

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Incorporação do resíduo de bauxita em material cerâmico.

Marcus Vinicius de Freitas Mendes
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

MARCUS VINICIUS DE FREITAS MENDES

Incorporação do resíduo de bauxita em material cerâmico.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Leonardo Goncalves Pedroti

Coorientador: Jose Luiz Rangel Paes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M538i
2025
Mendes, Marcus Vinícius de Freitas, 1998-
Incorporação do resíduo de bauxita para fabricação de
blocos cerâmicos de vedação / Marcus Vinícius de Freitas
Mendes. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (74 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.
Referências bibliográficas: f. 66-74.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.558>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Blocos (Materiais de construção). 2. Bauxita -
Reaproveitamento. 3. Cerâmica. 4. Sustentabilidade e meio
ambiente. I. Pedroti, Leonardo Gonçalves, 1978-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 624.1891

MARCUS VINICIUS DE FREITAS MENDES

Incorporação do resíduo de bauxita em material cerâmico.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Marcus Vinicius de Freitas Mendes
Autor

Leonardo Goncalves Pedroti
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 28/08/2025 às 15:30:38 e pelo orientador em 28/08/2025 às 16:21:38. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **9NAR.47VQ.EA13** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por toda iluminação e bênçãos concedidas em minha vida, além da força que me sustentou nos momentos difíceis. À Virgem Maria, Nossa Senhora, por sua intercessão e amparo, e ao meu anjo protetor, que sempre esteve ao meu lado.

À minha namorada, Leslie Moura Xavier, por sua presença constante, independentemente das circunstâncias, pelo apoio incondicional, pelos conselhos e por tornar minha trajetória no mestrado mais leve e agradável, transmitindo tranquilidade nos momentos desafiadores.

Aos meus pais, Ana Flávia de Freitas Mendes e Dr. Vandeth Mendes Junior, por serem minha base, meu porto seguro, e por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, oferecendo orientação e me conduzindo pelos melhores caminhos.

À minha irmã, Bárbara Gabrielle Freitas Mendes, e à minha sobrinha e afilhada, Maria Vitória Mendes Silva, pelo apoio e demonstrações de carinho ao longo dessa caminhada.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de avançar em minha formação acadêmica e pelo ensino de excelência desde a graduação.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ao professor Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti, por sua orientação e direcionamento na escolha do tema, além do acompanhamento e suporte ao longo desses anos.

Aos professores Dr. Flávio Antônio Ferreira e Dr. José Maria Franco de Carvalho, meus coorientadores, pela receptividade ao me integrar em seu projeto e por todo suporte concedido durante o mestrado.

À professora Dra. Beatriz Cardoso Mendes, pela contribuição ao longo do trabalho, pelo ensino, pelo auxílio na dissertação e na análise de dados, e pelo apoio contínuo à pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que contribuíram com seus conhecimentos para minha formação.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil (LEC), pelo companheirismo, pelo auxílio nos experimentos e pelas amizades construídas, que tornaram essa experiência ainda mais enriquecedora.

“[...] tudo o que pedirdes em oração, crendo que o recebeste, ser vosso...” (Marcos 11-24)

RESUMO

MENDES, Marcus Vinicius de Freitas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Incorporação do resíduo de bauxita em material cerâmico..** Orientador: Leonardo Goncalves Pedroti. Coorientador: Jose Luiz Rangel Paes.

Conhecido como “lama vermelha”, o resíduo de bauxita é resultante do processo de produção do alumínio. No Brasil, somente no ano de 2022, foram extraídas cerca de 810 mil toneladas de alumínio, gerando entre 7 a 10 milhões de toneladas de lama vermelha. É importante destacar ainda, que grande parte desse material é descartado ou armazenado próximo às bacias e redes fluviais, podendo ser carregados, provocando a contaminação do meio a que foi inserido, consequentemente danos ao meio ambiente. Desta forma, o objetivo desse estudo foi não apenas melhorar o desempenho de misturas para blocos cerâmicos, mas também promover o reaproveitamento do resíduo de bauxita, especialmente no contexto brasileiro, onde este se encontra em abundância. Logo, buscou-se uma mistura ótima através do modelo de misturas Simplex, avaliando as proporções ideais do resíduo de bauxita e de duas argilas que passaram pela caracterização química, física, morfológica e mineralógica ao longo do trabalho. Teores elevados de resíduo comprometeram a resistência mecânica e aumentaram a absorção de água. A otimização pelo método simplex indicou que a incorporação de até 13% do resíduo, combinada com argilas em proporções adequadas, resultou em misturas com desempenho satisfatório. Além disso, a queima a 1000°C melhorou as propriedades do material. Os resultados demonstram a viabilidade do reaproveitamento da lama vermelha em baixos teores, contribuindo para a sustentabilidade da indústria cerâmica e de mineração.

Palavras-chave: Lama vermelha; Massa cerâmica; Sustentabilidade; Gestão de resíduos.

ABSTRACT

MENDES, Marcus Vinicius de Freitas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Incorporation of bauxite residue into ceramic material.** Adviser: Leonardo Goncalves Pedroti. Co-adviser: Jose Luiz Rangel Paes.

Known as “red mud,” bauxite residue results from the aluminum production process. In Brazil, in 2022 alone, approximately 810 thousand tons of aluminum were extracted, generating between 7 and 10 million tons of red mud. It is important to emphasize that a large portion of this material is discarded or stored near basins and river networks, where it may be carried away, causing contamination of the environment into which it is introduced, and consequently environmental damage. Therefore, the objective of this study was not only to improve the performance of mixtures for ceramic blocks but also to promote the reuse of bauxite residue, especially in the Brazilian context, where it is found in abundance. Thus, an optimal mixture was sought through the Simplex mixture model, evaluating the ideal proportions of bauxite residue and two clays that underwent chemical, physical, morphological, and mineralogical characterization throughout the study. High contents of residue compromised mechanical strength and increased water absorption. Optimization using the Simplex method indicated that the incorporation of up to 13% of the residue, combined with clays in appropriate proportions, resulted in mixtures with satisfactory performance. Furthermore, firing at 1000°C improved the material properties. The results demonstrate the feasibility of reusing red mud in low contents, contributing to the sustainability of the ceramic and mining industries.

Keywords: Red mud; Ceramic material; Sustainability; Waste management

Lista de Ilustrações.

Figura 1.1- Diagrama para prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg

Figura 1.2 - Diagrama Granulométrico de Winkler

Figura 1.3- Blocos cerâmicos verdes em momento de secagem, esperando a próxima etapa (queima).

Figura 1.4.- Processo de produção do alumínio a partir da bauxita.

Figura 1.5 - Consumo mundial de alumínio.

Figura 2.1- Amostras dos solos. a) argila vermelha (RC); b) Argila Amarela (YC).

Figura 2.2- Modelo simplex junto com a tabela de misturas dos materiais.

Figura 2.3- Corpos de Prova cilíndricos.

Figura 2.4- Diagrama de Winkler.

Figura 2.5- Diagrama de Extrusão

Figura 2.6- MEV das amostras. **(a)** Argila vermelha RC; **(b)** Argila Amarela YC; **(c)** Resíduo de bauxita

Figura 2.7-DRX das argilas.

Figura 2.8- DRX do Resíduo de Bauxita.

Figura 2.9- TGA/DTA das argilas.

Figura 2.10- Retração dos corpos de prova

Figura 2.11- Absorção de água. **(a)** Mistura a 800°C; **(b)** Mistura a 900°C; **(c)** Mistura a 1000°C.

Figura 2.12- Resistência Mecânica dos blocos cerâmicos. **(a)** Temperatura a 800°C; **(b)** Temperatura a 900°C.; **(c)** Temperatura a 1000°C.

Figura 3.1- Gráfico com teores de absorção e retração de água.

Figura 4.1- Dados da mistura em modelo Simplex.

Figura 4.2- Retração dos corpos de prova. **a)** Temperatura de 900°C. **b)** Temperatura de 1000°C

Figura 4.3- Absorção de água. **(a)** na temperatura de 900°C. **(b)** na temperatura de 1000°C.

Figura 4.4- Resistência mecânica. **a)** temperatura de 900°C. **b)** Temperatura de 1000°C.

Figura 4.5- Otimizador de resposta.

Figura 4.6- DRX da mistura.

Figura 4.7- Diagrama de Winkler da mistura

Figura 4. 8- Diagrama de extrusão.

Figura 4.9- DTA e TG da mistura ideal

Lista de Tabelas

Figura 1.1 - Principais países produtores de cerâmica vermelha no mundo entre 2017 e 2021.

Figura 1.2 - Principais países consumidores de cerâmica vermelha no mundo entre 2017 e 2021. **Tabela 2.1-** Granulometria das amostras.

Tabela 2.2 - Limites de Liquidez (LL) , Plasticidade (LP) e o Índice de Plasticidade (IP);

Tabela 2.3- FRX das amostras.

Tabela 3.1- Dados das misturas.

Tabela 3.2- Resistência dos corpos de prova

Tabela 4.1- FRX da mistura

Sumário

1. Introdução Geral.....	11
1.1 Contextualização sobre cerâmica.	11
1.2 Cerâmica vermelha do Brasil.	15
1.3 Resíduo de Bauxita.	16
1.4 Planejamento de mistura através da metodologia Simplex.....	19
1.5 Incorporação de resíduo de bauxita na massa cerâmica.	20
1.7 Objetivos.....	21
1.7.1 Objetivos gerais.....	21
1.7.2 Objetivos específicos.....	22
1.8 Justificativa.....	22
1.9. Estruturação do trabalho.....	23
<i>Capítulo 2- Incorporação da lama vermelha em mistura para blocos cerâmicos de vedação.....</i>	<i>25</i>
Resumo.....	25
2.0 Introdução.....	25
2.2. Metodologia.....	27
2.2.1. Coleta dos materiais.....	27
Figura 2.1- Amostras dos solos. a) argila vermelha (RC); b) Argila Amarela (YC).....	28
2.2.2. Caracterização dos materiais.....	28
2.2.3. Preparação das misturas.	29
2.2.4. Preparação dos Corpos de Prova.	29
2.2.5. Análise Estatística.	31
2.3 Resultados e Discussões.	31
2.3.1. Caracterização.....	31
2.3.2. Retração dos corpos de prova.....	37
2.3.3. Absorção de água.....	38
2.3.4. Porosidade.	39
2.3.5. Resistência Mecânica.	40
2.4 Conclusão.....	41
<i>Capítulo 3 - Incorporação de lama vermelha em proporção de fabricação de blocos cerâmicos de vedação em olaria da cidade de Raul Soares - MG.....</i>	<i>43</i>
Resumo.....	43
3.0 Introdução.	43
3.1 Materiais e Métodos.....	45

3.1.1. Produção dos Corpos de Prova.....	45
3.2.2 Análise dos corpos de Prova.....	46
3.2 Resultados e Discussão.....	47
3.3.1 Análise dos Corpos de Prova.	47
3.3 Conclusão.....	48
<i>4.0 Capítulo 4 - Estudo de mistura ideal para adição de lama vermelha na fabricação de blocos cerâmicos de vedação através de planejamento experimental pelo método simplex.....</i>	
Resumo.....	50
4.1 Introdução.	50
4.2 Metodologia.	53
4.2.1. Preparação das Misturas.....	53
4.2.2. Análise estatística dos corpos de prova.....	54
4.2.3. Identificação da Mistura.	55
4.2.4. Caracterização da Mistura ideal.	55
4.2.5. Preparação dos corpos de prova da Mistura ideal.....	55
4.2.6. Análise dos corpos de prova da Mistura ideal.....	56
4.3 Resultados e Discussões.	56
4.3.1. Retração dos corpos de prova.....	56
4.3.2. Absorção de água.	57
4.3.3. Resistência à compressão.....	58
4.3.4. Identificação da Mistura.	59
4.3.5. Caracterização da mistura.....	60
4.3.6. Absorção de Água.	63
4.3.7. Resistência Mecânica.	63
4.4 Conclusões	64
5.0 Conclusão geral.....	65
5.1 Conclusões dos estudos	65
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	65
6.0 Referências Bibliográficas	66

1. Introdução Geral

1.1 Contextualização sobre cerâmica.

O Brasil é o terceiro país que mais produz e que mais consome da indústria cerâmica mundialmente, de acordo com a pesquisa feita pela revista *Ceramic World Review* (2022), como apontadas nas tabelas 1.1 e 1.2. Os dados destacam o protagonismo do Brasil no mercado de cerâmica vermelha e sua ampla utilização na indústria nacional. A Pesquisa Nacional de Domicílios (IBGE) indicou que cerca de 88,2% das construções no país utilizam alvenaria, sendo que estruturas de concreto armado, paredes de tijolo cerâmico e revestimento com argamassa cimentícia predominam em 62,6 milhões das 71 milhões de unidades domiciliares (PNAD, 2019).

Tabela 1.1 -Principais países produtores de cerâmica vermelha no mundo entre 2017 e 2021

PAÍS	2017(Mm³)	2018(Mm³)	2019(Mm³)	2020(Mm³)	2021(Mm³)	% da produção mundial em 2021	% variação 2020-2021
CHINA	10.146	9.011	8.225	8.474	8.863	48,30%	4,60%
ÍNDIA	1.897	2.011	2.223	2.318	2.550	13,90%	10,0%
BRASIL	867	872	909	840	1.049	5,70%	24,90%
ESPANHA	530	530	510	480	587	3,20%	20,30%
IRÃ	373	383	398	449	458	2,50%	2,00%
TURQUIA	355	335	296	370	438	2,40%	18,40%
ITÁLIA	422	416	401	344	435	2,40%	26,65%
INDONÉSIA	307	383	347	304	410	2,20%	34,90%
VIETNÃ	560	602	560	534	370	2,00%	30,70%
EGITO	300	300	300	285	310	1,70%	8,80%
TOTAL	15.757	14.843	14.169	14.406	15.470	84,40%	7,40%
TOTAL MUNDIAL	18.208	17.430	16.803	17.101	18.339	100%	7,20%

Fonte: Adaptado de *Ceramic World Review* (2022)

Tabela 1.2 -Principais países consumidores de cerâmica vermelha no mundo entre 2017 e 2021

PAÍS	2017(Mm³)	2018(Mm³)	2019(Mm³)	2020(Mm³)	2021(Mm³)	% do consumo mundial em 2021	% variação 2020-2021
CHINA	9.244	8.163	7.453	7.859	8.268	45,40%	5,20%
ÍNDIA	1.678	1.742	1.867	1.884	2.069	11,40%	9,80%
BRASIL	765	775	802	829	902	5,00%	8,80%
INDONÉSIA	336	450	413	357	478	2,60%	33,90%
VIETNÃ	580	542	467	400	300	1,60%	-25,00%
TURQUIA	251	236	185	241	291	1,60%	20,70%
EUA	284	289	273	264	289	1,60%	9,50%
EGITO	252	236	239	237	278	1,50%	17,30%
MÉXICO	242	236	238	242	276	1,50%	14,00%
ARÁBIA SAUDITA	210	206	223	284	252	1,40%	-11,30%
TOTAL	13.842	12.875	12.160	12.597	13.403	73,60%	6,40%
TOTAL NO MUNDO	18037	17.313	16.638	17.050	18.209	100,00%	6,80%

Fonte: *Ceramic World Review* (2022)

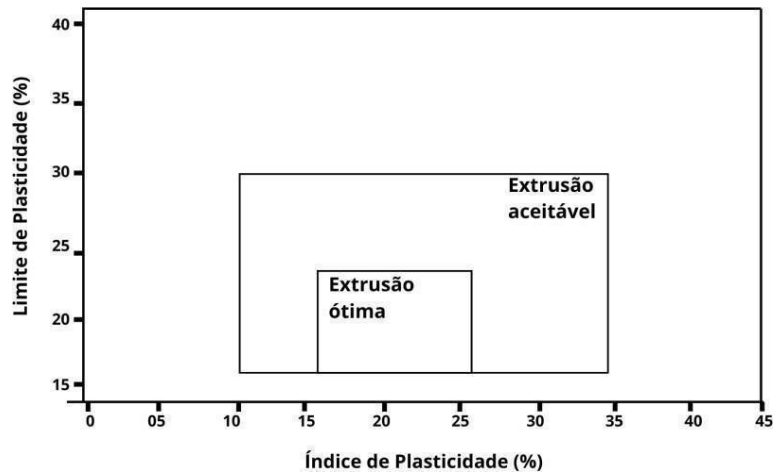
A fabricação de blocos cerâmicos é um processo complexo e multifacetado que desempenha um papel crucial na indústria da construção civil. Este processo, que vai desde a coleta de materiais até a venda final do produto, requer uma compreensão aprofundada de cada etapa para garantir a produção de blocos de alta qualidade, como é evidenciado por Silva (2019).

A partir disso, a primeira etapa do processo de fabricação de blocos cerâmicos envolve a coleta de matéria-prima, que geralmente consistem em argila e outros blocos cerâmicos. A qualidade das matérias-primas desempenha um papel crucial na determinação das propriedades dos blocos. Autores como Azevedo *et al.* (2022) destacam a importância da análise mineralógica e química das matérias-primas para garantir a qualidade do produto final.

Neste contexto, Sabino (2016) menciona que as propriedades mais importantes das argilas são a plasticidade, a retração linear de secagem e o efeito do calor. Para a conferência

de uma plasticidade adequada para a extrusão de blocos cerâmicos, pode-se utilizar o diagrama de prognóstico de extrusão, como indica a Figura 1.3 e que se baseia no índice e limite de plasticidade, obtidos por ensaios físicos prescritos nas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

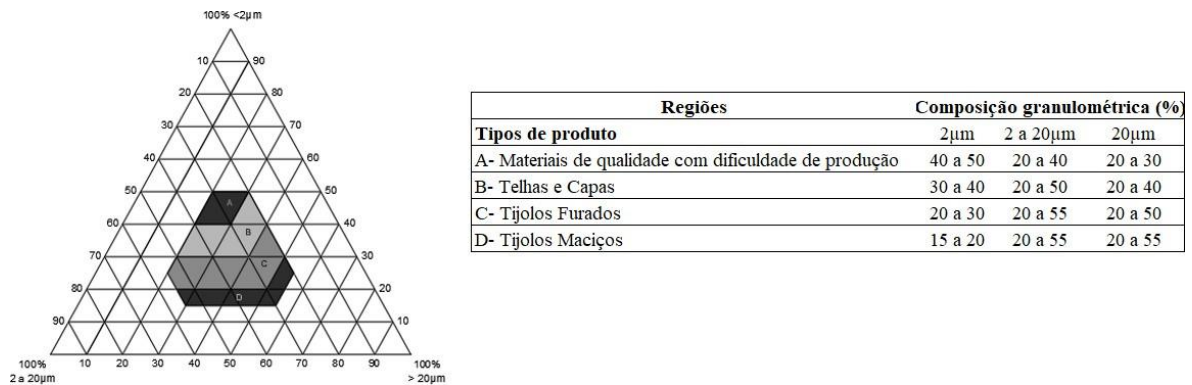
Figura 1.1- Diagrama para prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg



Fonte: Vieira et al. (2008)

Após a coleta, a matéria-prima passa por processos de preparação, como moagem e homogeneização. A moagem é essencial para obter uma granulometria adequada, permitindo uma mistura homogênea. Para orientar o estudo de como fazer essa distribuição granulométrica, a fim de economizar matéria prima e adequá-la para se obter um produto final de boa qualidade, pode-se utilizar o diagrama de Winkler, como foi apresentado na Figura 1.2. O diagrama refere-se a quatro regiões (A, B, C, D), onde se situam os tipos de produtos da cerâmica vermelha que apresentam a composição granulométrica adequada com a dosagem de grãos finos, médios e grossos.

Figura 1.2 - Diagrama Granulométrico de Winkler



Fonte: Pracidelli, Melchiades (1997).

A mistura das matérias-primas é seguida pela moldagem dos blocos, que pode ser realizada por prensagem a seco ou extrusão a úmida, dependendo do tipo de bloco desejado. A literatura, como o trabalho de Silva (2017), ressalta a influência do teor de umidade e da pressão aplicada na qualidade e nas características dos blocos.

Assim, após a moldagem, os blocos são submetidos à secagem, e o processo adequado de secagem é essencial para evitar fissuras e deformações. Na Figura 1.3, é destacada uma área de secagem dos blocos cerâmicos, especialmente após o processo de extrusão, ressaltando a importância crucial do controle preciso de temperatura. Este controle deve ser rigoroso e é fundamental para evitar deformações e perda de propriedades de secagem dos blocos cerâmicos, tais como a resistência do bloco.

Figura 1.3- Blocos cerâmicos verdes em processo de secagem, antes da etapa de queima.



Fonte: Autor

Seguindo o processo, a queima é a etapa crucial que confere ao bloco sua resistência final. Autores como Dutra *et al.*(2009), enfatizam a relevância do controle cuidadoso do processo de queima, especialmente no contexto de blocos cerâmicos. A regulação precisa da temperatura torna-se ainda mais importante, considerando que, em fornos de grande escala, as temperaturas podem variar entre a parte superior e inferior.

Um controle meticuloso durante o processo de queima é crucial para garantir que os blocos cerâmicos atinjam a resistência desejada e mantenham a qualidade necessária. Interrupções inadequadas no processo de queima, como variações de temperatura e atmosfera do forno, podem influenciar diretamente na sinterização das matérias-primas, impactando as propriedades finais dos blocos e comprometendo sua qualidade (Dutra *et al.*, 2009).

Após a queima, os blocos cerâmicos passam por um processo de resfriamento controlado. O resfriamento inadequado pode causar fissuras nos blocos. Leys, Soares e Roque (2022) abordam a importância do resfriamento gradual e controlado para evitar defeitos em produtos cerâmicos.

1.2 Cerâmica vermelha do Brasil.

A indústria da cerâmica tem uma presença marcante no cenário global, com o Brasil se destacando como um dos principais produtores e consumidores. O país ocupa a posição de terceiro maior consumidor e produtor de revestimentos cerâmicos no mundo, demonstrando a relevância deste setor na economia nacional (ANFACER; 2023). A qualidade e a variedade dos produtos cerâmicos brasileiros têm aumentado constantemente.

Os dados mais recentes sobre a produção de cerâmica vermelha no Brasil datam de 2021, conforme divulgado pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) com base em informações do IBGE. Neste ano, o setor era composto por aproximadamente 5.578 empresas, responsáveis por uma produção anual de cerca de 2,26 bilhões de telhas e 5,89 bilhões de blocos. Além disso, o segmento gerava mais de 300 mil empregos diretos e 900 mil indiretos, representando 4,8% da indústria da construção civil no país. (ANICER, 2020)

As principais regiões produtoras de cerâmica no Brasil estão concentradas nas regiões Sul e Sudeste, com empresas nacionais se destacando no cenário global. Em 2022, a *Revista Ceramic World Review*, em colaboração com o MECS (Departamento de Pesquisas da Acimac), publicou um ranking dos maiores produtores mundiais de cerâmica, classificação que foi posteriormente divulgada pela Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER) em 2023.

Nesse ranking, quatro empresas brasileiras se posicionaram entre os 25 maiores produtores globais: Carmelo Fior (6ª posição), Grupo Cedasa (10ª posição), Grupo Fragnani (11ª posição) e Portobello (24ª posição). Esses dados reforçam a relevância da indústria cerâmica brasileira no mercado internacional e sua concentração nas regiões Sul e Sudeste do país.

O Nordeste brasileiro tem potencial para se tornar um importante pólo cerâmico em um futuro próximo. De acordo com Mello *et al.* (2011), essa região apresenta condições favoráveis para o desenvolvimento da indústria cerâmica, incluindo a disponibilidade de matéria-prima, a viabilidade energética e um mercado consumidor em desenvolvimento.

A localização geográfica do Nordeste é estratégica para a exportação de produtos cerâmicos, o que pode contribuir para o fortalecimento da indústria cerâmica na região e no país como um todo. Com isso, a indústria da cerâmica brasileira, embora já consolidada em algumas regiões como citadas no texto (Sul e Sudeste), tem um grande potencial de expansão para outras regiões, o que pode contribuir ainda mais para a economia e o desenvolvimento do país. (ANICER, 2020)

O intuito é aprimorar produtos cerâmicos com foco em facilitar sua utilização e explorar novas aplicações, permitindo adaptabilidade ao setor industrial. Destaca-se também a importância da incorporação de novas tecnologias nos processos industriais cerâmicos que pode aumentar a produtividade e a competitividade, além de minimizar o consumo de energia e a geração de efluentes e gases, medidas são essenciais para a sustentabilidade e expansão do setor cerâmico no país. (Berni Millet et al., 2013)

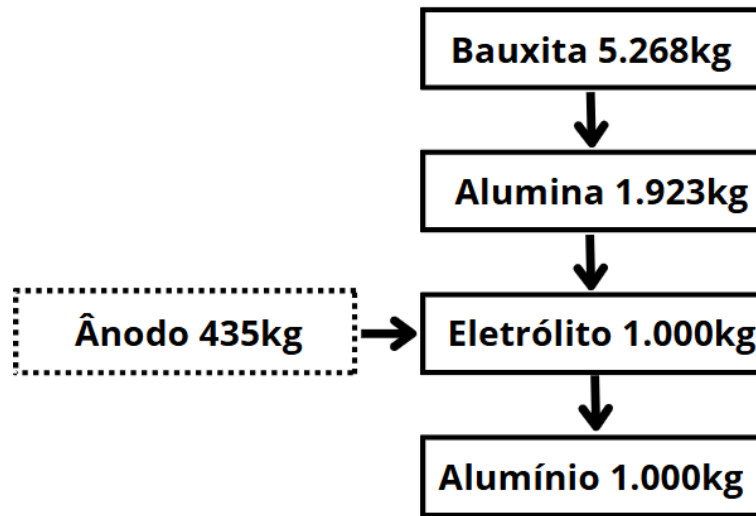
1.3 Resíduo de Bauxita.

O processo de produção do alumínio envolve a extração de alumina a partir da bauxita, um mineral de alumínio abundantemente encontrado na natureza (Antunes e Conceição, 2023). Esse minério é composto principalmente por hidróxidos de alumínio, óxidos e hidróxidos de ferro, caulinita, haloisita, óxido de titânio e outros elementos. Além disso, segundo Antunes e Conceição (2023), o processo de obtenção de alumina é geralmente realizado pelo chamado *Processo Bayer*, que é um dos métodos mais comuns na indústria do alumínio. Esse processo envolve a dissolução da bauxita em soda cáustica, resultando na formação de uma solução alcalina contendo alumina.

Na figura 1.4 é apresentado o fluxograma da conversão da bauxita em alumina e posteriormente em alumínio, tendo uma quantidade considerável de resíduos sendo gerada. Dos 5.268 kg de bauxita extraídos, apenas 1.000 kg foram convertidos em alumínio,

resultando com isso, em uma geração de resíduo de pelo menos 81% do material extraído.

Figura 1.4 - Processo de produção do alumínio a partir da bauxita.



Fonte: Adaptado de International Aluminium Institute (2024)

Essa dispersão dos resíduos da bauxita, conhecida como “lama vermelha”, surge como rejeitos resultantes do processo. Essa lama é uma mistura insolúvel que se acumula no fundo das autoclaves após a dissolução da bauxita. Ela é caracterizada por possuir um pH fortemente alcalino, com valores em torno de 13. Além disso, a lama vermelha contém uma variedade de elementos, incluindo sílica, alumínio, ferro, cálcio, titânio, sódio, potássio, cromo, vanádio, nióbio, bário, manganês, cobre, chumbo, zinco, entre outros (Saternus, 2011).

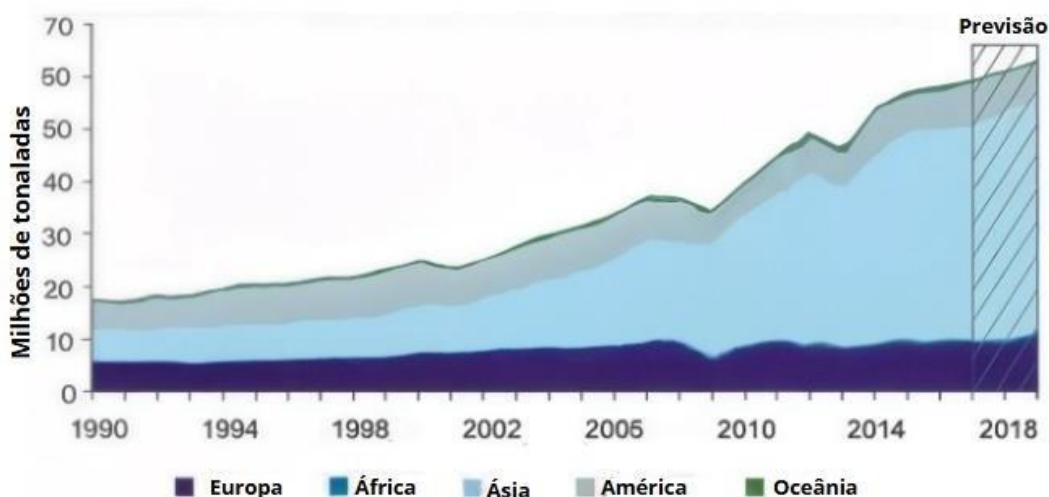
Segundo Freitas et al. (2019), essa composição complexa torna a lama vermelha um desafio ambiental significativo. A lama vermelha é comumente depositada em barragens, o que pode resultar em impactos adversos, como a contaminação de solos e recursos hídricos. Sendo que, o material representa uma preocupação também para a segurança humana, em virtude de desastres relacionados a barragens de rejeitos ocorridos em várias partes do mundo. Portanto, a gestão adequada e o reaproveitamento da lama vermelha são questões críticas que a indústria do alumínio enfrenta

Assim, de acordo com Silva Filho, Alves e Motta (2007) é importante mencionar que países como o Brasil, que têm uma produção expressiva de alumina e alumínio, enfrentam desafios relacionados ao descarte e ao gerenciamento da lama vermelha. A busca por soluções sustentáveis que minimizem o impacto ambiental dessa substância é uma prioridade, substancialmente em uma era onde a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental desempenham um papel central nas indústrias.

Na Figura 1.5 é apresentado a evolução dos volumes de extração de alumina e alumínio,

evidenciando um crescimento significativo na exploração da bauxita desde a década de 1990. Esse cenário ressalta a necessidade de se discutir estratégias eficazes para o manejo dos resíduos gerados, reforçando a importância da adoção de práticas pautadas pela responsabilidade ambiental no setor industrial.

Figura 1.5- Consumo mundial de alumínio



Fonte: RMMG- Recursos Minerais de Minas Gerais.

A bauxita, essencial para a produção de alumina e alumínio, é um mineral encontrado principalmente em regiões tropicais e subtropicais. Os maiores produtores mundiais incluem Austrália, China, Brasil, Guiné, Jamaica e Índia, com a Guiné e a Austrália detendo as maiores reservas, cada uma na casa dos bilhões de toneladas (Sampaio *et al.*, 2005).

No Brasil, a maior parte da produção de bauxita é direcionada para a refinaria de alumina, onde se inicia o processo de produção de alumínio, com uma parcela menor sendo utilizada na indústria de refratários e químicos (Cardoso *et al.*, 2011). Essa produção de alumínio, embora essencial, traz consigo a questão da geração de resíduos, incluindo a lama vermelha. Apesar de não ser considerada prejudicial diretamente para o homem, conforme Batista (2020), a lama vermelha é altamente alcalina e rica em metais pesados, o que pode ter um impacto ambiental expressivo, alterando as características e a estabilidade do meio ambiente.

Um ponto essencial a ser discutido é a gestão dos riscos relacionados à extração da bauxita. Como apresentado por Neves-Silva e Heller (2020), o trágico exemplo do rompimento das barragens em Brumadinho-MG, que detinham rejeitos do processo de beneficiamento do minério de ferro, demonstra os riscos associados ao contato direto da população com os resíduos resultantes do processo de mineração, que foram espalhados pelo rompimento no meio ambiente. Através disso, surgem prejuízos à saúde humana que vão

desde o consumo de alimentos, à utilização de água contaminada.

A partir do estudo de Eid. (2015), é importante destacar que, quando bem acondicionado, o resíduo de bauxita, conhecido como "lama vermelha", não é considerado tóxico à saúde humana, conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 10.004/2004 para resíduos sólidos. No entanto, seu descarte inadequado pode ocasionar impactos ambientais e de manejo considerável, afetando negativamente os ecossistemas nos quais é depositado, reforçando a importância do estudo de destinação do resíduo.

1.4 Planejamento de mistura através da metodologia Simplex.

A metodologia Simplex, originada do campo da otimização matemática, é uma ferramenta poderosa e versátil que tem sido aplicada em uma variedade de contextos, desde a mineração de ferro no estado do Pará até a análise de misturas de solo argiloso na região de Campos dos Goytacazes (Alexandre et al., 2001). Em sua essência, o método Simplex é uma técnica de programação linear que busca encontrar o ponto ótimo - seja um máximo ou um mínimo - dentro de um conjunto de possibilidades definido por restrições.

Na análise de misturas de solo argiloso, cada dimensão no espaço Simplex pode representar a proporção de um tipo específico de solo na mistura. Assim, conforme Pereira (2020), a restrição de que a soma das proporções deve ser igual a 1 define a região viável dentro do espaço Simplex. A função objetivo pode ser a resistência da mistura, que se deseja maximizar, ou o custo da mistura, que se deseja minimizar.

A pesquisa de Pedroti et al. (2012), investigou a dosagem ideal de uma massa cerâmica com incorporação de resíduo de granito, utilizando a metodologia Simplex. O uso desta metodologia possibilitou otimizar as propriedades de resistência mecânica chegando a 10 MPa e absorção de água chegando a 19% na melhor temperatura de queima. Esses resultados, encontrados através da proporção ideal entre as argilas e o resíduo, mostraram a eficiência do método em otimizar as misturas para chegar na melhor composição possível.

O estudo de Babisk *et al.*, (2020), tratava-se da utilização de planejamento experimental, pelo método simplex, no estudo de absorção de água de cerâmica incorporada com lama vermelha para encontrar uma mistura ótima em relação aos parâmetros de absorção. Já Destefani e Holanda (2011), realizaram um estudo com a metodologia Simplex a fim de analisar o resíduo de rocha ornamental como filler a ser adicionado ao concreto, com objetivo de obter máxima compactidade.

Ambas as pesquisas incorporaram o método e obtiveram sucesso na obtenção das misturas ideais para os objetivos propostos. Segundo Destefani e Holanda. (2011), “o planejamento

experimental em rede simplex mostrou-se uma ferramenta viável, e o modelo cúbico completo (é um modelo matemático que inclui termos cúbicos (terceiro grau) para descrever a relação entre as proporções dos componentes de uma mistura e a sua resposta) foi o que melhor se ajusta aos pontos experimentais para determinação da superfície de resposta”.

1.5 Incorporação de resíduo de bauxita na massa cerâmica.

Desde a década de 40, quando se iniciou a exploração da bauxita em território brasileiro, a extração vem trazendo diversos problemas e riscos ambientais, devido à má gestão de resíduos e dificuldade na destinação correta (Quarema, 2009). De acordo Antunes e Conceição (2023), essa realidade vem chamando cada vez mais atenção, principalmente após os acidentes ambientais recentes, que levam à reflexão acerca dessa extração, substancialmente nos dias de hoje em que se torna cada vez mais difícil sustentar modelos industriais não sustentáveis. Não obstante, a ineficiência do processo de produção do alumínio através da bauxita, manifesta-se em elevados níveis de resíduos gerados em todas as fases da produção.

Com isso, a indústria cerâmica tem se apresentado como uma excelente alternativa para o aproveitamento de resíduos de diferentes segmentos industriais. Além da sílica, a lama vermelha apresenta elevados teores de sódio, cálcio e outros elementos fundentes, que agregam características importantes aos produtos cerâmicos (Babisk *et al.*, 2020).

Ademais, uma pesquisa realizada por Babisk *et al.*, (2020), mostra que existe uma necessidade da adição de material não plástico na produção da cerâmica e que possa ainda fornecer fundentes para facilitar a formação da fase líquida durante a etapa de queima da produção cerâmica, melhorando assim, as propriedades tecnológicas das cerâmicas produzidas.

Diante disso, quando a argila é incorporada ao resíduo de bauxita ocorre uma retração linear, ou seja, com os níveis de temperatura elevando-se até aproximadamente 1050°C, a incorporação do resíduo de bauxita tende a aumentar a absorção d'água, e, em função do teor de resíduo adicionado, diminui a sinterização. (Babisk *et al.*,2020)

Observa-se que a ausência de óxido de cálcio, álcalis e materiais orgânicos na composição do resíduo de bauxita limita seu uso como adição cimentante, ativador ou fluxo. Assim, a presença de componentes amorfos identificados por halos de DRX, restringe seu uso como fração inerte. (Raut *et al.*, 2011) Ressalta-se contudo, que essa restrição detalhada por Raut *et al.*,(2011), no que tange a inércia do material é suscetível a variações.

Além disso, pesquisas recentes têm explorado a possibilidade de reutilizar esses

resíduos na indústria cerâmica. Assim, através de uma pesquisa feita por Mendes *et al.* (2019), sabe-se que a lama vermelha pode ser incorporada nas formulações de blocos cerâmicos, substituindo parte das matérias-primas tradicionais, como a argila. Isso resulta em alguns benefícios, incluindo a economia de recursos naturais, a melhoria nas propriedades dos blocos cerâmicos e a promoção de práticas mais sustentáveis.

Com isso, pesquisas voltadas para a caracterização, são importantes para entender o material que está sendo analisado. Desse modo, conforme apresentado por Atan *et al.*, (2021) e Azevedo *et al.*, (2022), a caracterização de resíduos de bauxita, tanto física quanto química, é um processo meticuloso que envolve várias etapas e técnicas analíticas. Logo, a amostra de resíduos é coletada na fase de lavagem da polpa, originária do processo de oversize do hidrociclone, antes de seu destino final para a barragem de rejeitos. Assim, foi analisado por Rodrigues *et al.* (2012), que a amostra coletada é dividida para garantir a representatividade e, em seguida, passa por um processo de homogeneização e junção das diferentes amostras.

Essas informações físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas, por sua vez, podem ser usadas para otimizar o processo de produção de blocos cerâmicos e outros materiais de construção. Um exemplo disso é um estudo realizado por Azevedo *et al.* (2022), que demonstrou que os tijolos feitos com a adição de 30% de resíduos de bauxita apresentaram os menores valores de condutividade térmica e uma resistência mecânica à compressão de 9 MPa, atendendo às devidas normas técnicas. Além disso, a pesquisa de Bullerjahn e Bolte (2022) e atestada por Mendes *et al.*, (2019) demonstrou que o processo de transformação de rejeitos em reativos, como um material suplementar, é possível e mostrou potencial em suas variáveis.

Apesar desses avanços, ainda existem desafios a serem superados. A variabilidade das características da lama vermelha, a necessidade de adaptação dos processos de produção e a acessibilidade do mercado são alguns dos obstáculos que precisam ser enfrentados.(Atan *et al.*, 2021).

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivos gerais

Este estudo se propõe a investigar a incorporação de resíduos de bauxita na composição de massas cerâmicas que permitam produzir blocos que atendam aos requisitos para serem utilizados como elementos de vedação.

1.7.2 Objetivos específicos

Com o presente trabalho, propõe-se, além do objetivo geral, cumprir os objetivos específicos listados a seguir:

- Obter a melhor mistura da argila com o resíduo de bauxita.
- Análise da resistência do bloco cerâmico após a mistura, para verificar se houve melhoria na eficiência da resistência à compressão.
- Avaliação da sustentabilidade do processo, verificando se é viável a reutilização do resíduo de bauxita na construção civil.

1.8 Justificativa

A reutilização do resíduo de bauxita na fabricação de blocos cerâmicos vermelhos é uma pesquisa de grande relevância, pois combina questões ambientais, econômicas e sociais. De acordo com Rego (2019), o Brasil é o terceiro maior produtor de resíduos de bauxita no mundo.

Nesse contexto, buscou-se um levantamento bibliométrico, utilizando a plataforma Scopus com as palavras-chave “*bauxite*”, “*residue*” e “*materials*” com o intuito de analisar a quantidade de pesquisas geradas no período dos últimos dez anos (2016-2025) e foram encontradas 425 pesquisas relacionadas ao tema. Logo, observa-se que este resíduo tem sido estudado com frequência

Contudo é notório que há ainda um campo extenso a ser explorado, além da busca por formas de sua destinação e reaproveitamento. Dentre as áreas que demonstram eficácia em seu reaproveitamento, a construção civil se destacou, uma vez que as primeiras pesquisas têm se mostrado promissoras, como apresentado também no estudo de Azevedo *et al.* (2022).

Ainda assim, após a extração da alumina, principal componente na fabricação do alumínio, o resíduo de bauxita é descartado, muitas vezes em locais inadequados, levando à contaminação do solo, rios e lagos. Este problema foi evidenciado em 2018, na cidade de Barcarena/PA, onde ocorreu um grave vazamento de resíduo de bauxita das operações da empresa mineradora Hydro Alunorte, contaminando os rios da região. (Fernandes, 2019)

A reutilização desse resíduo na produção de blocos cerâmicos representa uma abordagem inovadora e sustentável para lidar com essa questão. Conforme apontado por Gouveia (2012), incorporar esse resíduo na fabricação dos blocos não apenas reduz a emissão de contaminantes no meio ambiente, mas também minimiza os custos públicos associados à coleta de resíduos descartados de forma inadequada. Além disso, essa prática contribui para a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e para a mitigação dos riscos

de disseminação de doenças associadas ao acúmulo de resíduos, desempenhando, assim, um papel relevante no contexto social.

Dessa forma, a pesquisa voltada para a reutilização do resíduo de bauxita na produção de blocos cerâmicos vermelhos se mostra pertinente, não apenas no sentido de explorar seu potencial na composição dos blocos para obter benefícios econômicos e sociais, mas também para impulsionar a inovação na indústria cerâmica brasileira e promover a sustentabilidade ambiental de maneira mais abrangente.

1.9. Estruturação do trabalho

A dissertação está dividida em cinco seções, descritas a seguir:

· **Capítulo 1** – Apresentam-se as considerações iniciais indispensáveis à compreensão e contextualização do tema proposto, incluindo seus objetivos gerais e específicos, as justificativas para o desenvolvimento do estudo e sua relevância no âmbito da engenharia civil, além da estrutura adotada para a organização do trabalho.

· **Capítulo 2:** *Incorporação da lama vermelha em mistura para blocos cerâmicos de vedação* – Neste trabalho investiga-se a incorporação do resíduo da extração de bauxita (lama vermelha) em mistura para blocos cerâmicos de vedação, avaliando sua influência nas propriedades da mistura. Foram analisadas as características físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas das argilas amarela e vermelha, bem como do resíduo de bauxita. Utilizou-se a metodologia do planejamento experimental de misturas em rede simplex, considerando diferentes composições com até 40% de resíduo e três temperaturas de queima (800, 900 e 1000 °C). Os resultados indicaram que teores elevados de lama vermelha comprometem as propriedades (resistência mecânica, retração linear e absorção de água) dos corpos de prova cilíndricos. Entre as temperaturas avaliadas, a queima a 1000 °C resultou no melhor desempenho, levando à definição de uma composição ótima com propriedades físicas e mecânicas mais adequadas.

· **Capítulo 3:** *Incorporação de lama vermelha em proporção de fabricação de blocos cerâmicos de vedação em olaria da cidade de Raul Soares - MG* – Diante dos resultados do primeiro estudo, neste trabalho avaliou-se a incorporação da lama vermelha em mistura para blocos cerâmicos de vedação buscando evitar a piora nas propriedades da mistura. Utilizou-se uma proporção fixa de 2:1 entre argilas vermelha e amarela, seguida em uma olaria em Raul Soares - MG, substituindo gradualmente a argila vermelha por 6%, 12% e 18% de lama vermelha. Foram produzidas quatro misturas e caracterizadas suas propriedades

físicas (retração linear na queima, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente) e mecânicas (resistência à compressão axial), com base nos critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 15270. Os resultados indicaram que baixos teores de resíduo podem trazer benefícios à mistura, mostrando um desempenho levemente satisfatório em comparação ao estudo anterior.

· **Capítulo 4:** *Estudo de mistura ideal para adição de lama vermelha na fabricação de blocos cerâmicos de vedação através de planejamento experimental pelo método simplex* – Com base nos resultados dos estudos anteriores, neste trabalho investiga-se a incorporação de até 20% de lama vermelha em mistura para blocos cerâmicos de vedação, variando a proporção de argila amarela entre 30% e 50% e de argila vermelha entre 50% e 70%. Foram realizadas queimas a 900 °C e 1000 °C, e os corpos de prova cilíndricos da mistura foram submetidos a ensaios para avaliar suas propriedades. Os resultados indicaram que a queima a 1000 °C proporcionou um desempenho mais satisfatório. A partir dos dados obtidos, foi realizada uma otimização de resposta para determinar a composição ideal da mistura. Essa proporção ótima foi reproduzida e reavaliada na queima de 1000 °C, permitindo a comparação dos resultados anteriores com a nova formulação e a caracterização detalhada do ponto ideal da mistura.

· **Conclusões Gerais** – nesta seção constam as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2- Incorporação da lama vermelha em mistura para blocos cerâmicos de vedação.

Resumo.

Neste estudo avaliou-se a viabilidade de incorporação da lama vermelha em mistura para fabricação de blocos cerâmicos de vedação, analisando seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. Utilizou-se planejamento experimental em rede simplex, com teores de lama vermelha de até 40%, e corpos de prova foram queimados a 800, 900 e 1000 °C. Ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade, densidade e resistência mecânica foram conduzidos conforme a ABNT NBR 15270 de 2017. Os resultados indicaram que teores elevados do resíduo comprometem a resistência e aumentam a absorção de água e a retração. Além disso, a queima a 1000 °C apresentou o melhor desempenho entre as temperaturas avaliadas.

2.0 Introdução

A busca por métodos de produção sustentável tem ganhado destaque devido às preocupações globais com os impactos ambientais e sociais causados pelas atividades industriais. No contexto da mineração, processos extrativos ainda dependem do uso de maquinários pesados, resultando em poluição do ar, degradação do solo e contaminação hídrica, além da alta quantidade de resíduos sólidos gerados (Dibattista et al., 2023).

A indústria da construção civil também tem sua responsabilidade nos impactos ambientais, causados pela produção de materiais, processo de construção em si e pela geração de uma alta quantidade de resíduos sólidos. Uma noção da parcela de responsabilidade da construção civil nesse cenário, são as porcentagem do impacto que ela carrega, gerando cerca de 37% das emissões globais de gases de efeito estufa relacionadas à energia (El Sheikh, 2022), e uma grande quantidade de resíduos (Akanbi et al., 2019). No entanto, essa área do mercado é essencial para a vida humana, precisando ser adaptada às condições atuais que exigem uma postura mais sustentável, como apontam as tendências (ASCE, 2021, 2022 *apud* Wang et al., 2024).

Uma das formas mais destacáveis de diminuir o impacto da construção civil e torná-la mais sustentável, é a busca e estudo pela incorporação de resíduos em materiais da construção civil, uma forma de diminuir o consumo de matérias primas e destinar resíduos sólidos diversos, diminuindo o impacto ambiental (Leal, 2021).

Um desses resíduos é a lama vermelha, proveniente da bauxita, principal minério

utilizado para a produção de alumínio. Durante o processo de extração da bauxita para a produção de alumínio, são geradas no mundo anualmente entre 120 e 150 milhões de toneladas de bauxita (Pan et al., 2023), e atualmente o total de lama vermelha acumulada já chega a 4 bilhões de toneladas, com apenas 4,79% delas sendo reaproveitadas (Zhao et al., 2025). Esse cenário tende a piorar, uma vez que a Mordor Intelligence (2019) prevê que o mercado de bauxita cresça de 273,97 milhões de toneladas em 2023 para 330,29 milhões de toneladas até 2028, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,81% durante o período de previsão (2023-2028).

Para a incorporação do resíduo de bauxita em materiais de construção, é importante pensar em um material de ampla utilização e com propriedades que aceitem bem a adição de resíduos, como por exemplo a cerâmica vermelha. (Ferreira et al., 2023; Mendes et al., 2019; Masharipova et al., 2024; Dillibabu et al., 2023). No Brasil, produtos cerâmicos são responsáveis por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas no país (Souza, 2021). Pela ampla produção, o país é também um dos mais importantes na produção mundial de cerâmica vermelha, sendo o terceiro maior produtor e o sexto maior exportador, com vendas para mais de 110 países (ANFACER, 2024).

Atan et al. (2021), em seus estudos registram que a incorporação de resíduos de bauxita e casca de avelã em massas cerâmicas tem sido explorada no intuito de aumentar a valorização do produto, bem como, a redução dos impactos ambientais. Nesse estudo, foi verificado que a adição desse resíduo pode melhorar algumas propriedades tecnológicas dos produtos cerâmicos, como redução da condutividade térmica, aumento da resistência mecânica e maior estabilidade química. À proporção que gerou melhores resultados aplicou 10% de casca de avelã (HS) e 30% de lama vermelha (RM).

Outros casos de adição de resíduos de bauxita em cerâmica vermelha exploram métodos e porcentagem de adição distintas. Babisk et al., (2020) estudaram a incorporação de diferentes proporções de lama vermelha em argilas locais, visando a produção de tijolos e telhas cerâmicas. Os corpos de provas foram feitos variando as argilas da região verde, amarela e vermelha em conjunto com o resíduo de bauxita, e trabalhou em porcentagens entre 100% a 33,3% de resíduo com duas variações de argilas em diferentes proporções. Os resultados indicaram melhora na resistência mecânica e durabilidade, no entanto, a absorção e a retração linear apresentaram piora.

Arroyo et al., (2020) analisaram o uso da lama vermelha como substituto parcial da

argila na produção de blocos cerâmicos, avaliando também o impacto das temperaturas de queima no desempenho dos produtos. Foram testadas dosagens de 0%, 50% e 80% de lama vermelha, ajustando as proporções das argilas. Os resultados revelaram melhorias na resistência mecânica e na densidade dos blocos, enquanto maiores proporções de resíduo e temperaturas de queima mais baixas resultaram em pior absorção de água e menor resistência à compressão e testes de lixiviação indicam que os blocos atendem aos limites de segurança ambiental. O estudo conclui que temperaturas elevadas e menores proporções de resíduo oferecem o melhor equilíbrio entre desempenho e segurança, destacando o potencial da lama vermelha como uma alternativa sustentável para a produção de materiais cerâmicos e a gestão de resíduos industriais.

Diante desse contexto, esta pesquisa buscou encontrar uma mistura ideal entre argila amarela, argila vermelha, e resíduo de bauxita da região da zona da mata mineira no Brasil, a partir da caracterização (física, química, morfológica e mineralógica) dos componentes e do estudo de proporções pelo método simplex.

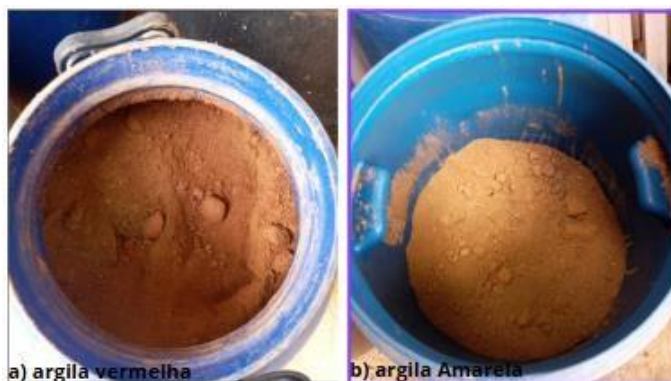
2.2. Metodologia

2.2.1. Coleta dos materiais.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram coletadas duas amostras de solo fornecidas pela indústria João de Barro, localizada no município de Raul Soares/MG, conforme ilustrado na Figura 2.1a e 2.1b. As amostras foram obtidas em uma área adjacente à fábrica e são compostas por dois tipos de argila: argila amarela (YC) e argila vermelha (RC).

A escolha das argilas baseou-se em estudos preliminares que identificaram características dos resultados dos materiais. Observou-se que a argila amarela apresenta maior teor de frações argilosas, favorecendo a retenção de água, enquanto a argila vermelha possui propriedades mais próximas de um silte-argila, com menor capacidade de retenção hídrica. Essa combinação, em proporções adequadas, promove uma extrusão otimizada, fundamental para a fabricação de blocos cerâmicos com desempenho satisfatório.

Figura 2.1- Amostras dos solos. a) argila vermelha (RC); b) Argila Amarela (YC).



Fonte: Autoral

Além das amostras de solo, foi coletada uma amostra de resíduo de bauxita, também conhecido como lama vermelha, proveniente da cidade de Mirai, também situada no estado de Minas Gerais. Assim como o solo, o resíduo de bauxita foi submetido a processos de caracterização física, química, mineralógica e morfológica.

Todos os materiais coletados foram encaminhados ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa, onde foram realizados os ensaios de caracterização.

2.2.2. Caracterização dos materiais.

Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 100°C, desagregadas manualmente em almofariz e pilão, sendo posteriormente peneiradas em peneira ASTM 50 mesh (abertura de 0,3 mm). Após esse processo, iniciou-se a caracterização física, com a realização dos ensaios para determinação da distribuição granulométrica dos grãos. A curva de distribuição granulométrica foi obtida conforme as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2016), com o objetivo de identificar as porcentagens de argila, areia e silte nos materiais. A massa específica dos grãos foi determinada conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984).

Em seguida, foram realizados os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade, utilizando o método de Atterberg, conforme as normas ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016b) e ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016c). Com esses resultados, foram elaborados os diagramas de Winkler e de Extrusão, visando verificar a eficiência das argilas de forma isolada.

Para a caracterização química e morfológica, as amostras foram novamente peneiradas com a peneira ASTM 200 mesh (abertura de 0,0075 mm). Após essa etapa, parte das amostras foi encaminhada ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, onde foram realizados os ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), utilizando o equipamento

Panalytical MagiX PW2540, para identificação da composição química dos elementos. Outra parte foi utilizada para análises de comportamento térmico, incluindo análise termogravimétrica e termodiferencial (ATD/TG), com o equipamento Shimadzu DTG-60H, também nesse laboratório.

Uma terceira parcela das amostras foi enviada ao Laboratório de Física da Universidade Federal de Viçosa, onde foram realizados ensaios de Difração de Raios X (DRX), utilizando o equipamento D8 Discover e o software X'Pert Pro MPD. Para concluir a caracterização, foram obtidas imagens microscópicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e realizada a análise morfológica com o equipamento Leo 1430VP.

2.2.3. Preparação das misturas.

Após a caracterização dos materiais, foi desenvolvido um modelo experimental com base em estudos como o de Mendes et al. (2019), que analisaram teores aceitáveis de incorporação de resíduos na mistura para fabricação de blocos cerâmicos. Segundo as pesquisas de Mendes *et al.* (2019), a dosagem ideal de incorporação de rejeitos de Minério de Ferro pode alcançar até 40%, enquanto o teor de argila variou entre 30% e 70%. Portanto, este estudo foi conduzido dentro dessa faixa de variação.

Utilizou-se o software Minitab® 17 para o delineamento das misturas, adotando o formato centróide simples de grau três (modelo cúbico especial incompleto). Foram geradas 10 misturas distintas, levando em consideração os parâmetros previamente estabelecidos para os teores máximos e mínimos de cada amostra. Os teores dos materiais em cada mistura estão apresentados na Figura 2.2.

2.2.4. Preparação dos Corpos de Prova.

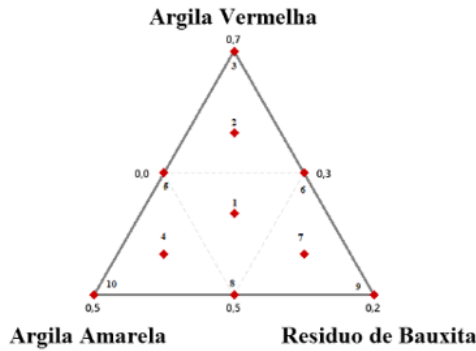
Após o delineamento das misturas, foram fabricados manualmente os corpos de prova. Realizaram-se três queimas a diferentes temperaturas (800 °C, 900 °C e 1000 °C), sendo produzidos cinco corpos de prova para cada mistura e cada temperatura de queima, totalizando 15 corpos de prova por mistura. A taxa de aquecimento adotada para as queimas foi de 4 °C por minuto. No total, foram fabricados 150 corpos de prova.

O objetivo da fabricação dos corpos de prova é avaliar propriedades essenciais de blocos cerâmicos, como índice de absorção de água, porosidade, densidade aparente, retração linear pós-queima e resistência à compressão axial.

Além disso, foi realizado o cálculo da densidade aparente das amostras, que variou entre 1,8 e 2,1 g/cm³ após a moldagem. As amostras foram secas em estufa a 100°C e peneiradas em

peneira ASTM 50 mesh (abertura de 0,3 mm). Em seguida, foi realizada a mistura dos materiais conforme os teores apresentados na Figura 2.2, com a adição de umidade de 10% em relação ao peso das amostras, conforme estudado por Pedroti *et al.* (2011).

Figura 2.2- Modelo simplex junto de misturas dos materiais.



MISTURA	RESIDUO DE BAUXITA	ARGILA AMARELA	ARGILA VERMELHA
01	0,13	0,34	0,53
02	0,03	0,34	0,63
03	0,00	0,30	0,70
04	0,10	0,40	0,50
05	0,00	0,40	0,60
06	0,10	0,30	0,60
07	0,03	0,44	0,53
08	0,07	0,37	0,56
09	0,20	0,30	0,50
10	0,00	0,50	0,50

Fonte: Autoral

Os corpos de prova foram compactados por prensagem uniaxial com o auxílio de uma prensa hidráulica, prensa Marshall, localizada na Universidade Federal de Viçosa, que com a ajuda de um molde resultou em corpos cilíndricos com aproximadamente 3 cm de diâmetro e 5 cm de altura, como apresentado na Figura 2.3. Essa configuração permite a avaliação da resistência à compressão axial, seguindo estudos de Mendes *et al.* (2019). Além disso, as pesquisas de Baumann e Keller (1975 apud Mendes, 2019), a densidade aparente dos corpos de prova no estado verde (condição do material antes da queima) está diretamente relacionada à qualidade do produto final, especialmente à resistência mecânica após a queima.

Figura 2.3- Corpos de Prova cilíndricos.



Fonte: Autoral

Para a medição da retração linear, foram utilizadas dimensões obtidas nos estados seco e queimado, utilizando um escalímetro digital (precisão de 0,01 mm). Os ensaios de absorção de água, porosidade e densidade aparente seguirão as prescrições da NBR 15270-2 (ABNT, 2017).

2.2.5. Análise Estatística.

A análise estatística foi conduzida utilizando o método simplex de misturas, considerando três componentes: Argila Amarela, Argila Vermelha e o resíduo de bauxita. Para isso, o software Minitab® 17 foi empregado. A influência dos diferentes fatores sobre os parâmetros de interesse foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA), adotando-se um nível de significância de 10% ($p\text{-valor} \leq 0,10$). Essa escolha justifica-se pela elevada variabilidade no processo de fabricação, o que demanda maior flexibilidade na identificação de efeitos estatisticamente relevantes. Esse procedimento permitiu identificar quais fatores, interações e efeitos de segunda ordem tiveram uma influência estatisticamente significativa sobre as respostas investigadas.

Os limites adotados neste trabalho foram estabelecidos com base na norma brasileira ABNT NBR 15270:2017, a qual determina que o índice ideal de absorção de água para blocos cerâmicos deve situar-se na faixa de 8% a 25%. Além disso, foi considerado como valor mínimo para a resistência à compressão o limite de 1,5 MPa.

2.3 Resultados e Discussões.

2.3.1. Caracterização.

Na tabela 2.1 está sendo apresentado os resultados da análise granulométrica dos materiais utilizados. A Argila Amarela (YC) destaca-se por seu elevado teor de argila (50,4%), enquanto os teores de silte e areia são relativamente menores, com 27,1% e 22,5%, respectivamente. Essas características classificam a YC como um material predominantemente argiloso.

Por outro lado, a Argila Vermelha (RC) apresenta uma composição distinta, com elevados teores de silte e areia, correspondendo a 24% e 69,2%, respectivamente, e um baixo teor de argila, de apenas 6,6%. O resíduo de bauxita, por sua vez, demonstrou um alto nível de silte (74,04%), seguido por um índice alto de argila (20,91%), refletindo sua contribuição diferenciada à composição granulométrica das misturas analisadas.

Tabela 2.1- Granulometria das amostras.

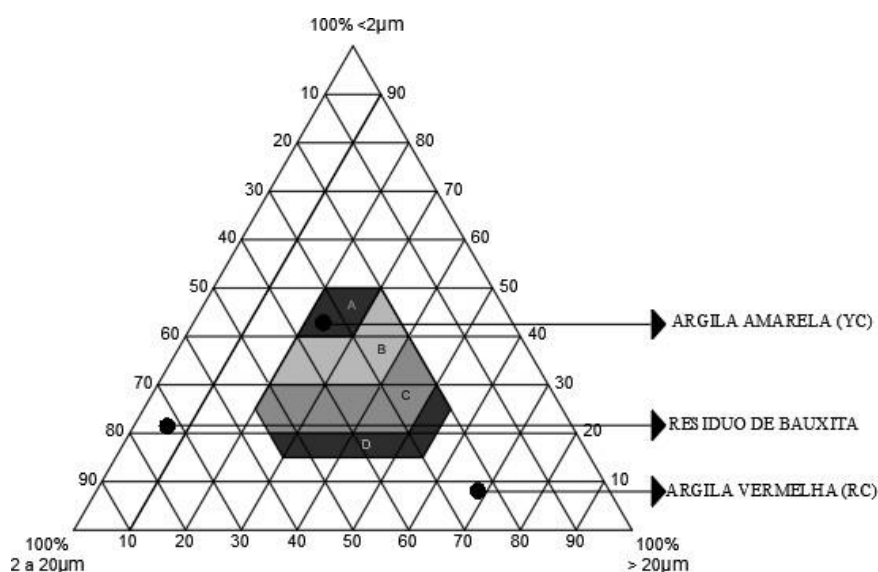
Argilas	Argila (%)	Silte (%)	Areia(%)
Argila Amarela (YC)	50,4%	27,1%	22,5%
Argila Vermelha (RC)	6,6%	24,0%	69,2%
Resíduo de Bauxita	20,91%	74,07%	5,02%

Fonte: autoral.

Com base nos dados granulométricos obtidos, determinou-se a posição dos materiais no diagrama de Winkler, apresentado na Figura 2.4 Os resultados indicaram que a Argila Amarela (YC) está localizada na área sombreada A, sugerindo sua aptidão para a produção de materiais de boa qualidade, embora apresente maior complexidade no processo de fabricação, isso ocorre devido aos altos índices de retenção de água.

Em contrapartida, a análise dos teores da Argila Vermelha (RC) revelou sua inadequação para a produção cerâmica, assim como o resíduo de bauxita. Esses resultados reforçam a limitação do uso isolado desses materiais na fabricação de produtos cerâmicos, reforçando a necessidade de uma mistura das argilas.

Figura 2.4- Diagrama de Winkler.



Fonte: Autoral.

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) estão apresentados na Tabela 2.2. A análise demonstrou que a Argila Amarela apresenta elevados

valores de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), atribuídos à sua composição rica em argilominerais expansivos e alta proporção de partículas finas, que aumentam a retenção de água e a plasticidade. Em contraste, a Argila Vermelha, devido ao maior teor de areia e menor quantidade de partículas argilosas, apresentou índices de LL e LP inferiores. No entanto, conforme Mendes et al. (2019), nenhuma das argilas analisadas alcançou os valores ideais para extrusão, que deveriam estar entre 18% e 25%.

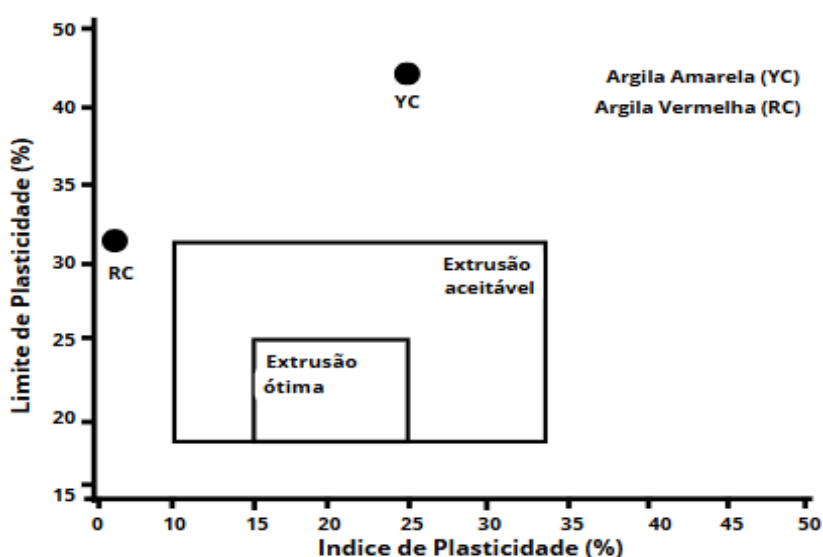
Tabela 2.2 - Limites de Liquidez (LL) , Plasticidade (LP) e o Índice de Plasticidade (IP);

Argilas	LL (%)	LP(%)	IP(%)
Argila Amarela (YC)	68%	43%	15%
Argila Vermelha (RC)	34%	32%	02%

Fonte: Autoral

Com base nesses resultados, foi calculado o Índice de Plasticidade (IP), apresentado na Tabela 2.2, definido como a diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (PL). Os resultados mostram que a Argila Vermelha (RC) apresentou um índice de plasticidade (IP) inferior a 10%, enquanto a Argila Amarela (YC) atingiu 25%. Segundo a ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016b), materiais argilosos devem ter IP de, no mínimo, 10% para evitar problemas no processamento cerâmico. Assim, ambas as argilas estão fora das categorias de extrusão ótima ou aceitável, conforme ilustrado no diagrama de extrusão da Figura 2.5.

Figura 2.5- Diagrama de Extrusão.



Fonte: Autoral

Na Tabela 2.3, apresenta-se os resultados obtidos pela análise de FRX. Observa-se que

as relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para a Argila Vermelha e a Argila Amarela são 2,15 e 1,33, respectivamente. De acordo com Vieira e Pinheiro (2011), quanto mais próxima essa relação estiver de 1,18, correspondente à caulinita teórica, poderá ser a quantidade de caulinita na argila. Dessa forma, a Argila Amarela podendo conter uma maior quantidade de caulinita e menor quantidade de sílica livre, na forma de quartzo, em comparação à Argila Vermelha. De acordo com Vieira e Pinheiro (2012), a argila "forte" (predomínio maior de fração de argila) possui maior quantidade de caulinita e menor teor de SiO_2 livre, em comparação com a argila "fraca" (o predomínio de material não argiloso o que reduz a capacidade de retenção de água).

Além disso, destaca-se um alto teor de Fe_2O_3 , responsável pela coloração avermelhada da cerâmica após a queima (Vieira; Pinheiro, 2012). Adicionalmente, o resíduo de bauxita apresentou altos teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , indicando que o material pode ser adequado para a produção de materiais cerâmicos, pois a presença de aluminossilicatos, como confirmados pelo DRX, seja essencial para a obtenção desse tipo de material.

Tabela 2.3- FRX das amostras.

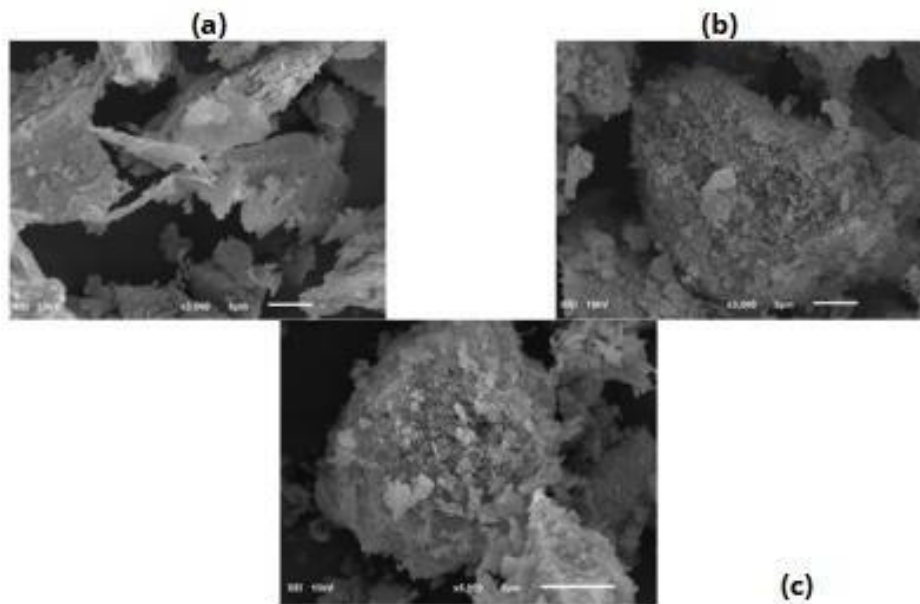
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	CaO	TiO_2	Outros
Argila Vermelha (RC)	57,92%	26,88%	7,74%	1,99%	1,83%	1,26%	1,07%	1,32%
Argila Amarela (YC)	51,46%	38,61%	6,84%	0,42%	0,81%	0,212%	1,37%	0,278%
Resíduo de Bauxita	31,53%	44,47%	21,53%	-	0,23%	0,256%	1,44%	0,54%

Fonte: autoral

A análise microscópica apresentada na Figura 2.6 revelou que, na Argila Vermelha (RC), Figura 2.6(a), e na Argila Amarela (YC), Figura 6(b), os grãos de quartzo possuem os maiores diâmetros e volumes, com formato hexagonal e arestas bem definidas. Entre as partículas de quartzo, observaram-se aglomerados, possivelmente compostos por cristais de caulinita. No resíduo de bauxita, Figura 2.6(c), foram detectados traços de gibbista. Além disso, identificaram-se aglomerados de partículas lamelares com formatos circulares e hexagonais, associados à caulinita.

Figura 2.6- MEV das amostras com aproximação de X 3,000.

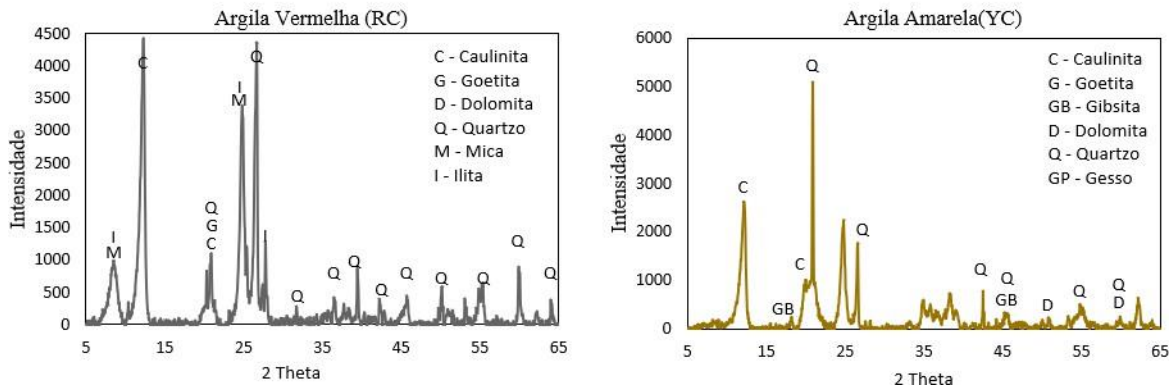
(a) Argila vermelha RC; (b) Argila Amarela YC; (c) Resíduo de bauxita



Fonte: autoral

Na Figura 2.7, estão apresentados os resultados da difração de raios X (DRX) das argilas. Ambas as amostras mostram composição mineralógica semelhante, com picos de difração correspondentes à caulinita (Al_2O_3), quartzo (SiO_2), gibbsita (Al_2O_3) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). A caulinita é o principal mineral de argila encontrado no caulim e em várias argilas utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos para a indústria da construção civil (Viera; Pinheiro, 2011). Esse mineral é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade nas argilas analisadas. O quartzo, por outro lado, é a principal impureza presente nas argilas, atuando como matéria-prima não plástica e inerte durante o processo de queima. A gibbsita contribui para o aumento da refratariedade e perda de massa das argilas durante a queima. Além disso, na Argila Vermelha, observam-se cristais de mica muscovita, um mineral com morfologia lamelar que pode causar defeitos em peças cerâmicas. No entanto, de acordo com os estudos de Viera e Pinheiro (2011), quando as partículas de mica são de tamanho reduzido, a muscovita pode atuar como um fundente devido à presença de óxidos alcalinos.

Figura 2.7- DRX das argilas.

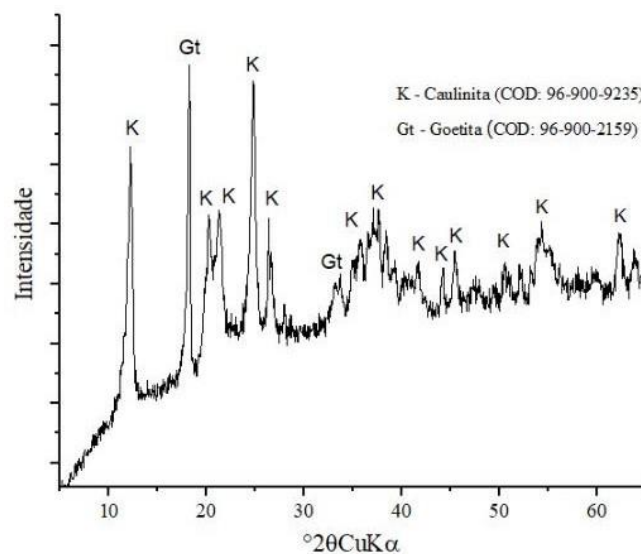


Fonte: Autoral

Na Figura 2.8 apresenta-se os resultados da análise de difração de raios X (XRD) do resíduo de bauxita. Segundo estudos de Kar *et al.*, (2023) o resíduo de bauxita consiste em uma mistura de minerais hidróxidos, como gibbsita, boemita e diásporo, juntamente com impurezas, principalmente caulinita, goethita, quartzo e anatásio. Os resultados indicam que o resíduo possui características caulínicas, com a presença de cristais de goethita.

A análise de DRX das amostras corrobora os dados obtidos pela FRX (Tabela 2.3). Além disso, permite uma comparação das informações. O material analisado exibe uma composição química tipicamente caulínica, com alto teor de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), além de baixo teor de fundentes alcalinos (K_2O).

Figura 2.8- DRX do Resíduo de Bauxita.

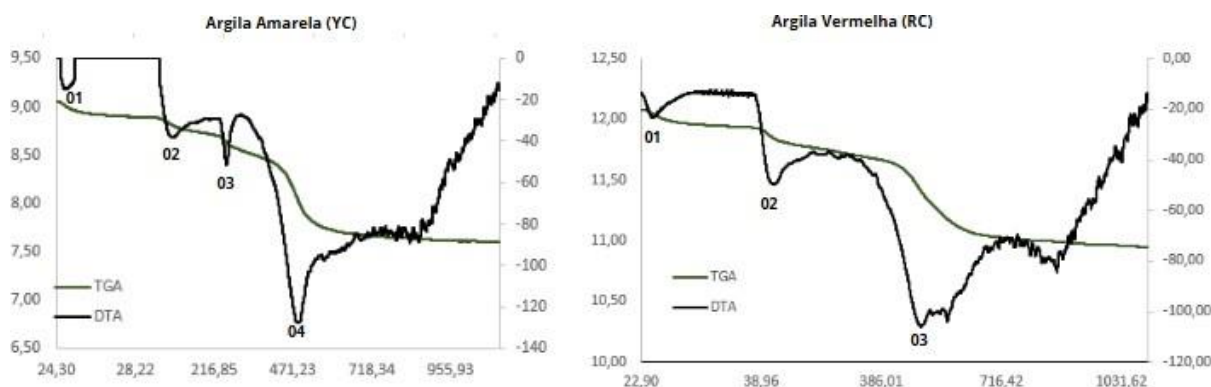


Fonte: autoral.

Na Figura 2.9 apresenta-se os gráficos TGA/DTA para as Argilas Vermelha e Amarela.

Observa-se que ambos os gráficos exibiram picos nas mesmas temperaturas, o que pode estar relacionado a eventos térmicos característicos desses materiais. Os três primeiros picos identificados correspondem à perda de água absorvida (1), à combustão de matéria orgânica (2) e à desidroxilação da caulinita (3), resultando na formação de metacaulinita (Vieira; Pinheiro, 2011). A perda de água absorvida ocorreu em torno de 25 °C para ambas as argilas. A combustão da matéria orgânica foi observada na faixa de 50 a 70 °C, também para ambas as amostras. Por fim, a desidroxilação da caulinita, que resulta na formação de metacaulinita, ocorreu em temperaturas próximas de 300 °C para a argila amarela e 400 °C para a argila vermelha. Além disso, verificou-se uma redução progressiva de massa ao longo do aumento da temperatura, indicando que o material apresenta elevada capacidade de retração.

Figura 2.9- TGA/DTA das argilas.



Fonte: Autoral.

2.3.2. Retração dos corpos de prova.

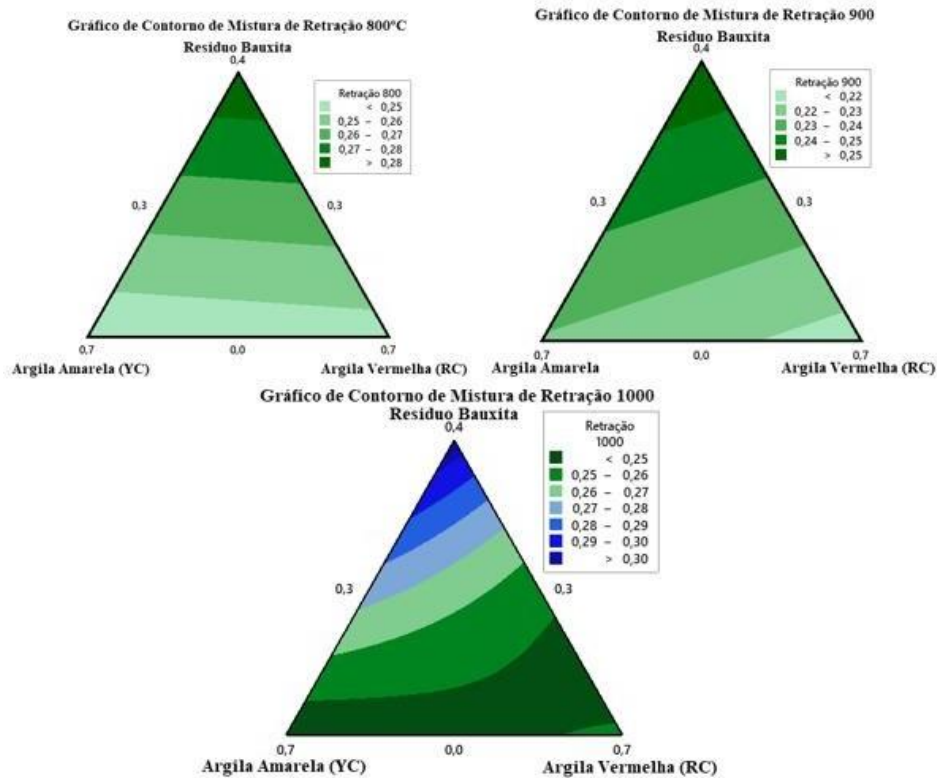
O primeiro parâmetro analisado foi a retração dos corpos de prova, que avalia a redução de massa e volume após as três diferentes queimas realizadas. O ensaio foi conduzido por meio da comparação entre os valores de massa e volume dos corpos de prova antes e após o processo de queima. Com esses resultados, foi possível quantificar o grau de retração ocorrido em cada amostra. Na Figura 2.10, a superfície de resposta das misturas foi apresentada utilizando o método simplex. Observa-se que as maiores adições de resíduo de bauxita resultaram em uma retração mais branda, com pequenas reduções de volume e massa. Em contrapartida, os corpos de prova que apresentaram maior retração foram aqueles com máximo de índice (70%) de argila vermelha (RC).

Verificou-se uma correlação direta entre a temperatura de queima e a retração dos blocos cerâmicos. Os corpos de prova queimados a 1000°C (Figura 2.10c) apresentaram maior retração em comparação com aqueles queimados a 900°C (Figura 2.10b) e 800°C (Figura

2.10a), evidenciando a influência da temperatura nesse comportamento. Além disso, observou-se que o aumento do teor de bauxita também impactou a retração, sendo menor nos corpos de prova que continham bauxita em comparação àqueles compostos apenas pelas argilas Amarela e Vermelha.

Figura 2.10- Retração dos corpos de prova.

(a) Temperatura a 800°C; (b) Temperatura a 900°C.; (c) Temperatura a 1000°C.



Fonte: autoral

2.3.3. Absorção de água.

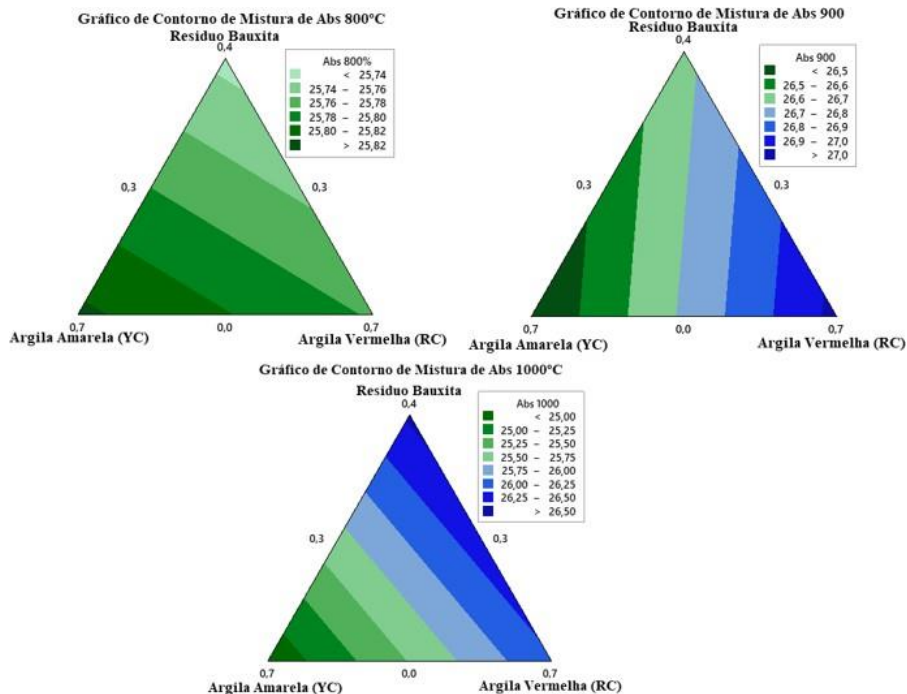
De modo geral, o índice de absorção de água é um dos principais parâmetros para a aplicação de peças cerâmicas (Semiz, 2017 apud Mendes *et al.*, 2019). Esse ensaio foi realizado com base na norma técnica americana ASTM C62 (2008), que considera ideal um teor de absorção de até 22%. A norma brasileira ABNT NBR 15270-1 (2017) aceita um intervalo de absorção de 8% a 25%. Dessa forma, ao enquadrar-se nos parâmetros da norma americana, o material estaria, automaticamente, dentro dos limites da norma brasileira.

Após a realização do experimento com 10 misturas e três diferentes temperaturas de queima, observou-se que a incorporação do resíduo de bauxita resultou em uma variação no índice de absorção de água entre 24% e 26%. A absorção de água apresentou valores acima do limite da norma americana e parcialmente superiores aos da norma brasileira, conforme

mostrado na Figura 2.11. O resíduo de bauxita contribuiu para o aumento da absorção de água no material (Louzada *et al.*, 2019).

Os dados também indicam que, nas temperaturas de 900°C e 1000°C, a absorção de água foi maior quando havia maior teor de resíduo de bauxita ou de Argila Vermelha. Em contrapartida, na temperatura de 1000°C, a absorção foi aceitável quando houve máxima concentração de Argila Amarela e mínima de Argila Vermelha, sem adição de resíduo de bauxita. Logo a mistura que não continha resíduo de bauxita foi a única que atendeu aos critérios estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017), apresentando porcentagens de absorção em torno de 24%.

Figura 2.11- Absorção de água. (a) Mistura a 800°C; (b) Mistura a 900°C; (c) Mistura a 1000°C.



Fonte: Autoral

2.3.4. Porosidade.

A porosidade é uma característica essencial para compreender o comportamento do material cerâmico, estando diretamente relacionada à sua capacidade de absorção de água e ao grau de retração observado. Os resultados apontaram que tanto a composição das misturas quanto à temperatura de queima influenciou sobre a porosidade dos materiais.

Os blocos criados com maior proporção de Argila Amarela e resíduo de bauxita apresentaram menor porosidade, o que se traduziu em uma maior absorção de água e em uma estrutura mais densa. Em contrapartida, os blocos com maior presença de Argila Vermelha exibiram maior porosidade, indicando uma associação maior absorção de água e menor resistência mecânica.

Além disso, o aumento da temperatura de queima mostrou-se determinante na redução da porosidade. Os corpos de prova queimados a 1000°C exibiram porosidade reduzida em comparação aos queimados a 800°C e 900°C. Esse efeito é atribuído ao processo de sinterização mais eficiente em temperaturas mais elevadas, que promove maior compactação do material e fechamento dos poros remanescentes.

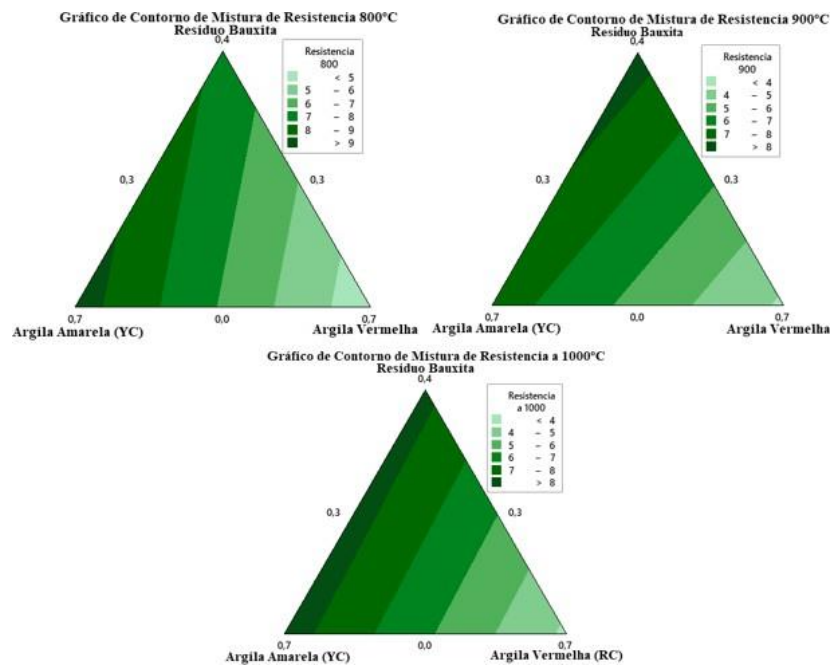
2.3.5. Resistência Mecânica.

Os resultados indicaram que as misturas, considerando as diferentes temperaturas de queima e misturas, atingiram a resistência mínima e desejada para o corpos de prova que era de 1,5 MPa para blocos de vedação de seis (6) furos conforme a ABNT NBR 15270 (ABNT, 2017) A análise estatística, realizada com o software Minitab® 17, revelou que os resultados obtidos não apresentaram significância estatística, sendo que nenhuma deles obteve um p-valor abaixo dos 10% que era o desejado.

No método simplex de mistura (imagem 2.12), evidenciaram que a temperatura de queima foi um fator determinante na resistência mecânica, sendo que a temperatura de 1000°C (Figura 2.12c) proporcionou os melhores resultados em comparação às temperaturas de 800°C (Figura 2.12a) e 900°C (Figura 2.12b). Além disso, os corpos de prova com maior índice de Argila Amarela apresentaram os melhores resultados, enquanto aqueles com maior proporção de Argila Vermelha registraram os piores desempenhos. Na Figura 2.13 apresenta-se o comportamento das misturas em relação à resistência mecânica.

Figura 2.12- Resistência Mecânica dos blocos cerâmicos em MPa.

(a) Temperatura a 800°C; (b) Temperatura a 900°C.; (c) Temperatura a 1000°C.



Fonte: Autoral.

2.4 Conclusão

Este estudo foi realizado com o objetivo de investigar os efeitos da incorporação de resíduo de bauxita em massas cerâmicas, visando encontrar uma mistura que satisfaça os requisitos pelas normas da construção civil, brasileiras e internacionais.

- **Retração linear:** A incorporação de resíduo de bauxita promoveu um aumento significativo na retração linear das peças, um efeito desfavorável sob o ponto de vista técnico. Essa maior retração compromete o controle dimensional das peças cerâmicas e eleva o risco de surgimento de defeitos durante a fabricação.
- **Absorção de água:** A absorção de água nos corpos cerâmicos superou os limites estabelecidos pelas normas técnicas, tornando os blocos mais porosos e inadequados para aplicações convencionais, especialmente em condições que exigem alta resistência à umidade.
- **Porosidade:** A análise revelou que a adição de resíduo de bauxita aumentou a porosidade dos corpos cerâmicos, resultando em maior absorção de água e menor densidade. Esse aumento na porosidade prejudica diretamente a resistência mecânica das peças e compromete sua durabilidade e desempenho, especialmente em aplicações que exigem materiais menos permeáveis.
- **Resistência à compressão axial:** Os resultados indicaram uma tendência de contribuição da resistência à compressão axial com o aumento do teor de resíduo de bauxita. Esse

comportamento é atribuído ao incremento na porosidade e à presença de tensões residuais, que enfraquecem a estrutura do material cerâmico.

Com base nos resultados, recomenda-se a adoção de estratégias para otimizar a composição das misturas cerâmicas. Uma sugestão seria reduzir a quantidade de resíduo de bauxita e de Argila Vermelha (Argila 2), priorizando o uso de Argila Amarela (Argila 1), que apresentou características mais favoráveis ao desempenho dos materiais.

3.0. Capítulo 3 - *Incorporação de lama vermelha em proporção de fabricação de blocos cerâmicos de vedação em olaria da cidade de Raul Soares - MG*

Resumo

A crescente demanda por alumínio tem impulsionado sua produção mundial, atingindo 70,5 milhões de toneladas em 2023, com um crescimento de 24% no Brasil. Esse aumento reforça a necessidade de alternativas sustentáveis para a gestão dos resíduos gerados, como a lama vermelha, subproduto do beneficiamento da bauxita. Neste estudo avaliou-se a incorporação desse resíduo em mistura para blocos cerâmicos, utilizando a proporção fixa de 2:1 entre argilas vermelha e amarela, praticada em uma olaria em Raul Soares - MG. Foram analisadas misturas contendo 6%, 12% e 18% de lama vermelha em substituição parcial à argila vermelha. As propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova (resistência, absorção de água, retração) foram caracterizadas conforme a norma ABNT NBR 15270. Os resultados indicaram que baixos teores de lama vermelha podem contribuir positivamente para a mistura, apresentando um desempenho levemente superior ao estudo anterior.

3.0 Introdução.

O alumínio tem sido cada vez mais solicitado globalmente, e é uma substância utilizada em processos industriais de diversas áreas, como aeronáutica, eletrônica, construção civil, materiais e medicina química (JIA et al., 2024). O International Aluminium Institute (2024), registrou uma produção de 70,5 milhões de toneladas de alumínio em 2023, com crescimento de 2% (Iai, 2024). No Brasil esse aumento foi ainda maior, registrando uma produção de 1,006 milhão de toneladas em 2023 com aumento de surpreendentes 24% em relação ao ano anterior (Associação Brasileira de Alumínio, 2024).

Para produzir o alumínio através da alumina, existe um processo de extração da alumina da bauxita, processo que pode ser feito por sinterização ou por Bayer, sendo o último utilizado em 95% dos casos (ZHAO et al, 2025). O resíduo gerado pelo processo de Bayer é conhecido como lama vermelha, é gerado em uma proporção varia entre 0,7 e 2 toneladas para cada tonelada de alumínio produzido (GAO et al, 2024), com uma expectativa de que esses números alcancem o total de 7 e 8 bilhões de toneladas até 2040 (Das e Shahabuddin, 2023; Van den Eynde et al., 2022 apud Gao et al., 2024).

O resíduo de bauxita, por ser gerado em grandes quantidades, ocupa grandes áreas nos locais de extração, causando um problema de manejo e destinação do resíduo (Liu, Qin, Chen, 2020). Além disso, devido a ficar exposto nessas áreas sem tratamento, existe também um risco

ambiental pelo potencial de contaminação do solo, ar, e águas subterrâneas, e um risco de ocorrência de acidentes (Reddy et al., 2021). Por esses motivos citados, é de suma importância estudar a viabilidade do aproveitamento do resíduo de bauxita em diversas áreas, com intuito de encontrar uma destinação e finalidade a esse resíduo, impedindo que ele ocupe áreas causando riscos de contaminação.

Apesar dessa necessidade, apenas 10% do resíduo de bauxita produzido no mundo é reaproveitado, o que ressalta a necessidade de pesquisas que foquem na viabilidade de aplicação do resíduo de bauxita. Entre as áreas que estudam a aplicação do resíduo, estão infraestrutura, construção civil, processos químicos industriais, fertilização de solo, entre outras aplicações (Nigam, Sinha, Madan., 2023; Sun et al., 2025; Han et al, 2025; Shahulhameed et al., 2023). Dentro dessas áreas, a construção civil tem um grande potencial, possuindo aplicações em diversos materiais de construção, como geopolímeros, compósitos cimentícios, concreto, e materiais cerâmicos.

Para entender a viabilidade da destinação do resíduo de bauxita através da aplicação em materiais de construção, é preciso em um primeiro momento entender a viabilidade desta aplicação. No Brasil, as construções são em sua maioria feitas com alvenaria de vedação que utiliza tijolos cerâmicos, mais especificamente os blocos de vedação. A Pesquisa Nacional de Domicílios, conduzida pelo IBGE, apontou que cerca de 88,2% das construções no Brasil são feitas com paredes em alvenaria, uma vez que a tipologia de estruturas de concreto armado, paredes de tijolo cerâmico e revestimento com argamassa cimentícia predominam em 62,6 milhões das 71 milhões de unidades domiciliares que existem no país (PNAD, 2019).

Outra potencialidade da cerâmica vermelha como material para incorporar o resíduo de bauxita é o fato de que incorporar esse resíduo na produção, especificamente em blocos e tijolos, não só promove a destinação adequada de um material potencialmente nocivo em um mercado que consegue sustentar as grandes quantidades de resíduos, mas também contribui para a redução da exploração de recursos naturais, como a argila utilizada nas olarias. (Dos Santos et al., 2021)

Uma pesquisa feita por Santos et al. (2021), aponta que os blocos cerâmicos que contêm adição de lama vermelha podem apresentar características físicas e mecânicas aprimoradas, como maior resistência, melhor isolamento térmico e leveza, devido à composição química rica em óxidos, especialmente ferro e sódio. Além disso, a adição de lama vermelha pode facilitar o processo de sinterização, reduzindo a energia necessária durante a queima. Essa prática se alinha aos princípios da economia circular, uma vez que permite a reutilização de resíduos e diminui o impacto ambiental da produção cerâmica. (He et al., 2012 apud Santos et al., 2021).

Dessa forma, a integração da lama vermelha na indústria cerâmica não apenas representa uma alternativa viável do ponto de vista técnico, mas também uma contribuição expressivas para práticas de produção mais limpas e sustentáveis (Santos et al., 2021). Essa pesquisa usou como base a produção de cerâmica vermelha de uma olaria em Raul Soares - MG, que utiliza proporção de 2:1 de argila vermelha para argila amarela, e teve como objetivo estudar a viabilidade da substituição de 0 a 18% da argila vermelha pelo resíduo de bauxita, prezando pela melhora ou neutralidade das propriedades físicas, mecânicas e de absorção dos blocos com incorporação.

3.1 Materiais e Métodos.

3.1.1. Produção dos Corpos de Prova.

Para o estudo, foram utilizados como referência os resultados apresentados nos tópicos 2.3 e 2.4 do capítulo 2, *"Incorporação da Lama Vermelha em Mistura para a Fabricação"*, avaliando desde a adição do resíduo de bauxita até a composição final da mistura.

Adotou-se a proporção de dois para um, conforme a prática já empregada por uma olaria, localizada em Raul Soares, Minas Gerais. Além disso, foram consideradas a utilização da argila amarela (YC) e da argila vermelha (RC)

Com base nessa distinção, foi elaborado um modelo experimental em que a Argila Amarela (YC) foi considerada "gorda"(pela predominância de argila dentro de suas características) e usada em 34% das misturas, enquanto a Argila Vermelha (RC), considerada "magra"(pela material apresentar maior proporção de silte e/ou areia em comparação ao teor de argila), compôs 66%. Nas misturas subsequentes, reduziu-se gradualmente a quantidade de Argila Vermelha em 6%, substituindo-a por resíduo de bauxita. A tabela de mistura com suas proporções e nomenclaturas estão sendo apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Dados das misturas.

Mistura	Argila Amarela	Argila Vermelha	Resíduo de bauxita
Y34R66B00	34%	66%	0,0%
Y34R60B06	34%	60%	6%
Y34R54B12	34%	54%	12%
Y34R48B18	34%	48%	18%

Fonte: autoral

Após determinar os teores de cada amostra nas misturas, foram produzidos corpos de prova em formato cilíndrico, com 3 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A densidade dos materiais variou entre 1,8 g/cm³ e 2,1 g/cm³. Para cada mistura, foram confeccionados cinco corpos de prova, baseado nos dados da tabela 3.1.

As amostras foram inicialmente secas em uma estufa a uma temperatura de 105 °C ± 5 °C. O processo de mistura foi realizado manualmente, separando-se as amostras nas proporções estabelecidas. Para a realização da mistura, foi adicionada água à mistura. O teor de água utilizado foi de 10% sobre a massa total, conforme o estudo de Pedroti *et al.* (2011).

Após a moldagem manual, os corpos de prova foram submetidos à queima a 950 °C. A escolha dessa temperatura baseou-se nos resultados obtidos nos Tópicos 2.3 e 2.4, nos quais foram avaliadas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, sendo que os melhores desempenhos foram observados nos intervalos de 900 °C e 1000 °C. Dessa forma, optou-se por adotar 950 °C como parâmetro intermediário, visando explorar possíveis otimizações no processo térmico. A taxa de aquecimento adotada foi de 4 °C por minuto. Tanto a preparação quanto a queima dos corpos de prova foram realizadas nas instalações do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

3.2.2 Análise dos corpos de Prova.

O objetivo desta etapa foi analisar o comportamento dos corpos de prova produzidos, considerando três parâmetros principais: retração dos corpos de prova (CPs), teor de absorção de água e resistência à compressão axial. A análise de retração ocorre após a queima dos corpos de prova, foram realizadas medições e pesagens para determinar a retração do material. Essa análise permitiu identificar a perda de material e as mudanças dimensionais do material após o processo de queima. Após a etapa de medição, os corpos de prova foram imersos na água e mantidos em repouso por um período de 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram levemente secos com um pano úmido e pesados novamente. O teor de absorção de água foi calculado pela diferença entre os pesos dos corpos de prova antes e depois da imersão, dividido pela massa seca. Para a determinação do teor de umidade, utilizou-se como parâmetro a norma brasileira ABNT NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), que estabelece que o teor de umidade aceitável deve estar na faixa de 8% a 25%.

Os corpos de prova, ainda úmidos, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial com o uso de uma prensa hidráulica Marshall, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa. Para esse ensaio, considerou-se a norma americana ASTM C62 (ASTM, 2008). Optou-se por não adotar o valor mínimo de

resistência à compressão de 1,5 MPa, estabelecido pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), porque este se refere à resistência de blocos vazados, calculada em relação à área bruta.

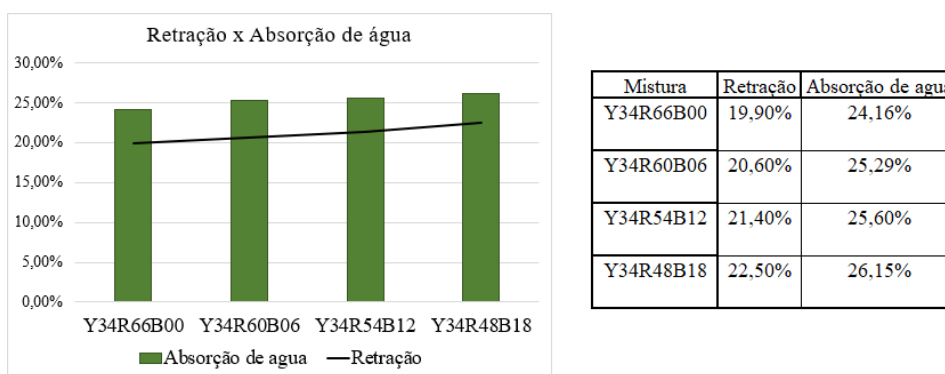
3.2 Resultados e Discussão.

3.3.1 Análise dos Corpos de Prova.

Após o período de queima, foi analisada a retração dos corpos de prova, considerando a perda de volume em relação ao estado antes da queima. Com base na Figura 3.7, observa-se que quanto maior a quantidade de resíduo de bauxita adicionada, maior foi a retração dos corpos de prova, com um valor de 22,5% (Y34R48B18). Em contrapartida, a mistura que apresentou menor retração foi aquela que não recebeu adição de resíduo de bauxita, com um valor de 19,9% (Y34R66B00). Dessa forma, pode-se afirmar que, na temperatura de 950 °C, o resíduo de bauxita, devido à sua composição, possui propriedades que resultam em uma maior perda de massa em comparação à argila.

Além disso, os resultados da absorção de água estão sendo apresentados também na Figura 3.1. Observou-se que apenas o corpo de prova Y34R66B00, com teor de absorção de 24,16%, conseguiu atender aos critérios normativos que especifica estar dentro da faixa de 8% a 25%. Além disso, verificou-se que o aumento da quantidade de resíduo de bauxita nas misturas resultou em um aumento na absorção de água. A mistura 4, com 18% de resíduo de bauxita, apresentou um valor de retração de 26,15%, superior ao limite estabelecido pela norma.

Figura 3.1- Figura com teores de absorção e retração de água dos corpos de prova.



Fonte: Autoral.

Na Tabela 3.2 estão apresentados os valores médios dos ensaios de resistência à compressão axial. Os resultados indicaram que a mistura 1 obteve a maior média de resistência, atingindo 6,03 MPa, enquanto a mistura 2 apresentou o menor desempenho, com 5,80 MPa. As misturas 3 e 4 registraram resistência média de 5,94 MPa. Esses resultados sugerem uma leve

redução na resistência com a adição do resíduo, considerando que a diferença entre o bloco sem adição e aquele com adição foi de aproximadamente 1,5%.

Tabela 3. 2-Resistência dos corpos de prova.

Misturas	Resistência (MPa)
Y34R66B00	6,03
Y34R60B06	5,80
Y34R54B12	5,94
Y34R48B18	5,94

Fonte: Autoral.

3.3 Conclusão

Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto da adição de resíduo de bauxita, visando encontrar uma mistura ideal que possa ser benéfica na fabricação de blocos de vedação que atendam às normas brasileiras e internacionais, utilizando a mesma mistura cerâmica. Com base nos resultados dos ensaios experimentais e da análise estatística subsequente, foram obtidas as seguintes conclusões: A resistência dos corpos de prova cerâmicos foi superior nas amostras que não continham resíduo de bauxita, sugerindo que um teor abaixo do proposto (até 18%) seja uma solução mais adequada.

- A absorção de água somente atendeu às exigências normativas brasileiras nas amostras sem a presença de resíduo de bauxita, reforçando que o resíduo impactou negativamente o desempenho dos corpos cerâmicos e sugerindo novamente que um baixo teor poderia ser uma solução mais adequada.

- A queima realizada a 950°C apresentou resultados satisfatórios. Contudo, destaca-se a importância de continuar avaliando o desempenho em diferentes temperaturas de queima, pois essa variável desempenha um papel fundamental nas propriedades finais dos blocos cerâmicos.

- Em comparação com os resultados obtidos no primeiro experimento, os dados apresentados neste estudo se mostraram mais satisfatórios, uma vez que a absorção apresentou teores próximos ao sugerido pela norma e a resistência foi levemente superior quando comparadas com o do primeiro experimento, evidenciando uma evolução nos procedimentos adotados.

Como alternativa para melhorar os resultados, sugere-se otimizar a proporção de argila amarela (YC) na composição, visto que essa apresentou melhor desempenho nas propriedades analisadas. Adicionalmente, recomenda-se reduzir o teor de resíduo de bauxita na mistura, mantendo-o abaixo de 20%, para minimizar os impactos negativos na resistência, na absorção de água e na porosidade dos blocos cerâmicos.

4.0 Capítulo 4 - Estudo de mistura ideal para adição de lama vermelha na fabricação de blocos cerâmicos de vedação através de planejamento experimental pelo método simplex.

Resumo

A sustentabilidade abrange a gestão eficiente de resíduos industriais, como a lama vermelha, subproduto do beneficiamento da bauxita. Sua incorporação em cerâmica vermelha apresenta potencial como alternativa sustentável na construção civil, desde que controlada para minimizar impactos ambientais e reduzir a extração de recursos naturais. Este estudo analisou a incorporação de até 20% de lama vermelha em uma mistura para blocos cerâmicos de vedação, variando a proporção de argila amarela entre 30% e 50% e de argila vermelha entre 50% e 70%. Os corpos de prova foram submetidos a queimas de 900 °C e 1000 °C, e seus corpos de prova cilíndricos passaram por ensaios para caracterização de propriedades físicas e mecânicas (resistência, absorção e retração) . Os resultados indicaram que a queima a 1000 °C proporcionou melhor desempenho. A partir dos dados obtidos, foi realizada uma otimização de resposta para determinar a composição ideal da mistura e validar os resultados experimentais.

4.1 Introdução.

A sustentabilidade é uma das metanarrativas globais principais dos últimos 30 anos, se incorporando em debates políticos nacionais e internacionais. Sobretudo na América Latina, esse conceito foge de um viés apenas ambiental e se entrelaça ainda com a busca por justiça socioecológica, considerando a necessidade de crescimento econômico aliado à conservação dos recursos naturais. Dessa forma, ela não se limita à mitigação dos impactos ambientais, mas busca promover um desenvolvimento que garanta qualidade de vida (Álvarez-Véliz, Barton, 2024).

Dentro da abordagem de desenvolvimento sustentável, uma das principais questões discutidas é a gestão de resíduos sólidos, e uma categoria que tem papel de destaque entre eles são os resíduos sólidos industriais, que se tratam de quaisquer resíduos gerados por atividades industriais (Salman et al., 2025). Esses resíduos são comumente desenvolvidos na exploração de recursos naturais, produção de bens e produção agrícola, que segundo o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil, somaram cerca de 41,676 milhões de quilos de resíduos perigosos (classe 1) e aproximadamente 1,866 bilhão de quilos de resíduos não perigosos (classe 2) em 2020. (SINIR, 2021)

Um dos resíduos sólidos industriais advindos de exploração de recursos naturais é o resíduo de bauxita. Este resíduo é gerado pela adição de soda cáustica concentrada para dissolver a bauxita durante o processo de produção de alumina que resulta no alumínio

comercializado e exportado. A disposição desse resíduo é em estocagem, consumindo muitos recursos humanos e financeiros, e ocupando grandes áreas de terra, poluindo o meio ambiente, e deixando um risco iminente de desastres de derramamento quando não gerenciado adequadamente (Xue, 2019).

Entre 1,0 e 1,5 toneladas de resíduo de bauxita são produzidos para cada tonelada de alumina, e estima-se que anualmente sejam produzidas cerca de 90 milhões de toneladas desse resíduo no mundo (Song et al., 2021). A partir disso, o reaproveitamento do resíduo se torna essencial para evitar danos ambientais e sociais, e desocupar as amplas áreas de estocagem, sendo as principais áreas de aplicação a reciclagem de metais valiosos, a produção de materiais de construção e a recuperação ambiental (Xue, 2019).

Mohagerani et al., (2016) já haviam apontado que os tijolos cerâmicos, por suas propriedades, são um dos materiais de alvenaria mais comuns, e são estudados com diferentes tipos de incorporação. Alguns exemplos envolvem resíduos de processos industriais alimentícios (Ferreira et al., 2023), algas (Parente et al., 2024), minérios (Mendes, 2019), resíduo de rochas ornamentais (Dillibabu, 2023). A cerâmica vermelha é ainda um material amplamente utilizado em países da América Latina, principalmente no Brasil. Cerca de 88,2% das construções no Brasil são feitas com paredes em alvenaria utilizando blocos de vedação cerâmicos, de acordo com a Pesquisa Nacional de Domicílios, conduzida pelo IBGE, o que fortalece o potencial de incorporação de resíduos nessa indústria, que é ampla. (PNAD, 2019) É importante, no entanto, estudar a incorporação na cerâmica com cautela, a fim de encontrar a proporção de resíduo e a temperatura de queima adequados, uma vez que é necessário cautela devido aos possíveis impactos negativos, como o aumento da absorção de água e a redução da resistência mecânica. (Ferreira et al., 2023)

Liu et al., (2017) investigaram a aplicação do resíduo de bauxita na fabricação de tijolos cerâmicos sinterizados, analisando a influência da temperatura de sinterização em suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais. Os resultados mostraram que os tijolos cerâmicos contendo o resíduo apresentaram resistência à compressão de 22,69 MPa, densidade aparente de 1,68 g/cm³ e porosidade total de 47,12% quando sinterizados a 1125°C. Além disso, os tijolos apresentaram excelente permeabilidade à água devido à formação de uma rede de poros interconectados durante a sinterização, tornando-os adequados para aplicações em pavimentação drenante, por exemplo. (Liu et al., 2017)

Scribot et al., (2018) trabalhou com a incorporação de lama vermelha modificada (MRM) em materiais cerâmicos, substituindo argilas naturais em proporções de até 30%. Foram analisadas propriedades químicas, mineralógicas e mecânicas dos produtos cerâmicos obtidos

em diferentes temperaturas de queima (950 °C e 1015 °C). Os resultados indicaram que a adição de até 30% de MRM permite a produção de cerâmicas com propriedades aceitáveis, apresentando resistência mecânica adequada e baixa permeabilidade. No entanto, verificou-se que o aumento da proporção de MRM reduziu a resistência mecânica e aumentou a absorção de água, destacando a importância do controle da composição, frisando a importância do estudo da proporção mais adequada de adição. (Scribot et al., 2018).

Shinomiya et al., (2019), estudaram a aplicação de resíduo de bauxita na produção de cerâmica vermelha investigando o potencial desse resíduo como um componente na fabricação de tijolos e outros materiais cerâmicos no estado do Pará, no Brasil. Os resultados indicaram que a adição do resíduo pode melhorar características físicas e mecânicas dos tijolos, como resistência e durabilidade, ao mesmo tempo em que oferece uma solução sustentável para a descarte desse resíduo. Concluindo que ao incorporar a Lama Vermelha, é possível não apenas reduzir o impacto ambiental associado ao seu acúmulo, mas também atender à demanda por materiais de construção mais ecológicos e economicamente viáveis, destacando a viabilidade técnica e econômica da integração dessa matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de cerâmica de vedação (Shinomiya et al., 2019).

Já Neto (2023) estudou a aplicação de lama vermelha, um rejeito do processo Bayer, incorporada na produção de cerâmica vermelha, especificamente na formulação de tijolos de vedação. O trabalho avaliou três diferentes misturas de lama vermelha e argila, sendo a formulação LA 6040 (60% de rejeito e 40% de argila) destacada como a mais promissora devido à sua resistência à flexão e outras propriedades mecânicas adequadas. Os resultados mostraram que essa adição não apenas possibilitou a obtenção de tijolos com desempenho comparável aos produtos convencionais, mas também reduziu o tempo e a temperatura de queima necessários, contribuindo significativamente para a eficiência do processo produtivo, redução de custos e menor impacto ambiental, ao valorizar um resíduo industrial antes descartado (Neto, 2023).

Assim, os estudos demonstram que a incorporação de lama vermelha não só oferece uma solução para o manejo deste resíduo industrial, mas também contribui para a produção de tijolos cerâmicos de baixo impacto ambiental (He et al., 2012) embora seja necessário adaptar as proporções em busca de um desempenho satisfatório para o resíduo da região. No entanto é importante salientar que a lama vermelha pode possuir diferentes composições a variar a localidade, assim como as argilas utilizadas (Silva, 2020).

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade da incorporação do resíduo de bauxita em mistura para blocos cerâmicos de vedação, buscando definir uma composição de

mistura ótima através do método simplex. A partir dessa mistura, procurou-se avaliar se essa composição de mistura ideal corresponde a propriedades satisfatórias através de corpos de prova cilíndricos.

4.2 Metodologia.

4.2.1. Preparação das Misturas

Com base no estudo apresentado no tópico 2.3, e nos resultados obtidos do experimento do tópico 3.3.2, foi elaborado um modelo experimental para a incorporação de resíduo de bauxita em corpos de prova cerâmicos. A metodologia adotada baseou-se em estudos prévios, utilizando o resíduo em proporções que variaram de 0% a 20%, em combinações com 50% a 70% de argila vermelha (RC) e 30% a 50% de argila amarela (YC). Para o delineamento das misturas, empregou-se o software Minitab® 17, seguindo o formato centroide simples de grau três (modelo cúbico). Assim, foram geradas 10 misturas distintas, respeitando os limites máximos e mínimos de cada componente, cujas proporções estão detalhadas na Tabela 4.1.

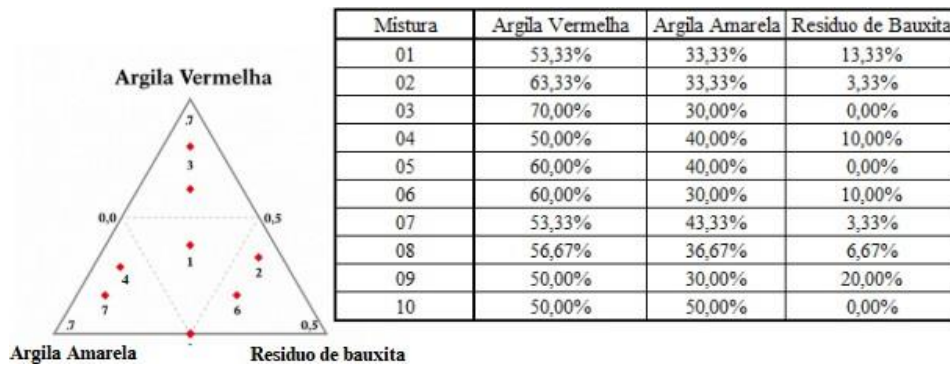
Após o delineamento, os corpos de prova foram confeccionados em duas etapas de queima, realizadas às temperaturas de 900 °C e 1000 °C. Essas temperaturas foram escolhidas com base em resultados de experimentos anteriores (Tópico 2.3), que demonstraram desempenho superior em relação à queima a 800 °C. Para as queimas, foi adotada uma taxa de aquecimento de 4 °C por minuto. Para cada mistura e temperatura, foram produzidos cinco corpos de prova, totalizando 100 corpos ao final do experimento.

O objetivo dessa produção foi avaliar propriedades essenciais da mistura dos corpos de prova cerâmicos, como índice de absorção de água, densidade aparente, retração linear pós-queima e resistência à compressão axial. Durante o processo de fabricação, a densidade aparente das amostras foi calculada, apresentando valores entre 1,8 g/cm³ e 2,1 g/cm³ após a moldagem.

As etapas de preparação incluíram a secagem das amostras em estufa a 100°C, para garantir a eliminação da umidade superficial, e a peneiração por uma malha ASTM 50 mesh (abertura de 0,3 mm), visando à uniformização das partículas. A mistura dos materiais foi realizada conforme as proporções estabelecidas na Figura 4.1, com adição de 10% de umidade em relação ao peso total, seguindo o protocolo descrito por Pedroti et al. (2011).

Esse planejamento experimental forneceu a base para avaliar o impacto do resíduo de bauxita nas propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova cerâmicos, contribuindo para a compreensão do potencial de sua aplicação em escala industrial.

Figura 4.1- Dados da mistura em modelo Simplex.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram moldados por prensagem uniaxial, utilizando uma prensa hidráulica do tipo Marshall, localizada na Universidade Federal de Viçosa. Com o auxílio de um molde, foram produzidos corpos cilíndricos com aproximadamente 3 cm de diâmetro e 5 cm de altura. De acordo com o estudo de Silva, Sagadães e Devezas (2005), a densidade e o controle de materiais são essenciais para garantir a qualidade e o desempenho de produtos cerâmicos, pois influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade em aplicações específicas.

A medição da retração linear foi realizada a partir das dimensões dos corpos de prova nos estados seco e queimado, utilizando um escalímetro digital com precisão de 0,01 mm. Os ensaios de absorção de água e densidade aparente foram conduzidos conforme as normas estabelecidas na NBR 15270-2 (ABNT, 2017).

4.2.2. Análise estatística dos corpos de prova.

A análise estatística foi realizada utilizando o método simplex de misturas, considerando três componentes principais: Argila Amarela, Argila Vermelha e resíduo de bauxita. O software Minitab® 17 foi empregado para o delineamento e análise dos dados. A avaliação da influência dos fatores sobre os parâmetros investigados foi conduzida por meio da análise de variância (ANOVA), adotando um p-valor de 0,10. Esse procedimento possibilitou a identificação de fatores, interações e efeitos de segunda ordem com impacto estatisticamente significativo nas variáveis-resposta.

Como referência normativa, foram adotados os limites estabelecidos pela ABNT NBR 15270-1:2017, que define os critérios de desempenho para blocos cerâmicos utilizados na construção civil. De acordo com essa norma, a absorção de água deve situar-se entre 8% e 25%, enquanto a resistência à compressão não deve ser inferior a 1,5 MPa. A análise considerou as particularidades entre corpos de prova maciços e vazados, com o objetivo de verificar se as

propriedades dos elementos cerâmicos avaliados atendem às exigências estabelecidas para seu uso em alvenarias de vedação.

4.2.3. Identificação da Mistura.

Com base nos resultados obtidos e com o auxílio do software Minitab® 17, foi possível identificar uma composição ideal, através de um otimizador de resposta que atendesse aos critérios normativos estabelecidos e que também apresentasse desempenho satisfatório.

Dentre as variáveis analisadas, foi utilizada a queima que apresentou os melhores resultados. Além disso, com base nos dados obtidos, será realizada uma nova formulação, com o objetivo de definir as proporções ideais de argila amarela (YC), argila vermelha (RC) e resíduo de bauxita.

Com base nesses parâmetros, o software auxiliou na previsão de um comportamento otimizado da mistura, estabelecendo como objetivo uma taxa de absorção de água de aproximadamente 22% e uma resistência mecânica de 10,86 MPa.

4.2.4. Caracterização da Mistura ideal.

A caracterização foi baseada na mistura do tópico 4.2.5, em que foi realizado as caracterizações físicas das amostras envolveu a análise granulométrica e a determinação dos limites de plasticidade e liquidez, ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa. Além disso, a caracterização química teve como objetivo identificar os principais componentes da mistura, utilizando o espectrômetro de fluorescência de raios X *Panalytical MagiX PW2540*, localizado na Universidade Federal de Ouro Preto.

Adicionalmente, uma fração das amostras foi enviada ao Laboratório de Física da UFV, onde foram conduzidos ensaios de Difração de Raios X (DRX) com o equipamento *D8 Discover* da fabricante *Broker*. O comportamento térmico das amostras foi analisado por termogravimetria (TGA) e análise térmica diferencial (DTA), empregando o equipamento Shimadzu DTG-60H no Laboratório de Química da Universidade Federal de Viçosa.

4.2.5. Preparação dos corpos de prova da Mistura ideal.

Inicialmente, foram produzidos dez corpos de provas com a mistura ideal, dessas as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 1000°C. Em seguida, passaram pelo processo de destorroamento e peneiramento em malha ASTM 50 mesh (0,3 mm de abertura). As frações peneiradas foram pesadas e homogeneizadas manualmente em um único recipiente, obedecendo às proporções previamente estabelecidas.

Os corpos de prova foram moldados por prensagem uniaxial, utilizando uma prensa hidráulica do tipo Marshall, localizada na Universidade Federal de Viçosa. Com o auxílio de um molde, foram confeccionados dez corpos de prova cilíndricos, com aproximadamente 3 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A densidade foi considerada um parâmetro essencial para o controle de qualidade, conforme recomendado por Minas Labor (2024).

A massa específica dos corpos de prova foi definida com base na literatura, considerando estudos anteriores e variando entre 1,8 g/cm³ e 2,1 g/cm³. Optou-se, contudo, por valores próximos de 2,0 g/cm³, com o objetivo de garantir maior uniformidade entre as amostras. Adicionalmente, foi incorporado um teor de umidade correspondente a 10% da massa total, conforme metodologia descrita por Pedroti et al. (2011).

4.2.6. Análise dos corpos de prova da Mistura ideal.

A partir dos dez corpos de prova, foram realizadas análises de retração, taxa de absorção de água, e resistência mecânica. O objetivo foi verificar a compatibilidade dos resultados com o ponto ideal determinado pelo Minitab® 17, que previa uma absorção próxima de 22% e resistência de 10 MPa. A temperatura de queima adotada foi de 1000°C.

4.3 Resultados e Discussões.

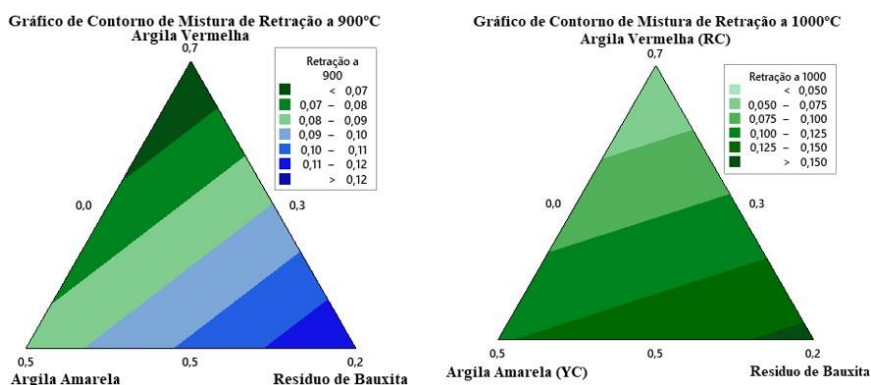
4.3.1. Retração dos corpos de prova.

O primeiro parâmetro analisado foi a retração dos corpos de prova, associada à perda de massa e volume após a queima nas duas temperaturas solicitadas. A Figura 4.2 apresenta a distribuição das misturas pelo método simplex, evidenciando que o aumento do teor de resíduo de bauxita resultou em uma retração mais acentuada. A mistura 9, que continha o maior percentual de resíduo de bauxita (20%), apresentou retração superior àquela observada na mistura 5, que não incluía esse resíduo, resultando em uma redução expressiva de volume e massa. Em contrapartida, os corpos de prova com maior proporção de argila vermelha (RC) exibiram menor retração.

Além disso, diferentemente do esperado, o resíduo de bauxita não atuou na redução da retração, mas contribuiu para o seu aumento. Ainda assim, verificou-se que o aumento da temperatura impactou a retração dos corpos de prova. Os corpos de prova queimados a 1000°C (Figura 4.2b) apresentaram retração mais elevada em comparação àqueles queimados a 900°C (Figura 4.2a), demonstrando a influência do tratamento térmico nesse comportamento.

Figura 4. 2- Retração dos corpos de prova.

a) Temperatura de 900°C. b) Temperatura de 1000°C.



Fonte: Autoral

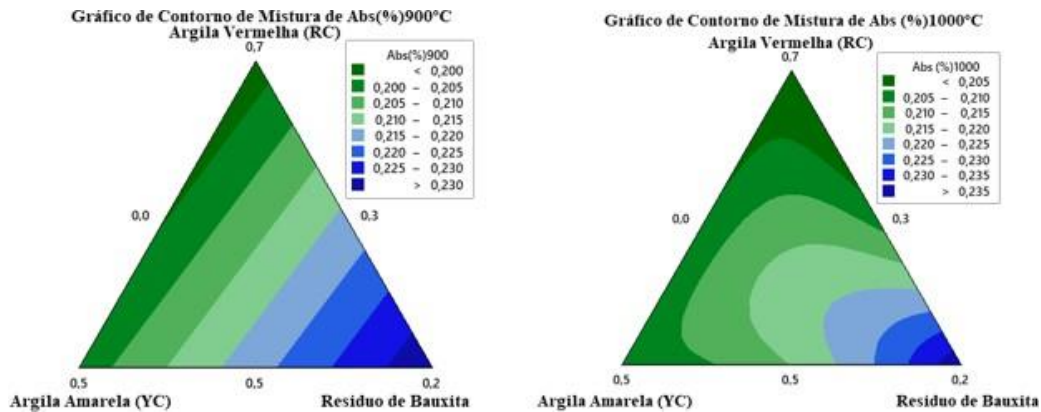
4.3.2. Absorção de água.

Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados de absorção de água, evidenciando que a queima a 1000°C teve significância estatística, com um nível de confiança, p-valor superior a 90%. Além disso, todos os corpos de prova analisados atenderam aos limites estabelecidos pela norma brasileira, mantendo a absorção abaixo de 25%.

Observou-se que as amostras com maior teor de resíduo de bauxita, próximas de 20%, apresentaram valores mais elevados de absorção de água, superando os 23% de absorção de água nas duas queimas. Outro ponto que se pode observar é que o ponto de menor percentual de absorção de água ocorreu quando em suas proporções tinham a proporção máxima (70% de sua composição) de argila vermelha (RC), sendo que na temperatura de 900°C teve uma absorção inferior a 22%, enquanto na queima de 1000°C, a absorção nessa região do gráfico simplex tenha ficado com 20,5%.

Além disso, a temperatura de queima mostrou-se um fator determinante no desempenho dos corpos de prova, sendo que a queima a 1000°C apresentou os melhores resultados em termos de absorção de água, reforçando sua relevância no processo.

Figura 4.3- Absorção de água. (a) na temperatura de 900°C. (b) na temperatura de 1000°C.



Fonte: autor

4.3.3. Resistência à compressão.

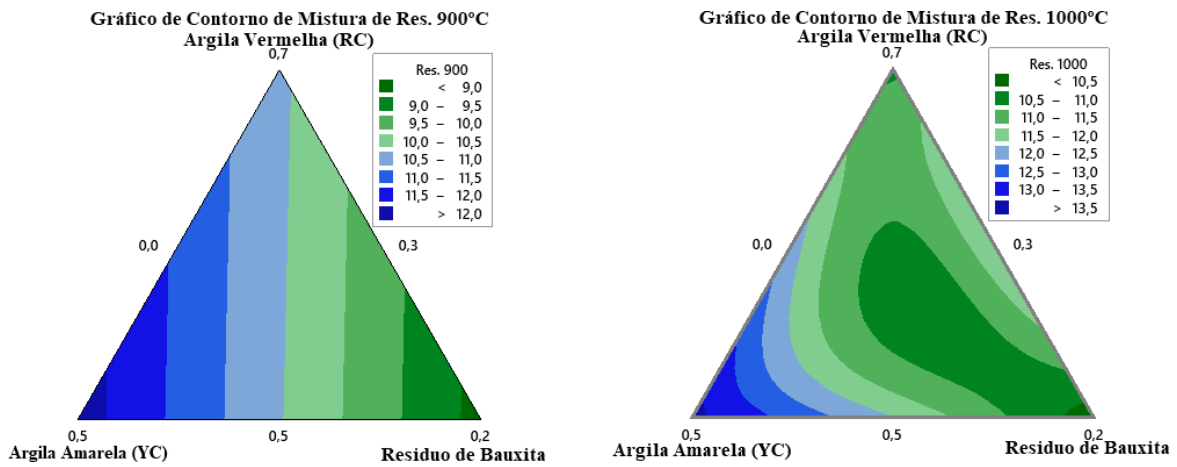
Os resultados da resistência mecânica estão apresentados na Figura 4.4. As médias dos corpos de prova variaram entre 9 e 13,5 MPa, com diferenças observadas entre as temperaturas de queima analisadas (900°C e 1000°C). Os corpos de prova queimados a 900°C (Figura 4.10a) apresentaram médias na resistência entre 9MPa e 12MPa, demonstrando um desempenho considerado satisfatório. Já aqueles submetidos à queima a 1000°C (Figura 4.10b) exibiram resistência levemente superior, com valores entre 10,5MPa a 13,50 Mpa, esboçando a importância da queima nos corpos de prova.

Além disso, observou-se que as misturas com maior teor de resíduo de bauxita, especialmente aquelas acima de 13%, apresentaram as menores resistências. Esse resultado reforça que a adição superior a essa porcentagem de resíduo compromete a integridade estrutural do material, enquanto formulações com menor teor de bauxita demonstraram melhor desempenho mecânico.

Assim como verificado na absorção de água, a queima a 1000°C apresentou um p-valor inferior a 10%, demonstrando que a temperatura de queima influenciou positivamente o processo de fabricação dos corpos de prova. Apresentando assim que as temperaturas mais elevadas favorecem a sinterização e a resistência final dos corpos de prova.

Figura 4.4- Resistência mecânica.

a) temperatura de 900°C. b) Temperatura de 1000°C.

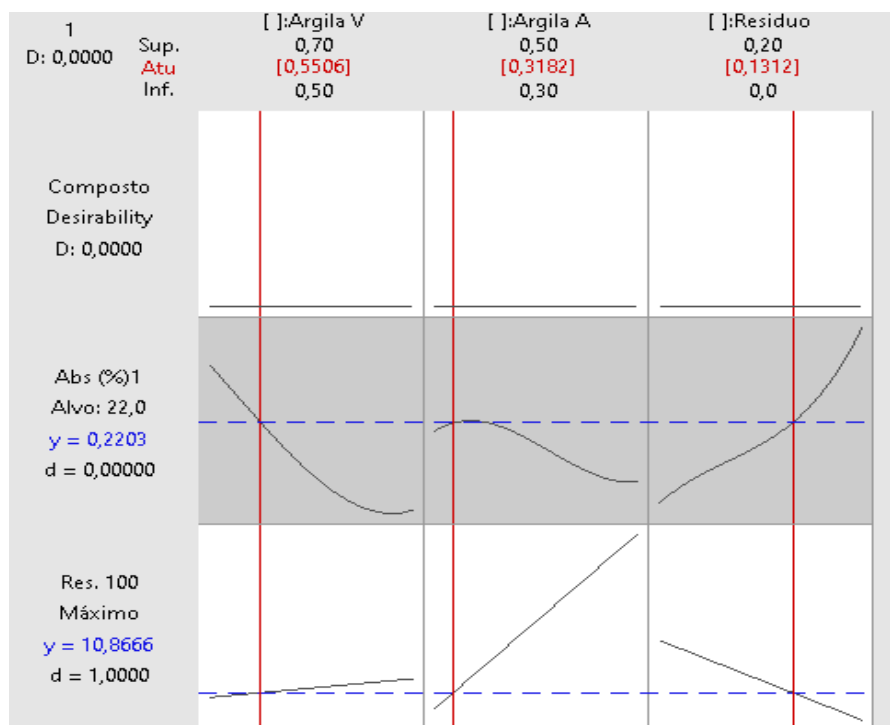


Fonte: Autoral

4.3.4. Identificação da Mistura.

Com base nos resultados obtidos, foi realizada uma otimização de resposta, na qual foi selecionado o ponto que atendeu simultaneamente às normas brasileiras e americanas. Considerando que os melhores resultados foram constatados nos corpos de prova submetidos à queima a 1000°C, essa temperatura foi escolhida como parâmetro ideal. A otimização de resposta está apresentada na Figura 4.5.

Figura 4.5- Otimizador de resposta.



Fonte: autoral.

elevado de caulinita e uma menor quantidade de sílica livre na forma de quartzo. Para a caulinita pura, o valor teórico dessa relação é de 1,18 (Mahmoudi et al., 2017 apud Mendes et al., 2019), o que sugere que a elevada presença desse mineral pode favorecer a plasticidade do material.

Além disso, verificou-se um teor significativo de óxido de ferro (III), Fe_2O_3 , responsável pela coloração alaranjada do material, resultado corroborado pelos índices observados nos materiais analisados isoladamente, especialmente no resíduo de bauxita (Argila Vermelha: 7,74%; Argila Amarela: 6,84%; Resíduo de Bauxita: 21,53%). Os elevados teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 confirmam que o material apresenta características adequadas para a produção de corpos de prova cerâmicos.

Tabela 4.3 - FRX da mistura

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	CaO	MgO
Teores (%)	48,19%	36,45%	11,91%	1,43%	0,96%	0,36%	0,31%

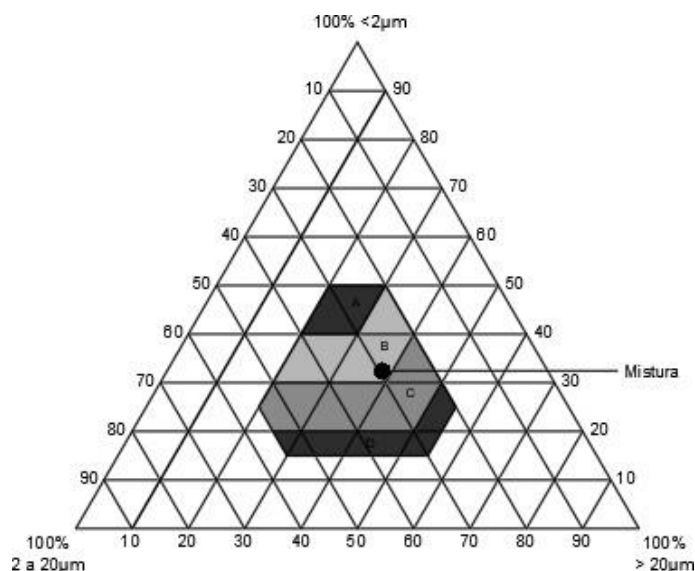
Fonte: Autoral

Nos ensaios de granulometria realizados na caracterização física, a mistura apresentou 31,3% de argila, 32,5% de silte e 36,2% de areia. Devido à proximidade desses percentuais, o material é classificado como franco, caracterizado por uma capacidade equilibrada de retenção de água e formação de uma estrutura estável (Sharma et al., 2022).

A elevada presença de silte e areia pode ser atribuída às amostras de Argila Vermelha (RC) e ao resíduo de bauxita, ambos materiais com teores expressivos desses componentes.

Com base nos resultados da granulometria, foi possível elaborar o diagrama de Winkler, apresentado na Figura 4.7. A análise posicionou a mistura na área sombreada B, indicando seu potencial para a fabricação de capas e telhas.

Figura 4.7- Diagrama de Winkler da mistura

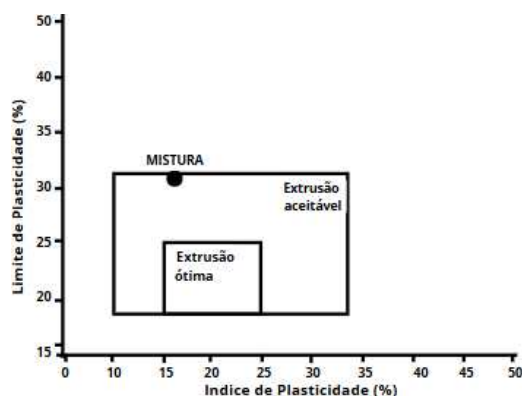


Fonte: autoral.

Além disso, foram realizados ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade. Os resultados indicaram um limite de liquidez de 45% e um limite de plasticidade de 31%.

Com base nesses valores, foi possível elaborar o gráfico de extrusão, apresentado na Figura 4.8, no qual a mistura situou-se dentro da área considerada adequada para extrusão, confirmando sua viabilidade para a extrusão de um possível bloco cerâmico.

Figura 4.8- Diagrama de extrusão.

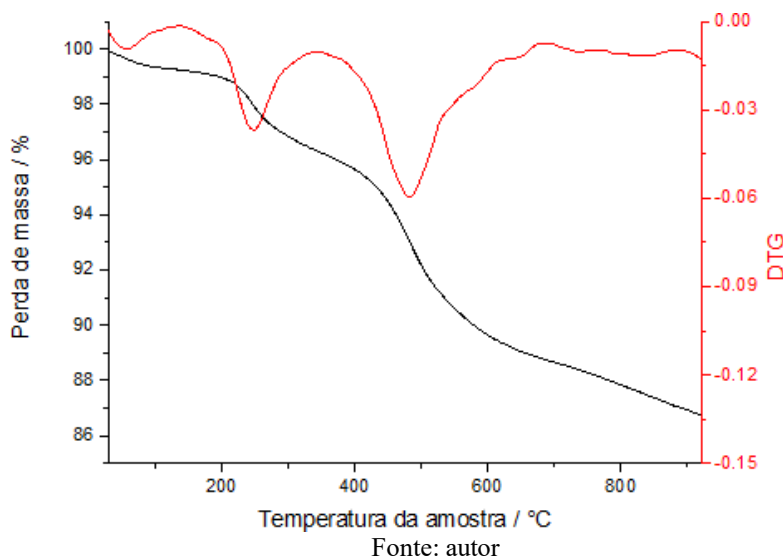


Fonte: autoral.

A Figura 4.9 apresenta os resultados das análises de DTA e TG da mistura ideal, evidenciando picos em aproximadamente 250°C e 500°C. Esses picos também foram observados nas amostras de argila vermelha (RC) e argila amarela (YC) e estão associados à formação de metacaulinita, além da perda de massa decorrente da eliminação de água adsorvida e da decomposição de matéria orgânica presente no material.

Além disso, com o aumento da temperatura, verificou-se uma redução progressiva da massa, indicando retração do material ao longo do processo térmico. Esse comportamento reforça a influência da composição mineralógica na estabilidade térmica da mistura.

Figura 4.9- DTA e TG da mistura ideal



4.3.6. Absorção de Água.

Os dez corpos de prova foram confeccionados com densidade próxima de $2,0 \text{ g/cm}^3$. A análise teve como objetivo alcançar um índice de absorção em torno de 22%. Os resultados obtidos variaram entre 20,89% e 22,29%, sendo os valores mais discrepantes eliminados por meio do método de Chauvenet.

A média de absorção dos corpos de prova foi de 21,87%, atendendo aos critérios estabelecidos pela norma internacional, o que confirma a adequação do material. Além disso, a proximidade entre o resultado obtido e o valor previsto indica que o processo de queima foi conduzido de maneira eficaz.

Além disso, a retração dos corpos de prova foi analisada com o objetivo de avaliar sua eficiência.

4.3.7. Resistência Mecânica.

A resistência dos corpos de prova foi analisada com o objetivo de verificar sua conformidade com o valor previsto de 10 MPa. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo aplicado o método de Chauvenet para a exclusão de valores discrepantes.

A maioria dos corpos de prova apresentou resistência superior a 10 MPa. A média final foi de 10,14 MPa, atendendo aos critérios estabelecidos e confirmando a adequação do material para uso, em conformidade com a resistência prevista.

4.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A temperatura de queima foi um fator determinante no desempenho dos corpos de prova cerâmicos. A queima a 1000°C resultou em propriedades superiores em comparação à queima a 900°C, demonstrando sua influência na resistência mecânica e na redução da porosidade dos blocos. A análise estatística confirmou a consistência dos resultados, evidenciando a adequação dos parâmetros adotados.
- O resíduo de bauxita mostrou potencial para aplicação na cerâmica vermelha, desde que utilizado em proporções reduzidas. A incorporação de até 13% desse resíduo demonstrou-se eficiente, contribuindo positivamente para a resistência mecânica e a absorção de água dos corpos de prova cerâmicos. Teores superiores a 14% comprometeram o desempenho dos blocos, indicando um limite seguro para sua utilização.
- A absorção de água das amostras permaneceu dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira, garantindo a viabilidade do material para uso em conformidade com os regulamentos nacionais. Além disso, a porosidade dos blocos foi diretamente influenciada pelo teor de resíduo de bauxita, sendo que misturas com até 14% apresentaram uma estrutura mais compacta e adequada.
- Os dados obtidos permitiram entender sobre o potencial do resíduo de bauxita na fabricação de materiais cerâmicos, reforçando sua viabilidade como matéria-prima. Além disso, indicando que a adição de 13% desse resíduo evitou aumentos na retração e na porosidade do material, tornando essa formulação adequada para aplicações futuras.
- Por fim, o planejamento experimental demonstrou-se satisfatório, validando a combinação das argilas analisadas com baixos teores de resíduo de bauxita. Esses achados ampliam as possibilidades de pesquisa e aplicação desse material na indústria cerâmica.

5.0 Conclusão geral

5.1 Conclusões dos estudos

Com base no presente estudo, foi possível avaliar o impacto da incorporação de resíduo de bauxita em mistura na fabricação de blocos cerâmicos. Observou-se que teores elevados, de até 40%, resultaram em desempenho insatisfatório nos ensaios de resistência mecânica, absorção de água e retração volumétrica. Diante disso, buscou-se adotar padrões já consolidados na indústria cerâmica, utilizando a proporção de 2:1, na qual duas partes de argila fraca foram combinadas com uma parte de argila mais argilosa (forte). A partir disso, permitiu verificar que a incorporação de menores teores de resíduo proporcionou melhor desempenho, sendo estabelecida como ideal a adição de até 20% de resíduo de bauxita.

Além disso, foram testadas quatro temperaturas de queima: 800°C, 900°C, 950°C e 1000°C. A análise dos resultados evidenciou que a temperatura influenciou diretamente as propriedades dos corpos de prova. A queima a 1000°C apresentou o melhor desempenho, promovendo melhoria nas características mecânicas e estruturais dos corpos de provas, enquanto a queima a 800°C resultou em propriedades menos satisfatórias.

As etapas de caracterização revelaram-se fundamentais para o entendimento do comportamento das misturas. A análise granulométrica possibilitou avaliar o material para a confecção dos corpos de prova, enquanto a caracterização química permitiu identificar os principais minerais presentes. Os ensaios de DRX confirmaram a composição mineralógica das amostras, e as análises térmicas DTA/TG foram fundamentais para compreender o comportamento térmico.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a adição ajustada de resíduo de bauxita, aliada à escolha adequada da temperatura de queima, pode contribuir para a produção de blocos cerâmicos com propriedades adequadas para aplicação na construção civil.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros.

O presente estudo demonstrou a viabilidade da utilização do resíduo de bauxita na fabricação de blocos cerâmicos. Diante dos resultados obtidos, recomenda-se a continuidade das pesquisas, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas e físicas do material incorporado ao resíduo.

Além disso, sugere-se a realização de estudos complementares voltados para a caracterização ambiental do material, visando avaliar sua possível toxicidade e os impactos à

saúde humana. Outra abordagem relevante seria a análise do comportamento do material em contato com a água, investigando possíveis transformações físicas, químicas ou biológicas

6.0 Referências Bibliográficas

AGUIAR, A. C. de; SILVA, K. A. da; EL-DEIR, S. G. Resíduos sólidos: impactos ambientais e inovações tecnológicas. 1. ed. Recife: Editora da Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019. (Gampe/UFRPE). Acesso em: 25 set. 2023.

AKANBI, Lukman A. et al. Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 223, p. 386-396, 2019.

ALEXANDRE, J.; TOLEDO, R.; SABOYA, F.; PEREIRA, M. Utilização de planejamento em rede Simplex na previsão de propriedades mecânicas de peças cerâmicas vermelhas. *Cerâmica*, v. 47, n. 303, p. 170–174, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132001000300008>.

ÁLVAREZ-VÉLIZ, Rodrigo; BARTON, Jonathan R. The historical geography of an idea: Sustainable development in Latin America, 1972–2022. *Journal of Historical Geography*, v. 86, p. 175-186, 2024.

ANFACER. Números do setor cerâmico. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, [ano]. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ANFACER. Brasil concentra 4 dos maiores produtores de cerâmica do mundo.

ANFACER • Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 1 nov. 2023. Acesso em: 25 set. 2023.

ANICER. Relatório anual. *Revista ANICER 2020*, 2020. Acesso em: 25 set. 2023

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; TOLEDO, P. K. Bauxita e seu resíduo: caracterização e estudo por microscopia eletrônica. 2012. Acesso em: 25 set. 2023.

ARROYO, F. et al. Environmental risks and mechanical evaluation of recycling red mud in bricks. *Environmental Research*, v. 186, p. 109537, 2020.

ASCE. Policy statement 418 - the role of the civil engineer in sustainable development. 2021. Disponível em: <https://www.asce.org/advocacy/policy-statements/ps418—the-role-of-the-civil-engineer-in-sustainable-development>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ASCE. Public policy mission statement. ASCE Public Policy and Practice Committee, 2022. Disponível em: <https://www.asce.org/-/media/asce-images-and-files/advocacy/documents/asce-public-policy-mission-statement.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo-Determinação do

limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grão de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo-Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p. Acesso em: 13 out. 2023.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. *Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio 2023*. São Paulo: ABAL, 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>. Acesso em: 05 out. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C62-08: Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale). West Conshohocken, 2008.

ATAN, E. S. M. C. AS. Combined effects of Bayer process bauxite waste (red mud) and agricultural waste on technological properties of fired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103194>.

AZEVEDO, A. R. G. DE. et al. Perspectives for the application of bauxite wastes in the development of alternative building materials. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 20, p. 3114–3125, 1 set. 2022.

AZEVEDO, A. R. G. de; MARVILA, M. T.; OLIVEIRA, M. A. B. de; UMBUZEIRO, C. E. M.; HUAMAN, N. R. C.; MONTEIRO, S. N. Perspectives for the application of bauxite wastes in the development of alternative building materials. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 20, p. 3114–3125, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.08.092>.

BABISK, M. P. et al. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 2186–2195, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>.

BATISTA, L. F.; SOUZA, M. A. A. DE. Aptidão dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal para condicionamento, utilização e disposição final. *Revista DAE*, v. 68, n. 226, p. 179–195, 18 set. 2020.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. de. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 14, n. 4, p. 1088–1100, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000400002>.

BAUMANN, D.; KELLER, W. D. Bulk densities of selected dried natural and fired kaolin clays. *Clays and Clay Minerals*, v. 23, p. 424–427, 1975.

BERNI MILLET, P.; JÁRREGA DOMÍNGUEZ, R.; CARRERAS MONFORT, C. Laboratório virtual 'Amphorae ex Hispania' (<http://amphorae.icac.cat>). In: BERNAL, D. et al. (Ed.). *Monografías Ex Officina Hispana I. Hornos, talleres y focos de producción alfarera en Hispania*. T. I, 2013. p. 23-30. Disponível em: https://www.icac.cat/wp-content/uploads/users/default/biblioteca/icac_art_1127.pdf. Acesso em: 25 set. 2023.

BULLERJAHN, Frank; BOLTE, Gerd. Composition of the reactivity of engineered slags from bauxite residue and steel slag smelting and use as SCM for Portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 321, p. 126331, 2022. Acesso em: 02 nov. 2023.

CARDOSO, J. G. da R. et al. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. Relatório do BNDES, p. 45–85, 2011. Acesso em: 10 nov. 2023.

CASTRO, M. L. A. C. Impactos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão no município de Barra Longa, Minas Gerais. 2018. Acesso em: 10 nov. 2023.

CERAMIC WORLD REVIEW. *Edição 148*. Baggiovara: Kairos Media Group, 2022. Disponível em: <https://ceramicworldweb.com/en/magazines/ceramic-world-review-1482022>. Acesso em: 10 nov. 2023.

DAS, Subodh K.; SHAHABUDDIN, Muntasir. Current Status and Proposed Economic Incentives for Higher Utilization of Bauxite Residue to Enhance Sustainability of the Aluminum Industry. In: TMS Annual Meeting & Exhibition. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 849-851.

DESTEFAINI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade. *Cerâmica*, v. 57, n. 344, p. 491–498, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000400018>.

DIBATTISTA, Ilaria et al. Socio-environmental impact of mining activities in Guinea: The case of bauxite extraction in the region of Boké. *Journal of Cleaner Production*, v. 387, p. 135720, 2023.

DILLIBABU, Surrya Prakash et al. Characterization of waste from the ornamental stone processing for incarnation in clay ceramics. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

- DONDI, M.; FABBRI, B.; GUARINI, G. Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products: a reappraisal of the Winkler diagram. *Clay Minerals*, v. 33, p. 435–442, 1998.
- DOS SANTOS, Roseane Martins et al. Incorporação de lama vermelha na indústria cerâmica: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, p. e321101018949-e321101018949, 2021.
- DUTRA, R. P. S. et al. Estudo comparativo da queima rápida com a queima tradicional nas propriedades de materiais cerâmicos de base argilosa. *Cerâmica*, v. 55, n. 333, p. 100–105, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100014>.
- EL SHEIKH, S. CO2 emissions from buildings and construction hit new high, leaving sector off track to decarbonize by 2050: UN. UN Environment Programme, 2022.
- FERNANDES, L. Barcarena: há um ano, mais uma tragédia marcava a mineração no Brasil. *Revista Brasil de Fato*, 17 fev. 2019. Acesso em: 25 nov. 2023.
- FERREIRA, Elvis Pantaleão et al. Incorporation of wine industry waste into red ceramic: study of physical and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 26, p. 5748-5761, 2023.
- FILHO, E. B. S. S.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. da. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 12, n. 2, p. 322–338, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000200011>.
- FREITAS, C. M. DE et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, 2019.
- GAO, Shuai et al. A low-cost process for complete utilization of bauxite residue. *Journal of Environmental Management*, v. 356, p. 120751, 2024.
- GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, jun. 2012.
- HAN, Yi et al. Red mud/steel slag three-dimensional electrochemical system for the removal of organic pollutant with Na₂S₂O₃ as electrolyte: Contribution of •OHads. *Separation and Purification Technology*, v. 354, p. 128774, 2025.
- HE, Hongtao et al. Preparation and mechanism of the sintered bricks produced from Yellow River silt and red mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 203, p. 53-61, 2012.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – PNAD 2019. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível

em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. *Relatório de produção mundial de alumínio 2023*. Londres: International Aluminium Institute, 2024. Disponível em: <https://www.world-aluminium.org/statistics/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

JIA, Kai et al. A review of the engineered treatment of red mud: Construction materials, metal recovery, and soilization revegetation. *Results in Engineering*, p. 102927, 2024.

KAR, S. et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis of nitrogen recovery by ammonia air-stripping from wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, v. 857, p. 159499, jan. 2023.

LEAL, Ailton Pires. Resíduos da construção civil: uma revisão sobre as possibilidades de aplicação. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 7, n. 6, p. 459-483, 2021.

LEYS, B.; SOARES, F.; ROQUE, A. Fissuras em alvenaria estrutural: estudo de caso em um residencial de feira de santana. Monografia TCC—Feira de Santana-BA: Universidade Salvador (UNIFACS), 3 dez. 2022.

LIU, Songhui et al. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism. *Ceramics International*, v. 43, n. 15, p. 13004-13008, 2017.

LIU, Yuantao; QIN, Zhaohui; CHEN, Bing. Experimental research on magnesium phosphate cements modified by red mud. *Construction and Building Materials*, v. 231, p. 117131, 2020.

LOUZADA, B. B. et al. Aplicação de rejeito de mineração da bauxita na produção de tijolos cerâmicos. *ABM Proceedings. Anais...* São Paulo: Editora Blucher, out. 2019.

MAHMOUDI, S. et al. Characterization, firing behavior and ceramic application of clays from the Gabes region in South Tunisia. *Applied Clay Science*, v. 135, p. 215–225, jan. 2017.

MASHARIPOVA, Sh M. et al. Development of Ceramic Brick Compositions for Restoration of Historical Heritage Sites Based on Loess–Beet Lime Composition. *Glass and Ceramics*, v. 81, n. 5, p. 190-193, 2024.

MELLO, I. S. DE C. et al. Atlas de Matérias-Primas Mineraias Cerâmicas do Nordeste Brasileiro. CPRM, 2011.

MENDES, B. C. et al. Efeito da densidade aparente nas propriedades físicas e mecânicas de peças cerâmicas contendo rejeito de minério de ferro. *ABM Proceedings. Anais...* São Paulo: Editora Blucher, out. 2019.

MENDES, Beatryz Cardoso. Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos. 2019.

MINAS LABOR. A verificação de densidade. Viçosa, Brasil: [s.n.].

MOHAJERANI, Abbas; KADIR, Aeslina Abdul; LAROBINA, Luke. A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste Management*, v. 52, p. 228-244, 2016.

MORDOR INTELLIGENCE. Bauxite Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2019-2028). 2019. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/bauxite-market>. Acesso em: 30 abr. 2024.

NASCIMENTO, R. A. Caracterização de argilomineral proveniente da região sudeste do estado de São Paulo por difração de raios X: Cristais orientados. Londrina, Brasil: [s.n.].

NEVES-SILVA, P.; HELLER, L. Rompimento da barragem em Brumadinho e o acesso à água das comunidades atingidas: um caso de direitos humanos. *Ciência e Cultura*, v. 72, n. 2, p. 47–50, abr. 2020.

NETO VAZ et al. Avaliação da incorporação do rejeito do processo bayer em formulações com argila do município de Acará-PA visando a produção de cerâmica vermelha. 2023.

NIGAM, Somesh Kumar; SINHA, Anil Kumar; MADAN, Sushil Kumar. Characterisation of stabilised red mud waste material for road infrastructure. *Materials Today: Proceedings*, v. 93, p. 41-46, 2023.

PAN, Xiaolin et al. Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, v. 904, p. 166686, 2023.

PARENTE, Igor Machado da Silva et al. Holistic evaluation of ceramic clay properties with *Sargassum* spp. ash replacement. 2024.

PEDROTI, L. G. et al. Desenvolvimento de massa cerâmica para blocos queimados e prensados. *Cerâmica Industrial*, p. 25–30, jan. 2011.

PEDROTI, L. G. et al. DOSAGEM DE MASSA CERÂMICA ATRAVÉS DO MÉTODO SIMPLEX PARA BLOCOS PENSADOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE GRANITO. 67o Congresso abm. Rio de Janeiro-RJ: 2012.

PEREIRA, A. DOS S. MÉTODO SIMPLEX e sua aplicação na resolução de problemas de programação linear em um curso técnico de administração. Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional/PROFMAT—São Luís- MA: Universidade Estadual do Maranhão—UEMA, 2020.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, v. 02, p. 31–35, 1997.

QUAREMA, L. F. CONTRATO No 48000.003155/2007-17: DESENVOLVIMENTO DE

ESTUDOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DUODECENAL (2010 - 2030) DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL . São Paulo-SP: [s.n.]. 2009.

RAUT, S. P.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-crete bricks. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 10, p. 4037–4042, out. 2011.

REDDY, Peddireddy Sreekanth et al. Properties and assessment of applications of red mud (bauxite residue): current status and research needs. *Waste and Biomass Valorization*, v. 12, p. 1185-1217, 2021.

REGO, M. Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil. *Revista Alumínio* , 30 set. 2019.

RODRIGUES, D. V. et al. Durabilidade de peças cerâmicas vermelhas com adição de rejeito de rocha ornamental isenta de granalha. *Cerâmica*, v. 58, n. 347, p. 286–293, set. 2012.

SABINO, A. R. Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no município de tabatingaam: um estudo de caso em indústrias do município . Belém: Universidade Federal do Pará, ago. 2016.

SALMAN, Sheak et al. Pathways to advancing sustainable practices in industrial solid waste management: Unveiling obstacles and implications. *Next Research*, v. 2, n. 1, p. 100124, 2025.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro- RJ: [s.n.].

SATERNUS, M. Bayern's Method of Al₂O₃ Production: possibilities of red mud disposal and utilization. *Solid State Phenomena*, v. 176, p. 11-12, 2011.

SCRIBOT, Cyril et al. A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production. *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 21-31, 2018.

SEMIZ, B. Characteristics of clay-rich raw materials for ceramic applications in Denizli region (Western Anatolia). *Applied Clay Science*, v. 137, p. 83–93, mar. 2017.

SHAHULHAMEED, Binumol et al. Sustainable utilization of red mud stabilized weak soil as a pavement subgrade material. In: *Innovation and Technological Advances for Sustainability*. CRC Press, 2024. p. 515-524.

SHARMA, K. et al. Reply: *Physical Review Letters*. *Physical Review Letters*, v. 128, n. 21, p. 219602, 27 maio 2022.

SHINOMIYA, Léo Daiki; DE OLIVEIRA GOMES, Jefferson; ALVES, Joner Oliveira. Análises de cenários para reaproveitamento do resíduo de bauxita no Pará. *Tecnologia em*

Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, n. 1, p. 75-81, 2019.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Modelação estatística da reologia a seco de sistemas de partículas de alumina. Universidade de Aveiro, p. 2–5, 21 nov. 2005.

SILVA, D. M. DA. ANÁLISE TÉCNICA DE BLOCOS CERÂMICOS DE DIFERENTES FABRICANTES COMERCIALIZADOS NA CIDADE DO CABO DE SANTO AGOSTINHO DE ACORDO COM A NORMA NBR 15270:2017 . Monografia—Cabo de Santo Agostinho: UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO, jul. 2019.

SILVA, É. A. Propriedades físico-hídricas do solo e desenvolvimento radicular do cafeeiro. Tese de Doutorado—Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras, 2017

SILVA FILHO, Ernesto Batista da; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 12, p. 322-338, 2007.

SILVA, Mariana Scicia Gabriel da. Mecanismos de remoção de Cd (II), Ni (II), Pb (II) e Zn (II) pela lama vermelha natural e com diferentes ativações. 2020.

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Inventário Nacional de Resíduos Sólidos 2020. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2021. Disponível em: <https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/inventarionacional/?ano=2020>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SOUZA, Bonifácio Benício de; BENÍCIO, Maylle Alves; BENÍCIO, Antônio Wlisses Alves. Gestão e produção de cerâmica vermelha no Nordeste, especialmente no município de Parelhas - RN. *Even3 Publicações*, 2 jan. 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.29327/727438>. Acesso em: 30 abr. 2024.

SUN, Junbo et al. Red mud utilization in fiber-reinforced 3D-printed concrete: Mechanical properties and environmental impact analysis. *Construction and Building Materials*, v. 462, p. 139830, 2025.

VAN DEN EYNDE, S. et al. Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting. *[Informações complementares incompletas]*, 2022.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 57, n. 343, p. 319–323, set. 2011.

WANG, Xiaomei et al. From three-pillars to three-environments: Shifting the paradigm of sustainability in civil and construction engineering. *Cleaner Engineering and Technology*, p. 100748, 2024.

ZHAO, Y.; QIANG, S. Exploring the potential of Bayer red mud: Toward self-sensing

cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 460, p. 139850, 2025.