetro típico (D_{50}) do material é de cerca de 8,0 µm, classificando-se como material siltoso. Com relação ao resíduo de granito, sua distribuição granulométrica apontou um D_{50} de 6,3 µm, classificando-se como silte, conforme demonstrado na Figura 1b. Nota-se que as curvas são semelhantes, indicando que não há grandes diferenças entre a granulometria dos materiais.

Figura 1: Curva granulométrica – a) RB; b) RMG



Fonte: O autor (2025)

A composição química dos resíduos está apresentada no Quadro 2. Um parâmetro importante para o processo de geopolimerização é a razão sílica/alumina. No caso do resíduo de bauxita, o valor foi de 0,72, considerado baixo para uma geopolimerização satisfatória (SILVA et al., 2022). Para o outro resíduo, ocorre o oposto, em uma razão de 9,8. O valor maior também não é um bom indicativo, uma vez que, segundo Davidovits (2011), a razão acima de 4 em geopolímeros pode prejudicar a densidade de suas ligações e afetar sua durabilidade. Portanto, ambos os materiais necessitam de maior equilíbrio em sua composição química.

Quadro 2: Composição química dos resíduos

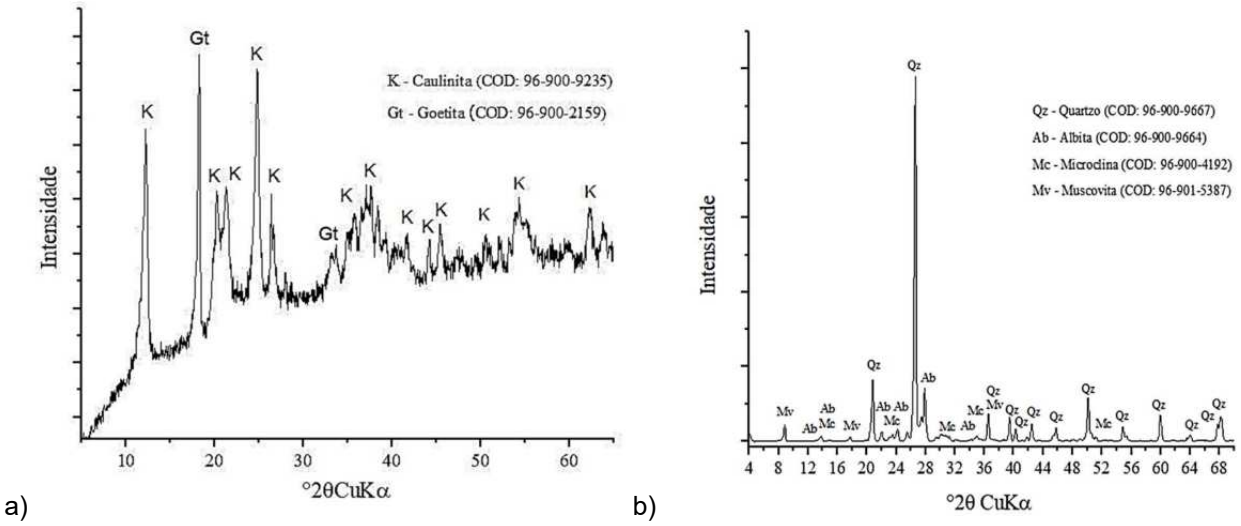
Resíduo	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	K_2O (%)	MgO (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	Outros (%)
RB	28,80	39,70	0,20	0,00	21,60	1,40	8,30
RMG	84,62	8,60	2,67	1,29	0,41	0,00	2,41

Fonte: O autor (2025)

Nota-se, ainda, que o teor de ferro é muito maior no resíduo de bauxita. De acordo com Kaya et. al (2022), o maior valor de Fe_2O_3 pode ser benéfico a melhora da resistência à compressão e aumento do seu peso unitário. Portanto, analisando-se exclusivamente a composição química, o resíduo de bauxita apresenta teores mais propícios à geopolimerização.

A composição mineralógica dos materiais está exposta na Figura 2. O ensaio no rejeito de bauxita, apresentado na Figura 2a, detectou picos cristalinos de caulinita e goetita, sugerindo que a sílica e alumina presentes não estão em seu estado reativo. Com relação ao resíduo de mármore e granito, o DRX indicou picos bem definidos de quartzo e albita. Para a reação de geopolimerização, o ideal é que os materiais estejam no estado amorfo, com maior energia disponível (SANTA *et al.,* 2014). Em ambos os casos, prevaleceu-se a fase cristalina nos resíduos.

Figura 2: Difratometria de raios X – a) RB; b) RMG



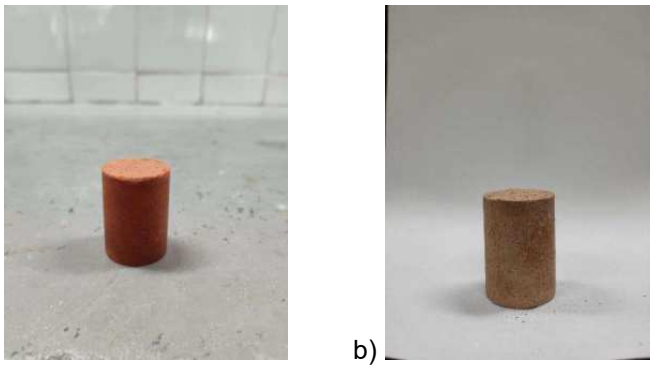
a) b)

Fonte: O autor (2025)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE GEOPOLIMÉRICO

Os corpos de provas produzidos estão apresentados na Figura 3. Nota-se que ambos os exemplares apresentaram dimensões semelhantes, mas coloração levemente diferente devido ao maior teor de ferro do resíduo de bauxita.

Figura 3: Corpos de provas produzidos com – a) RB; b) RMG



a) b)

Fonte: O autor (2025)

O resultado da resistência à compressão para os corpos de provas de ambos os resíduos está apresentado no Quadro 3. Nota-se que, para essa proporção, o aglomerante geopolimérico produzido com rejeito de bauxita apresentou maior resistência mecânica. Entretanto, haja vista que ambos foram superiores a 4 MPa, de acordo com a NBR 15270-2, os exemplares cumprem o requisito mecânico para serem classificados como um tijolo cerâmico maciço (ABNT, 2017).

Quadro 3: Comparativo das resistências mecânicas entre os aglomerantes geopoliméricos

Mistura	Resistência Mecânica (MPa)
MRB	6,1±0,1
MRMG	4,4±0,4

Fonte: O autor (2025)

Os resultados encontrados para a resistência à compressão axial indicam que, para a produção de aglomerantes geopoliméricos, o rejeito de bauxita tem maior potencial de reação se comparado ao resíduo de mármore e granito. Esse resultado possivelmente pode ser explicado pela composição química do rejeito de bauxita, o qual possui uma razão sílica/alumina mais equilibrada e maior teor de ferro, contribuindo para a formação de uma matriz mais densa.

Um comparativo da porosidade entre ambos os corpos de provas está apresentado no Quadro 4. Os exemplares produzidos a partir do rejeito de bauxita apresentaram quase a metade da porosidade dos realizados com resíduo de mármore e granito, concordando com o resultado da resistência à compressão axial. Logo, é possível sugerir que a porosidade foi decisiva na propriedade mecânica, propiciando matrizes mais duráveis e resistentes, conforme já comprovado em pesquisas anteriores (AZEVEDO *et al.,* 2018).

Quadro 4: Comparativo da porosidade entre os aglomerantes geopoliméricos

Mistura	Porosidade
MRB	0,37
MRMG	0,64

Fonte: O autor (2025)

A densidade aparente dos aglomerantes geopoliméricos está exposta no Quadro 5. Para geopolímeros produzidos com o mesmo ativador (NaOH), Bigno (2008) relatou um intervalo de 1,58 a 1,97 g/cm³, o que está condizente com o encontrado para os exemplares de rejeito de bauxita e resíduo de mármore e granito.

Quadro 5: Comparativo da densidade aparente entre os aglomerantes geopoliméricos

Mistura	Densidade Aparente (g/cm³)
MRB	1,92
MRMG	1,59

Fonte: O autor (2025)

A diferença de densidade aparente entre os aglomerantes indica diferentes graus de geopolimerização entre eles (AZEVEDO *et al.,* 2019). Esse também pode ter sido um fator decisivo para a diferença em termos de resistência mecânica apresentada pelos materiais, já que uma densidade aparente maior está relacionada à maior compactação do material, propiciando porosidade inferior e, portanto, aumento da resistência mecânica. Felizardo (2016), em estudos sobre geopolímeros, encontrou resultados que relacionam a redução da resistência à compressão axial com a redução da densidade aparente do seu material. Logo, as características físicas dos corpos de provas auxiliam na justificativa dos valores encontrados de resistência mecânica, além de condizer com os intervalos encontrados na literatura.

4 CONCLUSÃO

O estudo concluiu que os precursores apresentaram granulometria fina, ideal para geopolimerização, mas estrutura química e mineralógica menos indicadas para essa reação. Os elementos produzidos a partir do rejeito de bauxita obtiveram uma maior resistência mecânica, estrutura menos porosa e de maior densidade aparente. Logo, este resíduo apresenta um desempenho superior na geopolimerização, sendo uma escolha mais sustentável para aplicação. Ambas as composições alcançaram resistência mecânica em acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2017) para tijolos maciços cerâmicos e corroboram com a literatura (BARRETO, 2022; SEVERO, 2014) sobre a importância do estudo da composição química e mineralógica na geopolimerização. Portanto, este estudo amplia o conhecimento da viabilidade da utilização dos resíduos de bauxita e de granito,

oferecendo novas perspectivas sobre a aplicação de resíduos industriais como fontes alternativas na construção civil.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe do Laboratório de Materiais de Construção (LMC/UFV) e ao grupo de pesquisa SICon pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2017.

AZEVEDO, A. G., STRECKER, Kurt, LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, n. 371, p. 388–396, set. 2018. Acesso em: 25 jan. 2025. doi: https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712420.

AZEVEDO, T. F. et. al. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA., 28, Belo Horizonte. **Caracterização de rejeitos de lavagem de bauxita da Amazônia para produção de cimento geopolímero ambientalmente sustentável.** Belo Horizonte: nov. 2019. Disponível em: <https://www.entmme2019.entmme.org/download-trabalhos/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

BARRETO, I. A. R. **Aplicação de resíduos da mineração de bauxita na síntese de geopolímeros**. 2022. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará. Acesso em: 11 mar. 2025.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Acesso em: 24 jan. 2025.

DAVIDOVITS, J. **Química e aplicações de geopolímeros**. 3ed. reimp. Saint-Quentin: Instituto Geopolímero, 2011.

DEGEN, M. *et. al.* Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias. 6° ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVI, 2023, Belém. **Anais 2019**. Belém: 10 jul 2023. 340-356. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3413>. Acesso em: 25 jan. 2025.

FELIZARDO, V. *et. al.* Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutividade térmica. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 21, n. 2, p. 429–436, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/7D7T84NJxNk3qQwd3gqXvgS/?lang=pt>. Acesso em: 25 jan. 2025. doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0040.

KAYA, M., KOKSAL, F., GENCEL, O., *et al.* Influence of micro Fe2O3 and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 52, pp. 104443, 2022. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104443. Acesso em: 11 mar. 2025.

MOURA, H. R. C. V. *et al.* Influence of biocide and dispersant additives on the performance and durability of building paints produced with granite waste. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 134112, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823038308>. Acesso em: 25 jan. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134112.

ROSATO, C. S. O.**Marmorarias de Salvador:** um estudo quantitativo e estratégico sobre reaproveitamento e reciclagem de resíduos de rochas ornamentais. 2013. Tese (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador. Acesso em: 24 jan. 2025.

SANTA, R. A. A.B. 2012. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas de olaria e metacaulim**. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFSC, Santa Catarina.

SANTA, R. A. A. B. *et. al.* **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas por ativação alcalina**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2014, Florianópolis. Florianópolis: out. 2014. ISSN 2178-5600. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2014/trabalhos?lang=pt-br>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SEVERO, C. G. S. **Reciclagem de resíduos de serragem do granito e do beneficiamento do caulim utilizando ativação alcalina**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SILVA, S. M.; FREIRE, C. B. Metodologia para síntese de geopolímero visando o tratamento de rejeitos radioativos orgânicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 33457-33474. Disponível em: < https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/47434>. Acesso em: 24 jan. 2025. doi: https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-055

SOUZA, C. M. M.; MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; VIEIRA, C. M. F. Evaluation of geopolymer composites, based on red mud and metakaolin, for building application. **Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2024**. 1 ed. Springer: 2024. cap. 1, p. 412-421. Disponível em: < https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-50304-7>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SUCHARITA, P.; Pal, B.K. Current Status of an Industrial Waste: Red Mud an Overview. **IJLTEMAS**, vol. 4, pp. 1-16, 2015. ISSN 2278 - 2540. Disponível em: <https://www.ijltemas.in/archive/volume-iv-issue-viii/>. Acesso em: 24 jan. 2025.