



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

JOSIAS DE SOUZA VAZ NETO

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO
BAYER EM FORMULAÇÕES COM ARGILA DO MUNICÍPIO DE
ACARÁ-PA VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Ananindeua - PA
2023

JOSIAS DE SOUZA VAZ NETO

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO
BAYER EM FORMULAÇÕES COM ARGILA DO MUNICÍPIO DE
ACARÁ-PA VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando

Coorientador: Dr. Eng. Augusto Fernando de Freitas Costa

Ananindeua - PA
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistemas de
Biblioteca da UFPA**

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO BAYER EM FORMULAÇÕES COM ARGILA DO MUNICÍPIO DE ACARÁ-PA VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

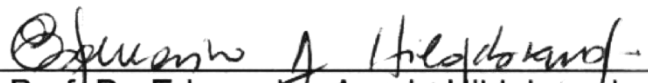
JOSIAS DE SOUZA VAZ NETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

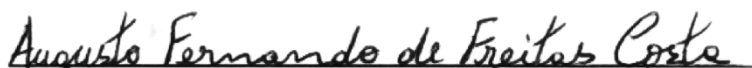
Data de avaliação: 05/12/2023

Conceito: **EXCELENTE**

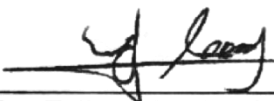
BANCA EXAMINADORA:



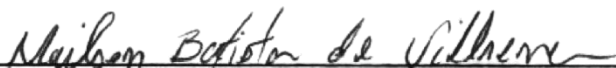
Prof. Dr. Edemarino Araujo Hildebrando
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador)



Dr. Eng. Augusto Fernando de Freitas Costa
(FEQ/ITEC/UFPA - Coorientador)



Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examiador Interno)



Me. Eng. Mailson Batista de Vilhena
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinador Externo)

À minha mãe, Nerinha (In memoriam), por todo amor e por me ensinar que a educação é a mais poderosa ferramenta de transformação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por em sua infinita bondade me conceder sabedoria, capacidade e meios para que isto se tornasse possível.

À meu pai, Samuel, por incansavelmente estar ao meu lado desde o primeiro momento e por não medir esforços para que fosse possível chegar até aqui.

À minha esposa, Crisciane, pela paciência e companhia em todo o processo.

À minha irmã, Rebeka, pelos direcionamentos e conselhos.

À meus familiares e amigos, por todo apoio. Em especial aos meus companheiros de graduação.

À meu orientador, Prof^o Dr. Edemarino Araújo Hildebrando, por toda instrução, apoio, direcionamento e inspiração.

Ao LEQ/UFPA, sobretudo ao laboratório USIMAT/UFPA e toda equipe que me auxiliou durante o período de prática e possibilitou a realização deste trabalho.

Aos laboratórios LCM/UFPA, LCMAT/UFPA e MATCAM/UFPA pela disponibilidade e auxílio com as análises e desenvolvimento da pesquisa.

À todos que contribuíram direta e indiretamente para que a realização deste trabalho fosse possível.

“Antes que diga que não consegue fazer alguma coisa, experimente”.

Saikichi Toyoda

RESUMO

O estado do Pará tem se consolidado como uma potência no sentido de abertura de novas frentes de aproveitamento e beneficiamento de matérias-primas e dado espaço para uma crescente no setor de mineração e metalurgia, contudo, essa crescente no desenvolvimento resulta também na geração de toneladas de resíduos e rejeitos, que em determinados aspectos impactam diretamente o ambiente e o entorno destes centros industriais. Tendo isto em vista, este estudo concentrou-se na produção de cerâmica vermelha, utilizando rejeitos provenientes do processo Bayer, especificamente a lama vermelha. Uma análise detalhada das formulações e dos parâmetros de processamento, tal como o patamar e tempo de queima foi conduzida com a proposta de reintroduzir este rejeito, agregando-o valor, também visando a produção com foco na redução do consumo de matérias-primas, ao mesmo tempo em que se mantém a conformidade com as normas técnicas. Para alcançar esse objetivo, este estudo baseou-se em metodologias já empregadas na inserção de lama vermelha na produção de cerâmicas, empregando ao todo três formulações distintas LA8020 (80% de Rejeito e 20% de Argila), LA6040 (60% de Rejeito e 40% de Argila) e LA100 (100% de Argila) como comparativo, além de três temperaturas de queima 900, 1000 e 1100 °C. Foram adotadas as normas relacionadas ao desenvolvimento de cerâmica vermelha ABNT NBR 15270/2017 e ABNT NBR 15310/2005, que classificam produtos cerâmicos em categorias específicas, como blocos de vedação, blocos estruturais e telhas cerâmicas, como parâmetro para avaliar a qualidade dos materiais produzidos e classificação de utilização. Os resultados obtidos indicaram que em determinados parâmetros as formulações testadas cumpriram os requisitos estabelecidos pelas normas. Isso pode ser alcançado com variações do tempo de queima e temperatura, resultando em economia significativa nos custos de produção e em uma utilização mais eficiente das matérias-primas. Além disso, os resultados demonstraram viabilidade na produção de materiais com desempenho comparável aos produtos convencionais disponíveis no mercado. É importante destacar a formulação LA6040 como a mais promissora para os fins deste estudo, pois exibiu um perfil de propriedades que sugere um alto potencial para emprego no desenvolvimento de cerâmica vermelha, tornando-a adequada para a fabricação de blocos ou tijolos de vedação.

Palavras-chave: Cerâmica Vermelha, Lama Vermelha, Processo Bayer, Rejeito.

ABSTRACT

The state of Pará has consolidated itself as a power in the sense of opening new fronts for the use and processing of raw materials and giving space for a growth in the mining and metallurgy sector, however, this growth in development also results in the generation of tons of waste and rejects, which in certain aspects directly impact the environment and the surroundings of these industrial centers. This study focused on the production of red ceramics, using waste from the Bayer process, specifically red mud. A detailed analysis of the formulations and processing parameters, such as burning level and time, was conducted with the proposal to reintroduce this waste, adding value, also aiming at production with a focus on reducing the consumption of raw materials, while maintaining compliance with technical standards. To achieve this objective, this study was based on methodologies already used in the insertion of red mud in the production of ceramics, using a total of three different formulations LA8020 (80% Waste and 20% Clay), LA6040 (60% Waste and 40% Clay) and LA100 (100% Clay) as a comparison, in addition to three firing temperatures 900, 1000 and 1100 °C. The standards related to the development of red ceramics ABNT NBR 15270/2017 and ABNT NBR 15310/2005 were adopted, which classify ceramic products into specific categories, such as sealing blocks, structural blocks and ceramic tiles, as a parameter to evaluate the quality of the materials produced and usage classification. The results obtained indicated that in certain parameters the tested formulations met the requirements established by the standards. This can be achieved by varying the burning time and temperature, resulting in significant savings in production costs and more efficient use of raw materials. Furthermore, the results demonstrated the feasibility of producing materials with performance comparable to conventional products available on the market. It is important to highlight the LA6040 formulation as the most promising for the purposes of this study, as it exhibited a property profile that suggests a high potential for use in the development of red ceramics, making it suitable for the manufacture of sealing blocks or bricks.

Keywords: Red Ceramics, Red Mud, Bayer Process, Waste materials

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do Processo Bayer e Geração da Lama Vermelha	25
Figura 2 - Mapa da região em que se localiza a empresa Hydro Alunorte.	28
Figura 3 - Mapa da região entre os pontos de coleta das matérias-primas.....	32
Figura 4 - Fluxograma do processo de obtenção, processamento e análise dos materiais do estudo.	34
Figura 5 - Prensa e matriz utilizadas para conformação dos CPs.....	38
Figura 6 - CPs pós-conformação.....	38
Figura 7 - Forno Utilizado e Disposição dos CPs.	39
Figura 8 - Ensaio de Flexão dos CPs.....	43
Figura 9 - Difração de Raios X (DRX) Argila de Acará.....	44
Figura 10 - Difração de Raios X (DRX) da Lama Vermelha.	46
Figura 11 - Gráfico Curva de Queima dos CPs.....	48
Figura 12 - Análise Granulométrica da Argila.....	49
Figura 13 - Análise Granulométrica da Lama Vermelha.....	50
Figura 14 - CPs da formulação A100 Sinterizados.....	52
Figura 15 - CPs da formulação LA6040 Sinterizados.....	52
Figura 16 - CPs da formulação LA8020 Sinterizados.....	53
Figura 17 - Absorção de Água em função da Temperatura de Sinterização.....	54
Figura 18 - Porosidade Aparente em função da Temperatura de Sinterização.....	55
Figura 19 - Retração Linear em função da Temperatura de Sinterização.....	57
Figura 20 - Massa Especifica Aparente em função da Temperatura de Sinterização.	58
Figura 21 - Tensão de Ruptura em função da Temperatura de Sinterização.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de algumas cerâmicas vermelha	22
Tabela 2 - Capacidade de Mineração de Bauxita (1.000t) no Brasil.	26
Tabela 3 - Capacidade de Produção de Alumina (1.000t) no Brasil.....	27
Tabela 4 - Formulações delimitadas para o estudo.....	37
Tabela 5 - Propriedades das respectivas formulações de acordo com as diferentes temperaturas de queima.	61
Tabela 6 - Propriedades de diferentes tipos de cerâmicas de acordo com as normas e literatura.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#	.....	Peneira
%	.....	Percentual
°C	.....	Graus Celsius
µm	.....	Micrômetro
Å	.....	Angstrom
AA	.....	Absorção de Água
ABCERAM	.....	Consulte, Associação Brasileira de Cerâmica
ABDI	.....	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	.....	Associação Nacional Dos Fabricantes De Cerâmica Para revestimento
ANICER	.....	Associação Nacional Da Indústria Cerâmica
b	.....	Largura dos corpos de prova
cm	.....	Centímetro
DNPM	.....	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	.....	Difração de Raios X
g	.....	Grama
h	.....	Espessura dos corpos de prova
IBRAM	.....	Instituto Brasileiro de Mineração
IPEA	.....	Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicada
Kgf	.....	Quilograma força
KN	.....	Quilo-Newton
L	.....	Distância entre os apoios dos corpos de prova
Lo	.....	Comprimento Inicial
Li	.....	Comprimento Final
MEA	.....	Massa Específica Aparente
Mi	.....	Massa Imersa
min	.....	Minuto
mm	.....	Milímetro
MPa	.....	Mega Pascal
Ms	.....	Massa Seca
Mu	.....	Massa Úmida
P	.....	Força
PA	.....	Porosidade Aparente
RL	.....	Retração Linear
TRF	.....	Tensão de Ruptura a Flexão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. JUSTIFICATIVA	18
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
3.1. Materiais Cerâmicos.....	19
3.1.1. Produção de Materiais Cerâmicos.....	19
3.1.2. Cerâmica vermelha.....	20
3.1.3. Polo Cerâmico no Estado do Pará.....	22
3.2. Produção de Alumina	23
3.2.1. Obtenção de Alumina	24
3.2.1. Beneficiamento e Aspectos da Produção	26
3.3. Rejeitos do Processo, Seus Impactos e Reinserção.....	28
3.3.1. Impactos Ambientais	28
3.3.2. Utilização da Lama Vermelha.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. Pontos de Coleta das Matérias-Primas.....	32
4.2. Metodologias usadas no trabalho.....	32
4.3. Matérias-Primas	35
4.4. Caracterização das Matérias-primas.....	35
4.4.1. Difração de Raios X (DRX).....	35
4.4.2. Análise Granulométrica	35
4.5. Formulações	36
4.6. Conformação.....	37
4.7. Queima dos Corpos de Prova	39
4.7.1. Curva de Queima.....	39
4.8. Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas dos CPs.....	40
4.9. Perda ao Fogo	41
4.10. Retração Linear	41
4.11. Massa Específica Aparente	41
4.12. Absorção de Água (AA)	42
4.13. Porosidade Aparente (PA)	42
4.14. Ensaio Mecânicos dos Corpos de Prova.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1. Difração de Raios X (DRX)	44
5.1.1. Argila de Acará	44

5.1.1.	Lama Vermelha	45
5.2.	Curva de Queima	47
5.3.	Análise Granulométrica	48
5.3.1.	Argila	48
5.3.2.	Lama Vermelha	50
5.4.	Avaliação Macroscópica dos CPs	51
5.5.	Propriedades Cerâmicas.....	53
5.5.1.	Absorção de Água (AA)	54
5.5.2.	Porosidade Aparente (PA).....	55
5.5.3.	Retração Linear (RL)	56
5.5.4.	Massa Específica Aparente (MEA)	57
5.5.5.	Resistência Mecânica.....	59
5.5.6.	Classificação Baseado nas Propriedades	60
6.	CONCLUSÃO	62
7.	SUGESTÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A engenharia de materiais é uma área que busca compreender e explorar as propriedades e comportamentos dos materiais, visando o desenvolvimento de novos ou o aprimoramento dos já existentes. Dentre os materiais estudados, destacam-se os materiais cerâmicos, que possuem características únicas e apresentam uma ampla gama de aplicações na indústria. Segundo Callister (2020), os materiais cerâmicos são compostos por elementos metálicos e não-metálicos, sendo conhecidos por sua elevada dureza, resistência à corrosão e a alta temperatura, além de apresentarem propriedades dielétricas e óticas.

A produção de materiais cerâmicos tem se mostrado de grande importância para a indústria, devido às suas propriedades. Nesse contexto, a indústria cerâmica tem explorado diferentes técnicas de fabricação para atender às demandas do mercado. Segundo Kingery et al. (1976), a produção de cerâmicas pode envolver processos distintos, tais como a conformação, secagem, queima e acabamento, possibilitando sua utilização em diversas áreas, tais como construção civil à indústria automobilística e eletrônica.

No contexto regional, destaca-se o potencial industrial paraense na produção de cerâmicas, de tal modo que, observa-se que diferentes polos têm se destacado, utilizando recursos naturais abundantes na região, como argilas e caulim. A indústria cerâmica paraense tem se desenvolvido de forma expressiva, contribuindo para o crescimento econômico e a geração de empregos na região. Além disso, a utilização de materiais locais possibilita a redução dos custos de produção decorrentes do transporte de matéria-prima (SANTOS, 2009).

A alumina, material obtido e amplamente utilizada em diversas indústrias devido às suas propriedades mecânicas e químicas detona uma certa particularidade em relação ao contexto de sua obtenção, sobretudo os processos atrelados e os subprodutos dessa geração. No Estado do Pará, a obtenção de alumina é realizada principalmente por meio do processo Bayer, que consiste em etapas de extração e purificação da bauxita. Segundo Bustamante e Bressiani (2017) e Motta e Marciano (2017) o Estado do Pará possui importantes reservas de bauxita, tornando-se um dos principais produtores de alumina no país. A produção de alumina é de grande relevância tanto no contexto local quanto global, devido à sua aplicação em setores como metalurgia, cerâmica e química.

No entanto, a produção de alumina gera consideráveis volumes de rejeitos, como a lama vermelha, que apresentam desafios ambientais significativos. O adequado gerenciamento desses rejeitos é essencial para minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade da indústria cerâmica.

Nesse sentido, alternativas têm sido investigadas visando a inserção desses rejeitos na produção de outros materiais, tal como pode ser observado em Hildebrando (1998) e Macedo et al. (2008), a reutilização de resíduos industriais em processos cerâmicos pode ser uma estratégia viável e sustentável, contribuindo para a redução do consumo de matérias-primas virgens e a diminuição dos impactos ambientais.

A utilização de rejeito do processo Bayer, como a lama vermelha, na produção de cerâmica vermelha tem despertado interesse, pois além de possibilitar a redução do uso de argilas naturais, pode conferir características especiais aos produtos cerâmicos. Segundo Wang e Liu (2012), a adição de lama vermelha em massas argilosas pode promover alterações nas propriedades físicas e químicas das cerâmicas, resultando em produtos com diferentes efeitos, propriedades, tonalidades e texturas. Essas possibilidades abrem caminho para a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos com base em rejeitos industriais.

Diante desse contexto, o presente trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a inserção de rejeito (lama vermelha) em formulações de argilas provenientes do município de Acará-PA, com o intuito de produzir cerâmica vermelha. A investigação busca compreender os efeitos da adição desse rejeito nas propriedades físicas e cerâmicas dos materiais produzidos. A pesquisa se fundamenta na importância da utilização de materiais locais e na busca por alternativas sustentáveis na produção de materiais cerâmicos.

1.1. Objetivo Geral

Estudar e avaliar a utilização do resíduo do processo Bayer (Lama Vermelha) na formulação de massas argilosas visando a fabricação de cerâmica vermelha.

1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o percentual de rejeito adicionado às formulações cerâmicas que possam garantir propriedades tecnológicas satisfatórias de materiais cerâmicos tradicionais;
- Determinar as propriedades físicas dos produtos sinterizados para verificar se estão dentro das normas técnicas ABNT NBR 15270/2017 e 15310/2005;
- Realizar ensaios mecânicos dos materiais produzidos a fim de se avaliar a qualidade destes;
- Agregar o valor a um material abundantemente disponível e de baixo custo, considerado rejeito, ao transformá-lo em substituto de uma matéria-prima.

2. JUSTIFICATIVA

A utilização de rejeitos industriais na produção de materiais tem despertado interesse crescente devido às preocupações ambientais e à necessidade de reduzir o consumo de matérias-primas virgens. Nesse contexto, a inserção de rejeitos na fabricação de materiais cerâmicos surge como uma alternativa promissora, pois além de mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte desses resíduos, pode agregar valor a um material tido como rejeito.

Diversos estudos têm demonstrado os benefícios da incorporação de rejeitos na produção de materiais cerâmicos. De acordo com Costa et al. (2017) e Wang e Liu (2012), a utilização de resíduos industriais como substitutos parciais de matérias-primas tradicionais pode resultar em produtos com características similares ou até mesmo aprimoradas, tais como maior resistência mecânica, menor porosidade e maior durabilidade. Além disso, a adição de rejeitos pode contribuir para a redução dos custos de produção, já que esses materiais muitas vezes são obtidos a baixo custo ou até mesmo de forma gratuita.

No que se refere especificamente ao rejeito do processo Bayer, como a lama vermelha, a sua inserção na produção de cerâmica vermelha apresenta vantagens significativas, haja vista que estudos mostram que a lama vermelha pode atuar positivamente, melhorando a sinterização das massas argilosas e resultando em produtos cerâmicos com propriedades aprimoradas (XIAOBIN et al., 2015).

A justificativa para o presente estudo de pesquisa reside na importância de explorar e avaliar o potencial do rejeito do processo Bayer, especificamente a lama vermelha, na produção de cerâmica vermelha. O uso desse rejeito pode contribuir para a redução dos impactos ambientais decorrentes de seu descarte inadequado, além de promover a diminuição do consumo de matérias-primas virgens. Além disso, a pesquisa busca agregar valor e viabilidade técnica a um material considerado indesejado, demonstrando sua utilidade na indústria cerâmica.

Portanto, o estudo proposto visa preencher uma lacuna de conhecimento, investigando os efeitos da inserção da lama vermelha em massas argilosas do município de Acará-PA, para produção de cerâmica vermelha. A pesquisa busca compreender as mudanças nas propriedades físicas das cerâmicas resultantes dessa adição, bem como avaliar sua viabilidade técnica.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. Materiais Cerâmicos

3.1.1. Produção de Materiais Cerâmicos

A produção de materiais cerâmicos é um campo de estudo amplo e relevante na engenharia de materiais. Os materiais cerâmicos tradicionais, em particular a cerâmica vermelha, desempenham um papel fundamental na indústria, devido às suas características e aplicações versáteis. Neste contexto, compreender a composição, aplicação e características dos materiais cerâmicos, em especial os materiais cerâmicos estruturais, é essencial para o desenvolvimento de produtos de alta qualidade e desempenho.

A composição dos materiais cerâmicos é uma parte crucial de seu processo, tal como destacam Askeland e Fulay (2008), os materiais cerâmicos são compostos principalmente por elementos não metálicos, como óxidos, carbetos, nitretos e silicatos. A proporção e a combinação desses componentes determinam as propriedades e o desempenho dos materiais cerâmicos. A seleção adequada dos materiais constituintes e a formulação precisa das massas cerâmicas são fundamentais para obter produtos com as propriedades desejadas.

No que diz respeito às aplicações, os materiais cerâmicos têm sido amplamente utilizados em diversas áreas, devido às suas propriedades específicas. Segundo Callister (2020), os materiais cerâmicos estruturais são empregados em diferentes setores, destacando, contudo, a maior parte de sua aplicação na construção civil, devido à sua alta resistência mecânica, rigidez, resistência ao desgaste, estabilidade térmica e facilidade de acesso. Além disso, a cerâmica vermelha, um tipo tradicional de material cerâmico, tem sido aplicada na construção civil desde a fabricação de tijolos a telhas e revestimentos de forma abundante.

As características dos materiais cerâmicos, incluindo sua resistência, dureza, condutividade térmica e elétrica, são determinadas por sua estrutura microscópica e ligação atômica. Shackelford (2008) destaca que a estrutura cristalina dos materiais cerâmicos lhes confere alta resistência e rigidez, mas também os torna frágeis. Essa propriedade pode ser mitigada por meio de técnicas de processamento, como a sinterização, que promove a consolidação das partículas cerâmicas, resultando em

produtos com maior densidade e resistência.

A compreensão desses aspectos relacionados aos materiais cerâmicos tradicionais, com ênfase nos materiais cerâmicos estruturais, é fundamental para o avanço tecnológico e o desenvolvimento de novas aplicações. A investigação das propriedades, desempenho e processamento desses materiais tem sido objeto de estudo e pesquisa em diversas áreas da engenharia de materiais.

3.1.2. Cerâmica vermelha

A indústria de materiais cerâmicos apresenta uma ampla diversidade de produtos, que podem ser classificados em duas categorias principais: cerâmica tradicional e cerâmica avançada. Essas categorias diferem em termos de composição, processamento, propriedades e aplicações, resultando em diferentes níveis de inserção no mercado (CALLISTER, 2020).

A cerâmica tradicional engloba os materiais cerâmicos mais antigos e amplamente utilizados, como tijolos, telhas, blocos de alvenaria e cerâmica branca. Esses materiais são fabricados com matérias-primas abundantes, principalmente argilas, e passam por processos de conformação e queima relativamente simples. A cerâmica tradicional tem sido empregada na indústria da construção civil e em aplicações de utensílios domésticos há séculos, demonstrando sua importância histórica e sua presença significativa no mercado. Estima-se que a cerâmica tradicional ocupe cerca de 80% do mercado de materiais cerâmicos (SHACKELFORD, 2008).

A cerâmica vermelha é um tipo tradicional de material cerâmico amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades. Seu principal constituinte é a argila, que desempenha um papel fundamental na composição e nas propriedades finais desse material (SOUZA SANTOS, 1989). Compreender a composição, aplicação e características da cerâmica vermelha é essencial para aproveitar ao máximo suas vantagens na indústria, além de considerar seus aspectos econômicos.

A fabricação da cerâmica vermelha envolve predominantemente argilas, que consistem em partículas finas provenientes da decomposição de minerais intemperizados. A presença de diferentes tipos de argila influencia significativamente as propriedades do material final (SOUZA SANTOS; SANTOS, 1989). Conforme

mencionado por Askeland e Fulay (2008), as argilas podem variar em termos de composição mineralógica, granulometria, plasticidade e comportamento de queima, o que afeta diretamente características como resistência mecânica, absorção de água, retração linear e cor do material.

A relevância da cerâmica vermelha na indústria também está relacionada a aspectos econômicos. A produção desse tipo de material, baseada na argila, geralmente é mais acessível em termos de custos em comparação com outros materiais de construção. Além disso, a disponibilidade de matérias-primas naturais e a tecnologia de produção estabelecida contribuem para sua viabilidade econômica. Esse fator é enfatizado por Bustamante e Bressiani (2017), ao mencionar que a cerâmica vermelha é uma opção econômica e sustentável para a construção civil, contribuindo para a economia local e a geração de empregos.

Além do mais, as propriedades e requisitos para cerâmicas vermelhas são estabelecidos por normas específicas, como a ABNT NBR 15270/2017 e a ABNT NBR 15310/2005. Essas normas fornecem diretrizes para a classificação e determinação das características das cerâmicas, garantindo a qualidade e o desempenho desses materiais.

A ABNT NBR 15270/2017 define a classificação de blocos cerâmicos em duas categorias principais: vedação (VED) e estrutural (EST). Essas categorias são seguidas por números, como 15, 30, 40, indicando a resistência característica mínima do bloco ou tijolo em kgf/cm^2 . Essa classificação permite identificar a aplicabilidade e resistência do material de acordo com as necessidades estruturais específicas, contudo, no geral, acerca da absorção de água, os valores se limitam entre 8 e 25%, variando a resistência à compressão em cada tipo.

No caso das telhas cerâmicas, existem diferentes tipos, como as planas de encaixe, compostas de encaixe, simples de sobreposição e planas de sobreposição. Cada tipo possui requisitos específicos em termos de resistência à ruptura. Por exemplo, para telhas planas de encaixe, a norma estabelece um limite mínimo de resistência à ruptura de 100 kgf/cm^2 .

Além disso, A norma ABNT NBR 15310 destaca que todas as telhas cerâmicas, independentemente do tipo, têm um limite máximo de absorção de água definido em 20%. Essa característica é essencial para garantir a durabilidade e a resistência das telhas em diferentes condições climáticas. Na Tabela 1, podemos identificar alguns

valores estabelecidos em norma para esses materiais.

Tabela 1 - Propriedades de algumas cerâmicas vermelha

Categoria	Tipo de Peça	Absorção de Água	Resistência à Flexão Mínima (kgf/cm²)
Vedação (VED)	Blocos ou tijolos de vedação com furos horizontais (VED15)	8-25%	15
	Blocos para alvenaria com vazados verticais (VED30)	8-21%	30
	Tijolo maciço ou perfurado para vedação (VED40)	8-25%	40
Estrutural (EST)	Blocos de alvenaria vazados vertical (EST40, 60, 80, 100, 120, 140)	8-21%	40, 60, 80, 100, 120, 140
Telhas	Telhas planas de encaixe	até 20%	100
	Telhas compostas de encaixe	até 20%	130
	Telhas simples de sobreposição	até 20%	100
	Telhas planas de sobreposição	até 20%	100

Fonte: Adaptado de ABNT, 2017.

3.1.3. Polo Cerâmico no Estado do Pará

A produção de materiais cerâmicos no Estado do Pará possui uma relevância econômica significativa, sendo abastecida por diversas regiões que se destacam na cadeia produtiva. São Miguel do Guamá, Santa Izabel do Pará, Cametá, Abaetetuba, Santarém, Bragança e outras localidades desempenham um papel importante nesse setor, fornecendo matérias-primas e impulsionando a produção de cerâmica vermelha, que é amplamente utilizada na construção civil e em outras aplicações.

Vale ressaltar, que a economia baseada na produção de cerâmica no Estado do Pará é diversa e é expressa pela abundância de empresas do setor, que, como mencionado anteriormente, são subdivididas em microrregiões, ao qual, dar-se ênfase as regiões de São Miguel do Guamá, Abaetetuba, São Sebastião da Boa Vista, Santarém, Bragança Marabá e regiões próximas ao centro metropolitano de Belém, tais como, Castanhal, Santa Izabel, Benevides e o município de Acará. Contudo, vale ressaltar que nesses dados é identificado um alto grau de informalidade, no que diz respeito a empresas, produção e empregos diretos, exemplificando uma capacidade produtiva de aproximadamente 24.500.000 milhões de peças/mês (BETINI, 2007;

SANTOS, 2009).

No entanto, de acordo com o relatório "Linha de Base - APL Cerâmica Vermelha" do Governo Federal, a produção de cerâmica vermelha no Estado do Pará atingiu cerca de 92.000 toneladas/mês ou o equivalente a 46.000.000 peças/mês em 2017, com aproximadamente 570 empresas em todo o Estado, representando aproximadamente 1,32% da produção nacional desse tipo de material cerâmico, sendo o 15º Estado com maior produção. Esses números demonstram a expressividade da produção paraense no contexto regional e nacional, com uma crescente na capacidade de aproximadamente 200% (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2017; HENRIQUES JR.; RODRIGUES, 2017)

A cadeia produtiva da cerâmica vermelha no Estado envolve diversas etapas, desde a extração das matérias-primas, como argilas adequadas para a produção cerâmica, até a fabricação dos produtos finais, como tijolos, telhas e blocos cerâmicos. Essa cadeia produtiva gera empregos e movimentação a economia local. Estima-se que o setor da cerâmica vermelha no Pará seja responsável pelo sustento direto de cerca de 20.000 (vinte mil) pessoas, além de gerar oportunidades de trabalho indiretas em atividades relacionadas, como transporte, comércio e serviços (HENRIQUES JR.; RODRIGUES, 2017).

É importante destacar a relação entre a produção de materiais cerâmicos nas regiões próximas ao município de Acará-PA e as áreas circunvizinhas de Belém com o Polo de produção de alumina em Barcarena. A proximidade geográfica entre essas localidades permite uma maior disponibilidade de insumos e o aproveitamento de subprodutos da indústria de alumina, como a lama vermelha, na produção de cerâmica vermelha. Essa integração entre os setores de produção de alumina e cerâmica contribui para a redução de resíduos e para o aproveitamento de recursos locais, além de fortalecer a economia regional.

Em suma, a produção de materiais cerâmicos no Estado do Pará, especialmente a cerâmica vermelha, desempenha um papel relevante na economia, beneficiando diretamente um número significativo de pessoas e gerando impactos positivos na cadeia produtiva local. A relação com o Polo de produção de alumina em Barcarena proporciona oportunidades de integração e aproveitamento de subprodutos, como a lama vermelha, ampliando a sustentabilidade na região.

3.2. Produção de Alumina

3.2.1. Obtenção de Alumina

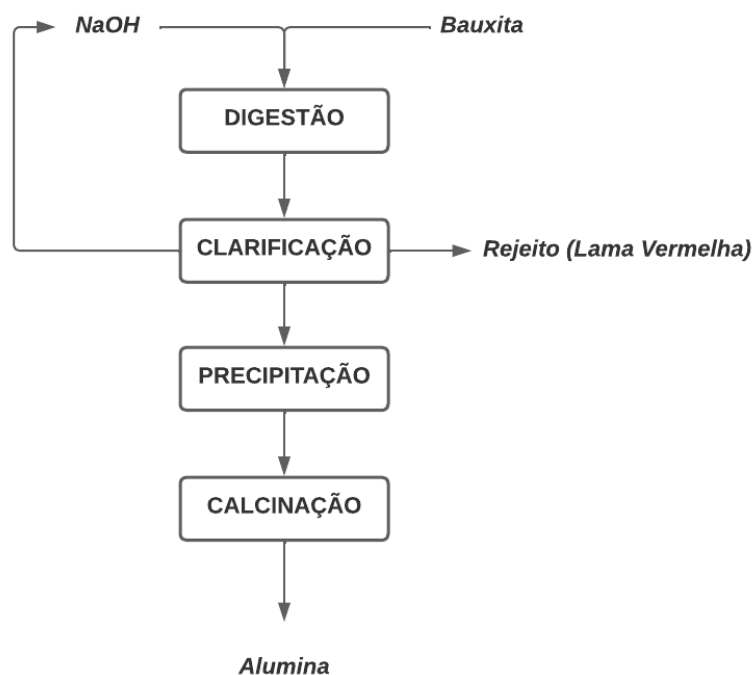
O processo Bayer, utilizado na obtenção de alumina a partir da bauxita, envolve diferentes etapas e componentes que desempenham papéis essenciais na separação e purificação da alumina. Entre os principais componentes desse processo, destacam-se a bauxita, a soda cáustica (NaOH) e a água.

A bauxita é a matéria-prima inicial e contém óxido de alumínio (Al_2O_3) combinado com impurezas, como sílica (SiO_2), óxidos de ferro (Fe_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2) e outros elementos. A qualidade da bauxita influencia diretamente a eficiência e o rendimento do processo, pois teores mais altos de óxido de alumínio resultam em uma maior produção de alumina (SOUZA SANTOS, 1989)

A soda cáustica, por sua vez, desempenha um papel crucial na dissolução da bauxita. Ela reage com a alumina presente na bauxita, formando hidróxido de alumínio solúvel em água. A concentração e a temperatura da soda cáustica são controladas para otimizar a dissolução da alumina e minimizar a dissolução de impurezas indesejadas (XIAOBIN et al., 2015).

No processo Bayer, são gerados diversos subprodutos e rejeitos que requerem atenção especial devido aos seus impactos ambientais. O principal rejeito é a chamada "lama vermelha" ou "resíduo de bauxita", que é composto principalmente por óxidos de ferro, sílica não dissolvida, titânio e outros elementos presentes na bauxita. Essa lama é alcalina e pode conter substâncias tóxicas, o que a torna um desafio ambiental significativo (HILDEBRANDO, 1998). A Figura 1 demonstra a parte pertinente ao processo Bayer que resulta na formação da lama vermelha.

Figura 1 - Fluxograma do Processo Bayer e Geração da Lama Vermelha



Fonte: Adaptado de Habashi (2005)

A disposição adequada e o gerenciamento dos resíduos da lama vermelha são essenciais para minimizar os impactos ambientais negativos. Diversas abordagens têm sido estudadas para aproveitar ou mitigar os rejeitos da lama vermelha, como seu uso na produção de materiais de construção, na recuperação de metais e na neutralização de resíduos ácidos (MACÊDO et al., 2011).

O desenvolvimento de tecnologias e práticas mais sustentáveis tem sido uma preocupação constante na indústria de obtenção de alumina, visando minimizar os impactos ambientais e maximizar a recuperação de recursos a partir dos subprodutos e rejeitos gerados. Vide os trabalhos de Hildebrando, (1998), Costa (2014), Macêdo et al. (2011) e Magalhães (2012).

As principais usinas de beneficiamento de bauxita, tanto em âmbito microrregional quanto macrorregional, adotam o processo Bayer devido à sua eficiência e viabilidade técnica. Através desse processo, é possível obter alumina de alta qualidade, com baixos teores de impurezas, atendendo às exigências da indústria.

No entanto, é importante destacar que existem iniciativas e novas tecnologias visando aprimorar a obtenção e produção de alumina. Pesquisas têm sido desenvolvidas para melhorar a eficiência energética do processo Bayer, reduzir a geração de resíduos e buscar alternativas mais sustentáveis. Além disso, há esforços

para o desenvolvimento de processos de obtenção de alumina a partir de outras fontes, como argilas ricas em alumina e resíduos industriais (CARDONA; KORILI; GIL, 2021)

Apesar das possibilidades de inovação, o processo Bayer continua sendo amplamente utilizado devido à sua comprovada eficácia e domínio tecnológico. Ele possui um papel crucial na produção de alumina em larga escala, suprimindo a demanda da indústria global. Através desse processo, a obtenção de alumina é realizada de forma eficiente e confiável, possibilitando a fabricação de uma ampla gama de materiais que impulsionam diversos setores econômicos.

3.2.1. Beneficiamento e Aspectos da Produção

A produção e beneficiamento de alumina é um setor de extrema importância na indústria global, nacional e regional, especialmente no Estado do Pará. Diversos polos industriais estão envolvidos nessa atividade, sendo que a Hydro Alunorte se destaca como uma das principais empresas do ramo.

Em escala mundial, a produção de alumina tem apresentado um crescimento significativo ao longo dos anos. Segundo dados da United States Geological Survey (USGS), a produção global de alumina em 2021 alcançou cerca de 126 milhões de toneladas, representando um aumento em relação aos anos anteriores (USGS, [s.d.]

No contexto nacional, o Brasil possui uma posição de destaque na produção de alumina a partir do beneficiamento de bauxita. O país possui grandes reservas de bauxita, tal qual observa-se na Tabela 2, em que se destaca a capacidade produtiva das principais empresas do seguimento no Brasil, identificados no ano de 2020.

Tabela 2 - Capacidade de Mineração de Bauxita (1.000t) no Brasil.

Empresa	Produção	(%)
Alcoa Alumínio S/A – MG; PA	7.421,6	22,55
Norsk Hydro Brasil Ltda –S/A - PA	8.640,2	26,26
CBA - Cia. Brasileira de Alumínio – MG; GO	1.749,1	5,31
MRN – Mineração Rio Norte S/A - PA	12.289,8	37,35
Outros	2.797,1	8,53
TOTAL	32.897,8	100

Fonte: Associação Brasileira do Alumínio - ABAL, 2021.

O Estado do Pará se destaca nesse cenário, abrigando importantes polos industriais de produção e beneficiamento da bauxita e produção de alumina. A região de Barcarena, onde está localizada a Hydro Alunorte, é um dos principais centros de produção do país. Tal como pode se observar na Tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade de Produção de Alumina (1.000t) no Brasil.

Empresa	Produção	(%)
Alcan Alumina Ltda - MA	385,3	3,78
Alcoa Alumínio S/A – MG; MA	2.192,9	21,53
Norsk Hydro Brasil Ltda – S/A - PA	5.466,5	53,67
CBA - Cia. Brasileira de Alumínio – MG; GO	651,6	6,39
South 32 Minerals S/A - MA	1.321,8	12,97
Outros	101,4	1,0
TOTAL	10.184,7	100

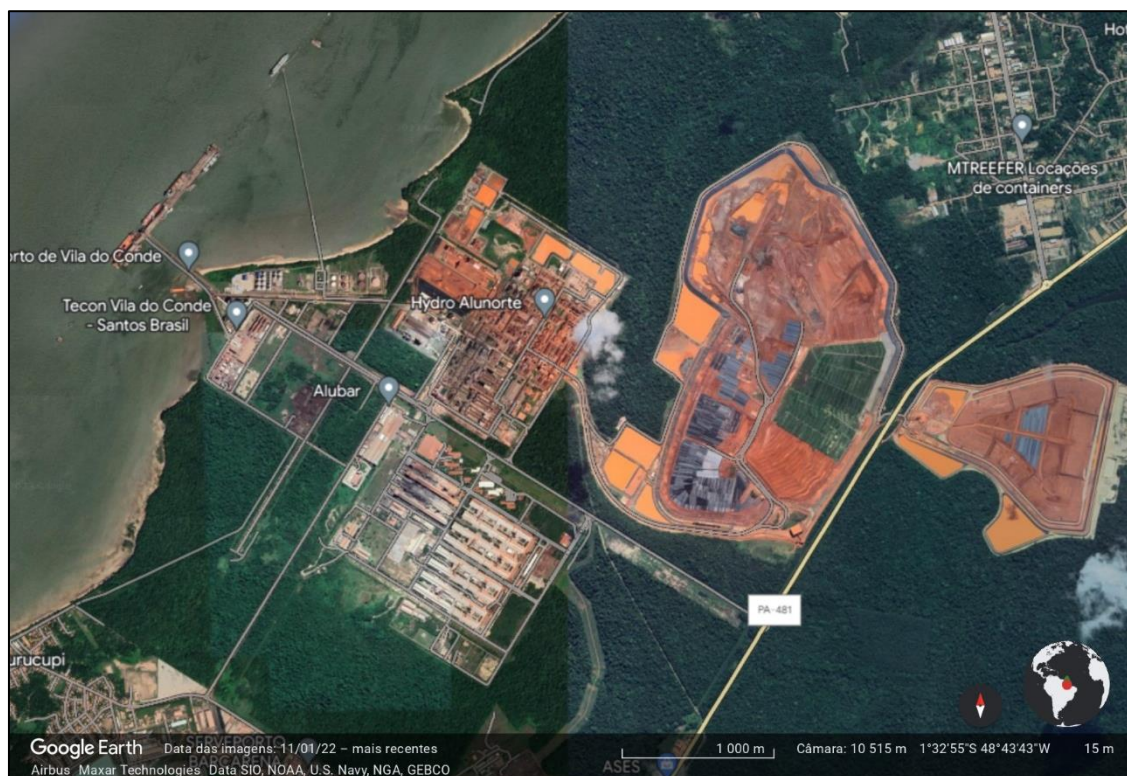
Fonte: Associação Brasileira do Alumínio - ABAL, 2021.

A Hydro Alunorte é uma empresa de grande relevância no setor de produção de alumina. Ela é responsável pela extração, beneficiamento e refino da bauxita, produzindo alumina de alta qualidade. A empresa possui uma ampla infraestrutura e capacidade produtiva significativa. Dados estatísticos apontam que atualmente, a empresa possui uma capacidade instalada de produção de aproximadamente 6,3 milhões de toneladas de alumina por ano (“Indústria brasileira é referência em guia internacional de mineração sustentável de bauxita - Revista Alumínio”, [s.d.]

O que implica também em um grande volume de subprodutos e rejeitos, inerentes à produção, que, suscita diversos questionamentos acerca dos seus impactos, sejam estes, ambientais, sociais ou econômicos. No entanto, com base na perspectiva de fomento à indústria cerâmica do estado do Pará, baseado no pressuposto de reaproveitamento subprodutos, pode ser um alternativa, dado posicionamento geográfico e proximidade com as principais microrregiões produtoras de cerâmica do Estado, identificados na Tabela 2 anteriormente e que podem ser

observados também na Figura 2.

Figura 2 - Mapa da região em que se localiza a empresa Hydro Alunorte.



Fonte: Google Earth, 2023.

3.3. Rejeitos do Processo, Seus Impactos e Reinscrição

3.3.1. Impactos Ambientais

A produção e beneficiamento da alumina são atividades industriais que geram uma quantidade significativa de rejeitos, os quais apresentam desafios ambientais e socioeconômicos. O manejo adequado desses rejeitos é essencial para minimizar os impactos negativos e promover a sustentabilidade desses processos.

Os principais rejeitos gerados na produção e beneficiamento da alumina são a lama vermelha e a poeira de bauxita. A lama vermelha sendo um subproduto rico em óxidos de ferro, sílica, alumínio e outros compostos, destacado por Mercury et al. (2010) e a poeira de bauxita é composta por partículas finas de bauxita e outros minerais presentes na matéria-prima. Ambos os rejeitos possuem características físicas e químicas que demandam uma gestão adequada para evitar contaminação

ambiental e riscos à saúde humana.

A disposição inadequada da lama vermelha pode resultar em impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água. No entanto, diversos estudos têm buscado alternativas para o reaproveitamento desse resíduo, visando mitigar os impactos negativos. Pesquisas indicam que a lama vermelha pode ser utilizada na produção de materiais de construção, como tijolos e cerâmicas (BETINI, 2007; VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004). Essa abordagem contribui para a redução da quantidade de rejeitos destinados a aterros e promove a utilização de recursos disponíveis no processo produtivo.

A gestão adequada dos rejeitos da produção e beneficiamento da alumina é fundamental para a minimização dos impactos ambientais e a promoção da sustentabilidade nesses processos industriais. O desenvolvimento de tecnologias e abordagens inovadoras para o reaproveitamento e a reciclagem desses rejeitos é essencial para a redução do consumo de matérias-primas, a mitigação dos impactos ambientais e a valorização dos subprodutos gerados (PEIXOTO, 2012).

Além disso, técnicas avançadas de tratamento de rejeitos têm sido desenvolvidas, como a filtragem e a separação de componentes valiosos da lama vermelha, visando reduzir seu impacto ambiental e melhorar sua valorização (MAGALHÃES, 2012). A reciclagem e a reutilização de resíduos também têm sido estudadas como formas de minimizar os impactos ambientais associados à geração de rejeitos.

Em resumo, os rejeitos da produção e beneficiamento da alumina representam um desafio ambiental significativo. A adoção de práticas de manejo adequado, o desenvolvimento de tecnologias de tratamento e a busca por alternativas de reaproveitamento são fundamentais para minimizar os impactos e promover a sustentabilidade desses processos.

3.3.2. Utilização da Lama Vermelha

A lama vermelha possui composição complexa, contendo óxidos metálicos, sílica, alumina e outros componentes. Devido à sua alta alcalinidade e teor de óxidos metálicos, a lama vermelha apresenta potencial para ser utilizado em diferentes possibilidades de aplicação, contribuindo para a redução do impacto ambiental e a

valorização econômica desse rejeito.

Uma das aplicações promissoras da lama vermelha é na indústria de materiais de construção. Estudos têm demonstrado que esse rejeito pode ser incorporado em matrizes cimentícias, como substituto parcial do cimento Portland, devido à sua atividade pozolânica (CHOE; KANG; KANG, 2020). A adição de lama vermelha pode melhorar as propriedades das argamassas e concretos, como resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade, além de contribuir para a redução da quantidade de cimento utilizado.

Outra possibilidade de aplicação da lama vermelha é na produção de cerâmicas. O rejeito pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha, substituindo parcialmente a argila (HILDEBRANDO, 1998). Estudos têm mostrado que a incorporação de lama vermelha em massas cerâmicas, em determinados casos, pode melhorar propriedades como a resistência mecânica, a porosidade e a estabilidade dimensional dos produtos cerâmicos (WANG; LIU, 2012). Além disso, a utilização desse rejeito na produção de cerâmica contribui para a redução do consumo de argila e a valorização econômica do resíduo.

No entanto, é importante ressaltar que a utilização da lama vermelha na cerâmica vermelha requer cuidados em relação à sua composição química e características físicas. Estudos têm explorado a influência dos teores e proporções de lama vermelha na formulação das massas cerâmicas, bem como a necessidade de ajustes nas etapas de processamento e queima para garantir a obtenção de produtos cerâmicos com qualidade adequada (COSTA, 2014; MERCURY et al., 2010).

A adoção da lama vermelha na cerâmica vermelha não apenas contribui para a redução do impacto ambiental e a valorização de um resíduo industrial, mas também oferece vantagens econômicas. A substituição parcial de argila pela lama vermelha pode resultar em uma redução nos custos de matéria-prima, além de proporcionar uma alternativa viável em regiões onde a disponibilidade de argila é limitada ou de custo elevado.

Além das aplicações na indústria de construção civil e cerâmica, a lama vermelha também pode ser explorada em outras áreas, como na remediação de solos contaminados e na recuperação de metais. Estudos têm investigado o potencial da lama vermelha na remoção de poluentes presentes em solos contaminados, devido às suas propriedades adsorventes e capacidade de retenção de metais pesados

(WANG; ANG; TADÉ, 2008).

Além disso, processos de extração seletiva de metais presentes na lama vermelha têm sido desenvolvidos visando a recuperação de recursos valiosos, tal como a recuperação de compostos de titânio (MAGALHÃES, 2012).

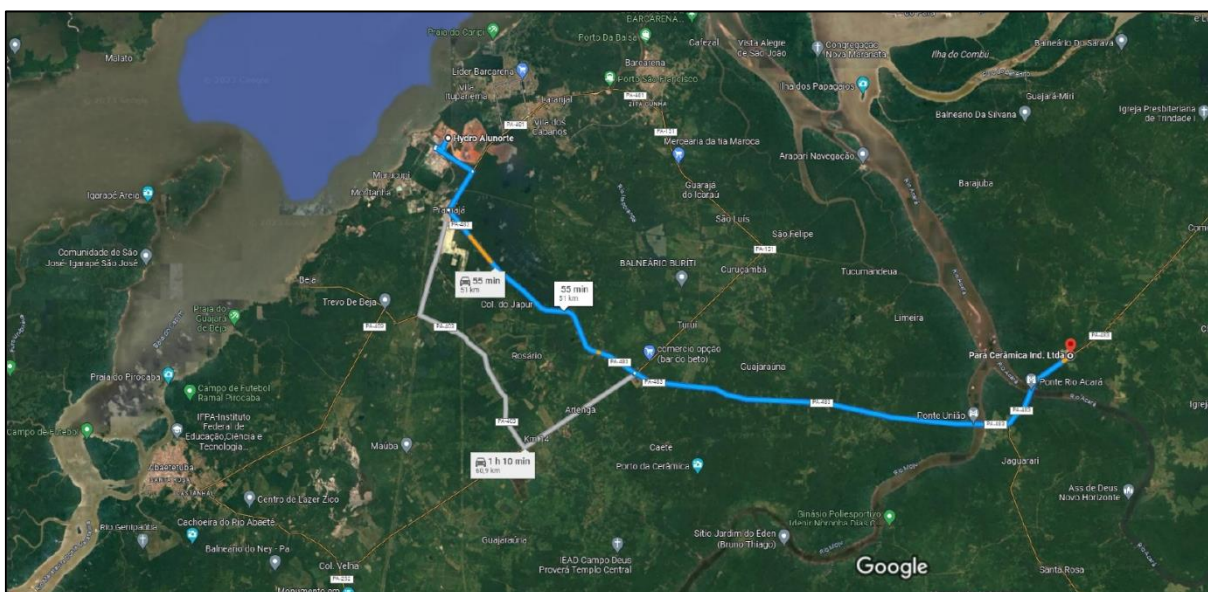
A utilização da lama vermelha em diferentes possibilidades de aplicação não apenas reduz o impacto ambiental associado ao descarte desse rejeito, mas também agrega valor econômico ao transformá-lo em um recurso aproveitável. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de estudos contínuos para avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessas aplicações, levando em consideração a composição específica da lama vermelha e os requisitos técnicos dos produtos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Pontos de Coleta das Matérias-Primas

As matérias-primas utilizadas neste estudo foram a argila, proveniente do município de Acará-PA, e o rejeito do processo Bayer, conhecido como Lama Vermelha, cedido por uma indústria de obtenção da alumina, localizada em Barcarena-PA. A Figura 3 destaca a distância entre os dois pontos de coleta das matérias-primas, aproximadamente 51 km, ponto de partida para análise inicial dos parâmetros logísticos para a viabilidade de operação e obtenção do material em escala de produção.

Figura 3 - Mapa da região entre os pontos de coleta das matérias-primas.



Fonte: Google Maps, 2023.

4.2. Metodologias usadas no trabalho

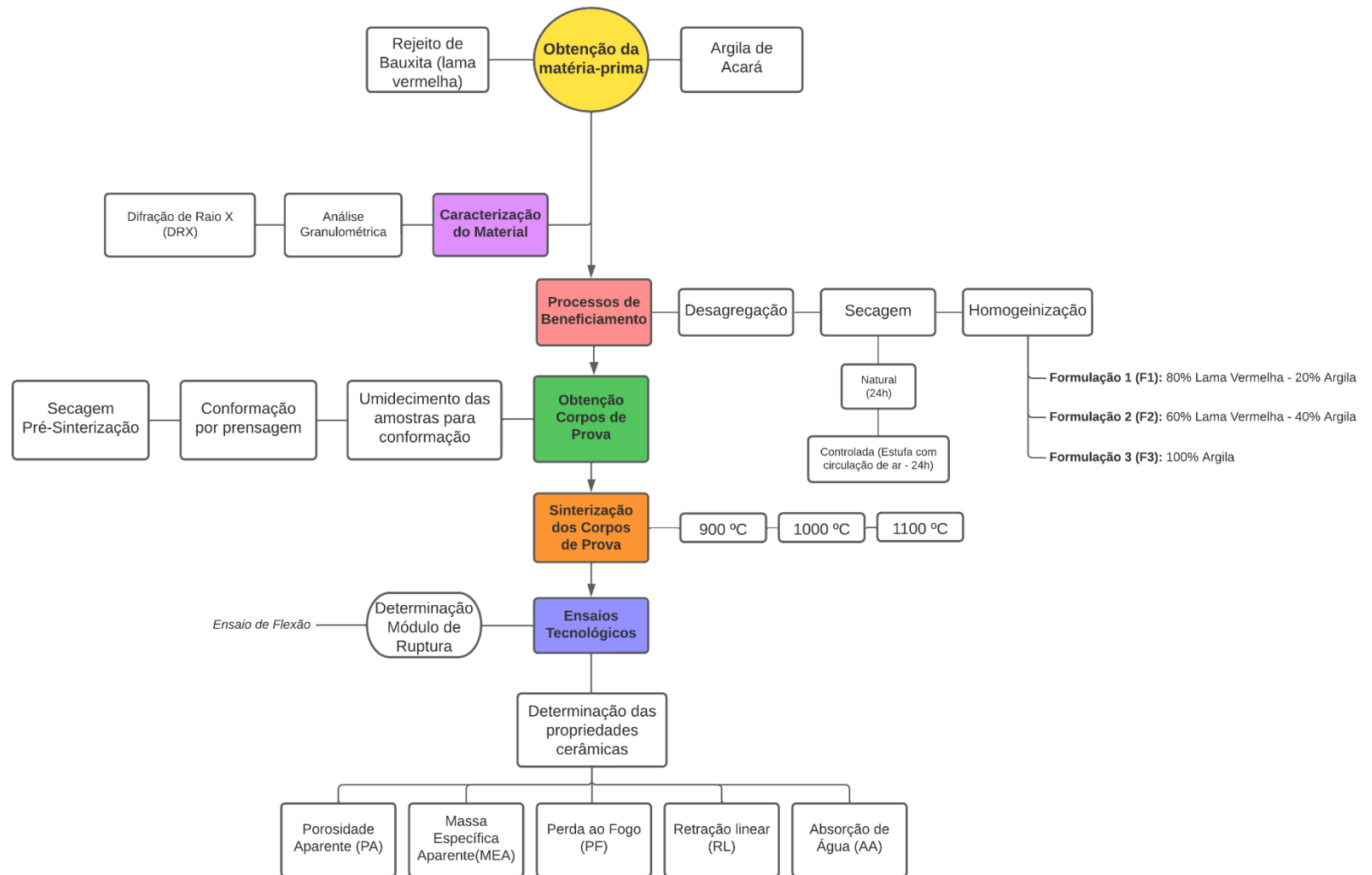
Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido seguindo a metodologia proposta por Hildebrando (1998), com adaptações para atender aos objetivos específicos do estudo. A metodologia utilizada tem como objetivo principal identificar como a variação dos parâmetros de processamento do material pode impactar a redução do consumo

de matéria-prima e dos custos do processo.

Além disso, entende-se que a redução dos custos do processo é um objetivo relevante para as indústrias, uma vez que a eficiência e a competitividade estão intrinsecamente ligadas à capacidade de produzir com custos reduzidos. Ademais, a análise e o controle dos custos de produção são fundamentais para a tomada de decisões estratégicas e a maximização da produção e lucratividade das empresas.

Na Figura 4, apresentada a seguir, é expresso um diagrama do processo utilizado neste estudo.

Figura 4 - Fluxograma do processo de obtenção, processamento e análise dos materiais do estudo.



Fonte: De própria autoria, 2023.

4.3. Matérias-Primas

A argila foi submetida a um processo prévio de secagem natural, seguido por uma secagem controlada a 105° C por 24 horas.

Em seguida, foi realizada a britagem do material, sua desagregação em moinho de bolas e o peneiramento utilizando uma malha de abertura #100 para obter a faixa granulométrica desejada. Já a lama vermelha passou por um processo de secagem controlada a 105° C por 24 horas, seguida pela sua desagregação em moinho e posterior peneiramento utilizando a mesma malha de abertura #100.

4.4. Caracterização das Matérias-primas

4.4.1. Difração de Raios X (DRX)

No presente estudo, a caracterização das amostras de argila e de lama vermelha foi realizada por meio de difração de Raios X (DRX). O DRX é uma técnica analítica amplamente utilizada na identificação e quantificação de fases cristalinas presentes nos materiais.

As análises por DRX foram realizadas no Difratorômetro de Raios X (DXR) modelo Empyrean da PANalytical. O equipamento utilizou tubos de Raios X cerâmico com anodo de Co ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), foco fino longo e filtro $K\beta$ de Fe. O detector utilizado foi o PIXCEL3D-Medpix3 1x1. O modo de operação utilizado foi o scanning, com voltagem de 40 kV e corrente de 35 mA. Para otimizar a qualidade dos resultados, foram aplicadas configurações específicas, como uma fenda divergente de 1/4°, anti-espalhamento de 1/2° e máscara de 10 mm.

As análises por DRX foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) Setor Raios X e Setor de Análises do Instituto de Geociências da UFPA. Esse laboratório conta com infraestrutura e equipamentos adequados para a realização de análises por DRX, garantindo a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos.

4.4.2. Análise Granulométrica

No presente estudo, a avaliação granulométrica foi realizada para as matérias-

primas por meio da distribuição do percentual de massa retida em diferentes peneiras da série Tyler.

Foram utilizadas peneiras da série Tyler, com aberturas de malha especificadas em microns. As peneiras utilizadas foram: #14 (1180 μm), #28 (600 μm), #35 (425 μm), #65 (212 μm), #80 (180 μm), #100 (150 μm), #150 (106 μm) e #200 (75 μm). Essas peneiras representam uma faixa de tamanhos de partículas que são retidas em cada uma delas.

A análise granulométrica foi realizada utilizando um agitador de peneiras da marca Produtest. Esse equipamento permite a agitação das peneiras de forma controlada, de modo a promover a separação das partículas de acordo com seu tamanho. Cada matéria-prima passou por um tempo de agitação de 15 minutos, garantindo a efetiva separação das partículas e obtenção dos resultados granulométricos. Ambas as análises foram realizadas em triplicata.

4.5. Formulações

Neste trabalho, foram utilizadas três formulações distintas para a produção do material em estudo. Cada formulação possui proporções diferentes de lama vermelha e argila, sendo que a primeira formulação (F1), também identificada como LA8020, consiste em 80% de lama vermelha e 20% de Argila, a segunda formulação (F2), similarmente à anterior, identificada como LA6040 contém 60% de lama vermelha e 40% de argila, e a terceira formulação consiste em 100% de Argila, que serve como parâmetro de comparação para as demais formulações, doravante identificada como A100.

As formulações utilizadas no processo experimental são essenciais para avaliar o impacto da variação da proporção de lama vermelha e argila nas propriedades e características do material final. A escolha dessas proporções foi baseada em estudos prévios e nas características desejadas para o material em estudo.

A Tabela 4 apresenta de forma resumida as formulações utilizadas, especificando as proporções de lama vermelha e argila em cada formulação.

Tabela 4 - Formulações delimitadas para o estudo.

Formulação	Lama Vermelha (%)	Argila (%)
F1 - LA8020	80	20
F2 - LA6040	60	40
F3 - A100	-	100

Fonte: De própria autoria, 2023.

No presente estudo, o processo de beneficiamento e desagregação das matérias-primas foi conduzido utilizando um moinho de bolas, em condições de operação a seco, pelo período de 15 minutos. Essa etapa é de extrema importância para promover a redução do tamanho das partículas e melhorar a homogeneização das matérias-primas, visando obter uma distribuição uniforme dos componentes e propriedades desejadas no material final.

O tempo de 15 minutos utilizado neste estudo para o processo de beneficiamento e homogeneização em moinho de bolas foi adotado com base em trabalhos anteriores de referência, como o estudo de Barata (2007), que demonstrou que esse tempo é adequado para promover a redução de tamanho desejada e obter uma boa homogeneização das matérias-primas.

4.6. Conformação

A etapa de conformação dos corpos de prova foi realizada por meio de prensagem uniaxial, utilizando uma prensa hidráulica automática. Antes da conformação, o material foi umedecido com água, alcançando um teor de umidade em torno de 9%, sendo este procedimento essencial para conferir certa plasticidade ao material e facilitar sua moldagem.

Foi utilizado uma matriz de aço, com dimensões equivalentes à 100 x 50 x 10 mm, além da prensa hidráulica motorizada Nowak, Figura 5. Durante a prensagem, foi aplicada uma carga de 300 kgf/cm² (15 Ton) sobre o material.

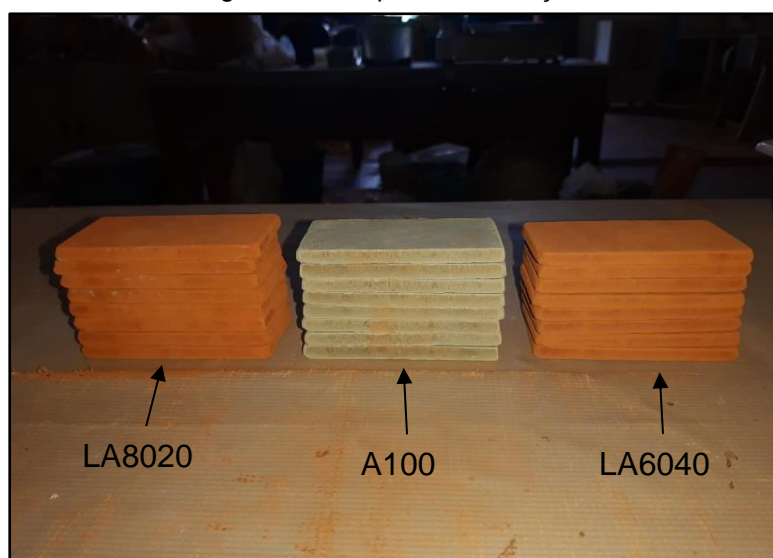
Figura 5 - Prensa e matriz utilizadas para conformação dos CPs.



Fonte: De própria autoria, 2023.

No total, foram confeccionados respectivamente oito corpos de prova para cada formulação e patamares de queima adotados, totalizando 72 corpos de prova. Esses corpos de prova foram identificados de acordo com a formulação utilizada, para que posteriormente fosse possível a análise em face das diferentes composições e condições de queima, condição e aspectos estes demonstrados na Figura 6.

Figura 6 - CPs pós-conformação.



Fonte: De própria autoria, 2023.

4.7. Queima dos Corpos de Prova

A etapa de queima dos corpos de prova é fundamental para conferir resistência e estabilidade às peças cerâmicas. Antes da queima, os corpos de prova passaram por um processo de secagem controlada, com duração de 24 horas. Essa etapa é crucial para remover a umidade residual e evitar possíveis defeitos, como trincas e deformações, durante a queima.

A queima dos corpos de prova foi realizada em fornos elétricos Linn Elektrotherm, equipados com um controlador universal Novus N1200. A programação do controlador permitiu a realização da queima em diferentes patamares de temperatura: 900, 1000 e 1100 °C. A taxa de aquecimento utilizada foi de aproximadamente 5 °C por minuto. Essa taxa de aquecimento controlada é importante para evitar tensões térmicas excessivas nas peças e garantir uma queima uniforme. Na Figura 7 pode-se observar o forno utilizado e a disposição dos CPs no interior do forno.

Figura 7 - Forno Utilizado e Disposição dos CPs.



Fonte: De própria autoria, 2023.

4.7.1. Curva de Queima

A partir da programação no controlador do forno e a determinação da taxa de aquecimento foi possível também plotar a curva de queima, ilustrando a variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de queima. Essa curva permite visualizar o perfil de temperatura adotado e acompanhar a evolução da queima, desde a temperatura inicial até a temperatura final desejada. Para este processo foi avaliada a temperatura a cada 15 minutos até que fosse atingido o patamar de queima, após isto a cada 30 min até o fim das 2h adotadas e posteriormente após o período 24h do início do processo.

O patamar de queima foi de 2h para todas as temperaturas utilizadas, que seguiram em resfriamento natural, levando em consideração os objetivos pré-estabelecidos de redução do consumo de energia com base na alteração dos parâmetros de sinterização.

4.8. Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas dos CPs

A determinação das propriedades tecnológicas do material sinterizado é de extrema importância para avaliar a qualidade e o desempenho das peças cerâmicas. Inicialmente, foram realizadas medidas de massa dos corpos de prova, antes e após a queima. Essas medidas permitem calcular o percentual de perda ao fogo, que é uma indicação da quantidade de massa volatilizada durante a queima.

Além disso, foi realizada a medição da Retração Linear de Sinterização (RL), que consiste na diferença dimensional entre o corpo de prova antes e após a queima. Essa medida é relevante para avaliar a contração ocorrida durante o processo de sinterização e é um indicativo da densificação das peças cerâmicas. (SOUZA SANTOS; SANTOS, 1989)

Os ensaios utilizados para determinar as propriedades tecnológicas foram baseados na norma ABNT NBR 15270/2017. Previamente, é avaliado a massa seca do material e posteriormente o teste de imersão é empregado, o qual consiste na submersão dos corpos de prova em água por 24 horas, seguido pela avaliação da massa úmida e massa do material imerso. Foi utilizado uma balança de precisão marca Marte Científica, modelo AD3300.

A partir dessas medidas, foram determinados parâmetros como a Absorção de

Água (AA), a Porosidade Aparente (PA) e a Massa Específica Aparente (MEA). Esses parâmetros são indicadores importantes da porosidade e da capacidade de absorção de água das peças cerâmicas, conforme detalhado por (SOUZA SANTOS; SANTOS, 1989).

Por fim, para avaliar a resistência do material sinterizado, foi realizado o Ensaio de Flexão. Esse ensaio consiste em submeter os corpos de prova a uma carga de flexão até a ruptura, permitindo a determinação de parâmetros como a resistência à flexão e o módulo de ruptura. Esses parâmetros são relevantes para avaliar a capacidade do material em suportar cargas e sua resistência mecânica.

4.9. Perda ao Fogo

A Perda ao Fogo observada no material, foi analisada a partir da Equação 1:

$$PF = \frac{M_s^* - M_s}{M_s^*} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Em que:

M_s^* = Massa CP seco anterior à queima (g);

M_s = Massa CP seco após à queima (g);

4.10. Retração Linear

A Retração Linear de Sinterização observada no material foi analisada a partir da Equação 2:

$$RL = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Em que:

L_0 = Comprimento do CP inicial (mm);

L_1 = Comprimento do CP após a queima (mm);

4.11. Massa Específica Aparente

A Massa Específica Aparente observada no material foi analisada a partir da

Equação 3:

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} (g/cm^3) \quad (3)$$

Em que:

M_u = Massa CP úmido após a queima (g);

M_i = Massa CP imerso após a queima (g);

4.12. Absorção de Água (AA)

A Absorção de Água observada no material foi analisada a partir da Equação 4:

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 (\%) \quad (4)$$

4.13. Porosidade Aparente (PA)

A Porosidade Aparente observada no material foi analisada a partir da Equação 5:

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 (\%) \quad (5)$$

4.14. Ensaio Mecânicos dos Corpos de Prova

O objetivo principal desse ensaio é identificar a Tensão de Ruptura a Flexão (TRF), que representa a carga máxima suportada pelo material antes de ocorrer a fratura. O procedimento do ensaio foi realizado de acordo com as normas ABNT NBR 15270/2017 e ASTM C674-13/2018, que fornecem diretrizes e critérios para a realização do ensaio.

Para a realização do ensaio de flexão, foi utilizada uma máquina de Ensaio Universais da marca InterMetric, Linha iM, cedida pelo laboratório de Caracterização

de Materiais (LCMAT) da Faculdade de Engenharia de Materiais da UFPA.

O ensaio foi realizado no modo de ensaio de 3 pontos, que é uma configuração comum para esse tipo de ensaio. Nesse modo, o corpo de prova é apoiado em dois pontos e a carga é aplicada em um terceiro ponto localizado no centro da distância entre os apoios. A distância total entre os apoios foi de 80 mm, conforme definido nas normas mencionadas. A Figura 8 ilustra o ensaio.

Figura 8 - Ensaio de Flexão dos CPs.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A Tensão de Ruptura à Flexão observada no material foi analisada a partir da Equação 6:

$$TRF = \frac{3P \times L}{2b \times h^2} \left(\frac{Kgf}{cm^2} \right) \quad (6)$$

Em que:

P = Força exercida (Kgf);

L = Distância entre os pontos de apoio (cm);

b = Largura do CP (cm);

h = Espessura do CP (cm);

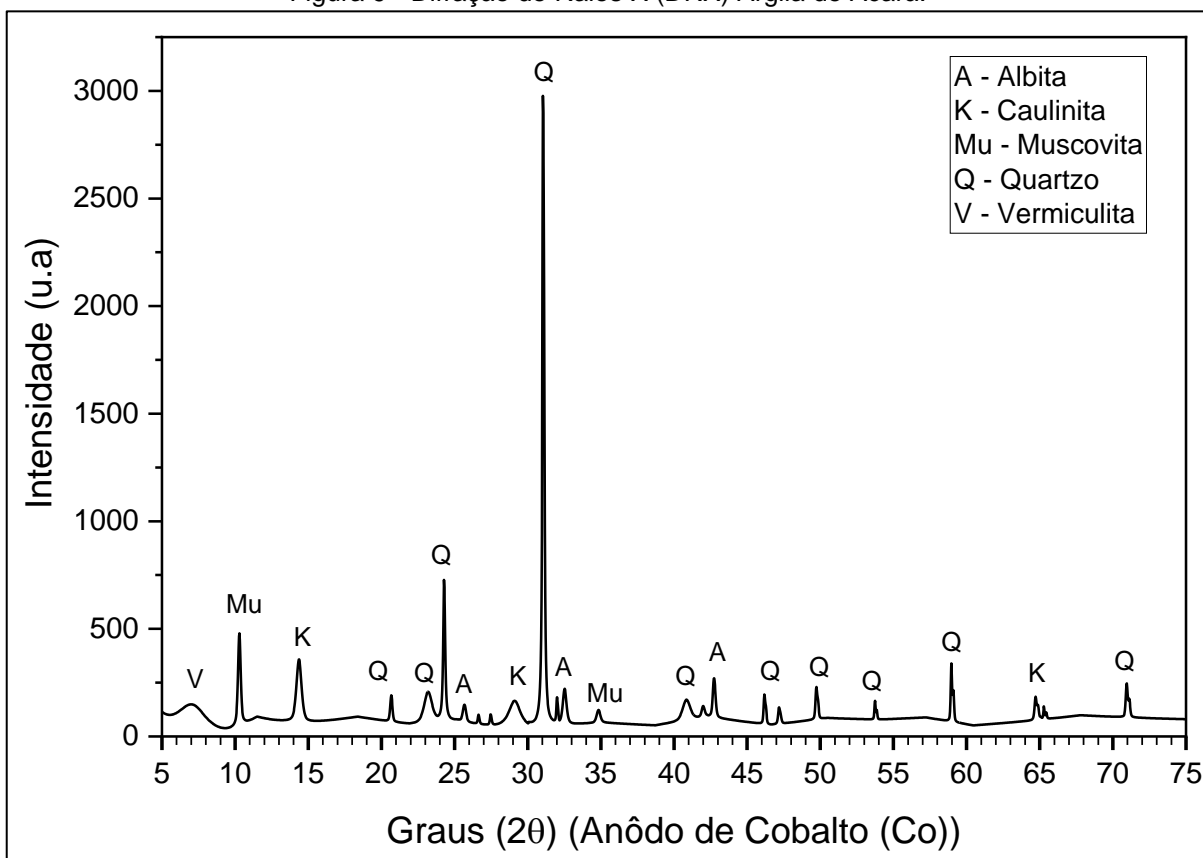
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Difração de Raios X (DRX)

5.1.1. Argila de Acará

Na Figura 9, apresenta-se o DRX da amostra de argila, evidenciando a presença das seguintes fases minerais: Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), Quartzo (SiO_2) e Vermiculita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Figura 9 - Difração de Raios X (DRX) Argila de Acará.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A presença dos principais componentes identificados na argila, como a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), quartzo (SiO_2) e vermiculita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), desempenha um papel significativo nas propriedades do material, especialmente na fabricação de materiais

cerâmicos, como a cerâmica vermelha.

A albita, por exemplo, é um feldspato alcalino que atua como fundente, reduzindo a temperatura de sinterização e melhorando a densificação dos corpos cerâmicos. Além disso, sua presença contribui para a redução da porosidade e aumento da resistência mecânica do material. No entanto, em altas concentrações, a albita pode afetar negativamente a estabilidade dimensional e a resistência ao choque térmico da cerâmica (FRIZZO, 2019).

A caulinita, um mineral argiloso, contribui significativamente à plasticidade na cerâmica e proporciona resistência mecânica ao material. Além disso, a caulinita contribui para a redução da retração linear de sinterização e para o aumento da estabilidade dimensional da cerâmica. No entanto, altas concentrações de caulinita podem levar a problemas de deformação durante a queima da cerâmica (CHAKRABORTY, 2014).

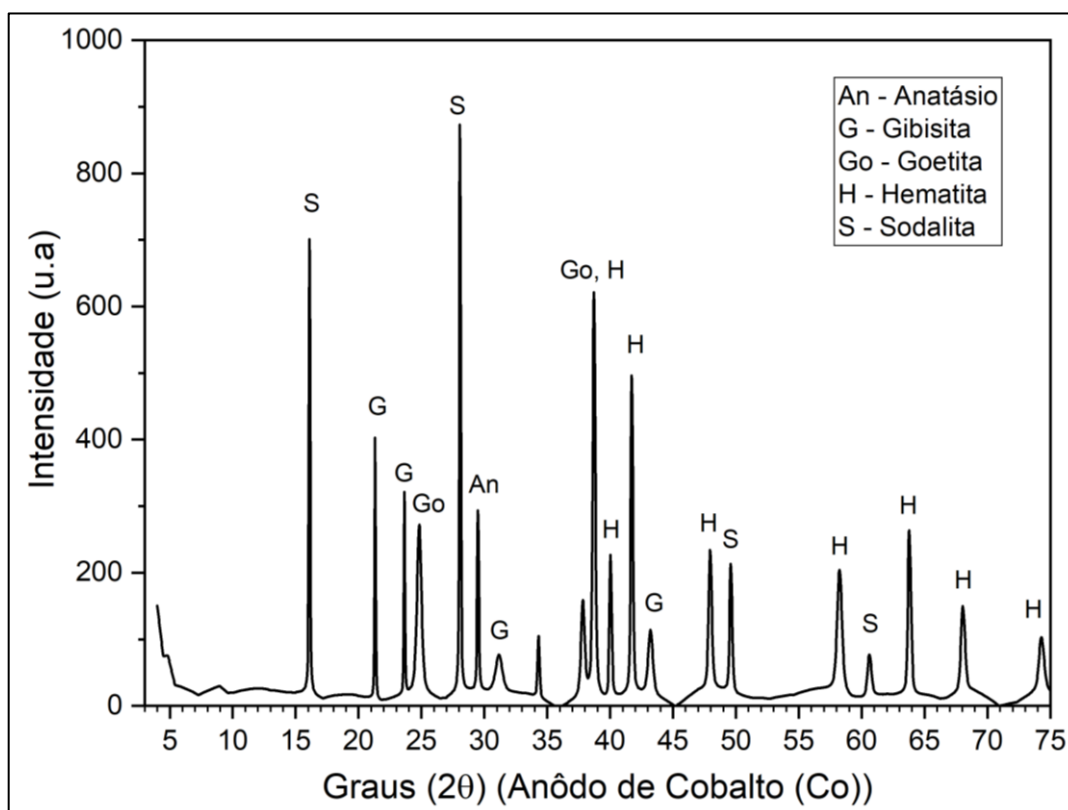
O quartzo, um dos minerais mais comuns na argila, atua como material inerte na cerâmica vermelha e contribui para a estabilidade dimensional do material. Sua presença também pode melhorar a resistência mecânica da cerâmica e reduzir a expansão dimensional. No entanto, altas concentrações de quartzo podem aumentar a porosidade e diminuir a resistência à flexão da cerâmica (KILIKOGLU et al., 1998).

A vermiculita, um mineral argiloso expansível, pode melhorar a plasticidade e a trabalhabilidade da massa cerâmica. Além disso, sua presença contribui para a redução da retração linear de secagem e para a melhoria da resistência mecânica da cerâmica. No entanto, altas concentrações de vermiculita podem afetar negativamente a estabilidade dimensional e a resistência à compressão da cerâmica (SUVOROV; SKURIKHIN, 2003).

5.1.1. Lama Vermelha

A Figura 10 apresenta o DRX correspondente à amostra de rejeito de lama vermelha. A análise revela a presença dos minerais Anatásio (TiO_2), Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), Hematita (Fe_2O_3) e Sodalita ($\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$). Esses minerais são identificados pelos picos característicos de difração que surgem no difratograma.

Figura 10 - Difração de Raios X (DRX) da Lama Vermelha.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A presença dos principais componentes identificados na lama vermelha, como Anatásio, Gibisita, Goetita, Hematita, Sodalita, tem uma origem relacionada ao processo de extração e beneficiamento do minério de bauxita. Esses minerais são encontrados naturalmente na bauxita e podem ser transferidos para a lama vermelha durante o processamento.

Esses componentes têm um potencial significativo de reaproveitamento em diferentes aplicações, incluindo a fabricação de materiais cerâmicos, como a cerâmica vermelha.

A presença do Anatásio (TiO_2) na lama vermelha pode contribuir para a melhoria da resistência mecânica e térmica da cerâmica vermelha, além de promover a estabilidade dimensional do material (WEIBEL; BOUCHET; KNAUTH, 2006). A goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), por sua vez, pode conferir propriedades de coloração à cerâmica vermelha (CORRÊA et al., 2008).

A presença da hematita (Fe_2O_3) na lama vermelha pode afetar as propriedades de resistência mecânica e coloração da cerâmica vermelha, sendo necessário o controle adequado da sua concentração para evitar efeitos indesejáveis (MELO et al.,

2002).

Embora esses minerais estejam presentes na lama vermelha em diferentes proporções, há de se atentar quanto a sua influência nas propriedades finais dos materiais cerâmicos, com as devidas ressalvas.

O Anatásio, por exemplo, pode causar um aumento na temperatura de sinterização da cerâmica, o que pode levar a um maior consumo de energia e a possíveis problemas de deformação durante o processo de fabricação (FRENZEL et al., 2005; WEIBEL; BOUCHET; KNAUTH, 2006).

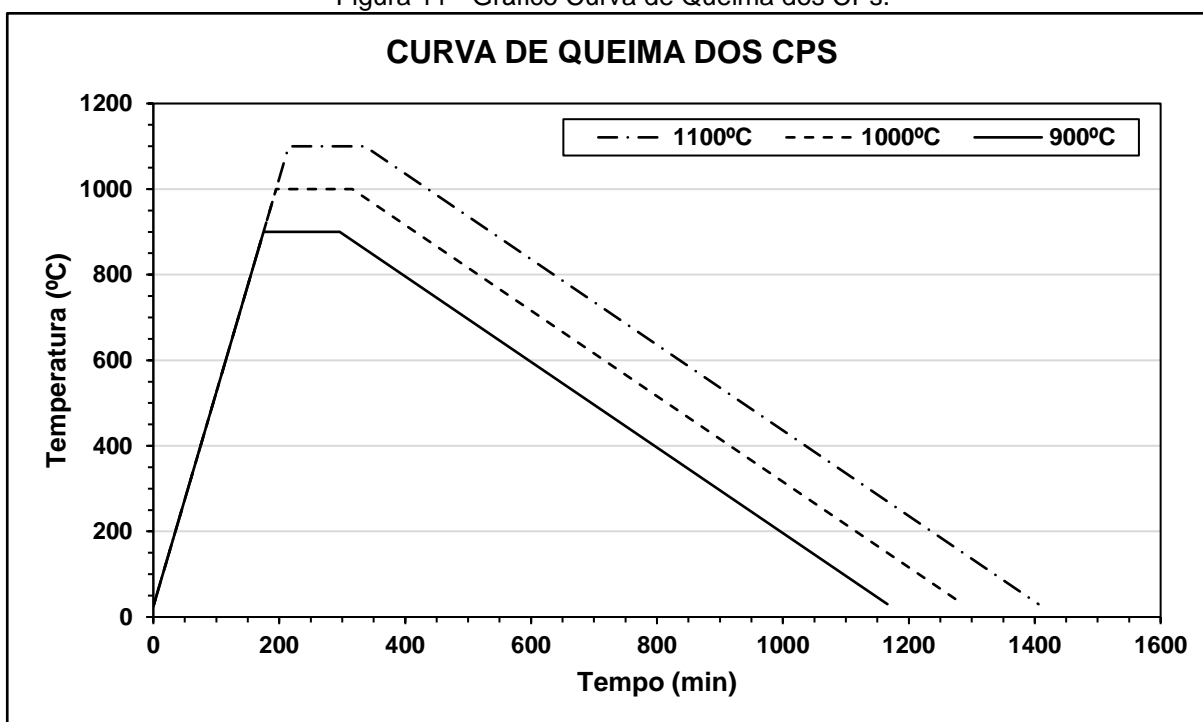
Além disso, a hematita e a magnetita podem causar problemas de coloração indesejada, alterando a tonalidade da cerâmica vermelha (HENRIQUES, 2012). A sodalita, embora possa ser benéfica em termos de densificação e estabilidade térmica, em altas concentrações pode levar a uma variação na porosidade, o que pode afetar a absorção de água e a resistência mecânica da cerâmica (PIZANI, 1983).

Portanto, é crucial realizar uma análise cuidadosa da composição da lama vermelha e considerar a presença desses componentes como um parâmetro de controle durante a produção cerâmica. A seleção adequada das matérias-primas e o controle preciso das proporções desses minerais podem ajudar a minimizar os efeitos negativos e otimizar as propriedades dos produtos cerâmicos finais.

5.2. Curva de Queima

A Figura 11 mostra a curva de aquecimento dos corpos de prova sinterizados. Ao analisar a curva de queima, é possível observar diferentes estágios e tendências relacionadas ao tempo e à temperatura. O aquecimento inicial é caracterizado por um aumento gradual da temperatura até atingir o patamar de sinterização. Durante esse período, ocorrem fenômenos como a desidratação, a decomposição de compostos orgânicos e a evolução da estrutura cerâmica.

Figura 11 - Gráfico Curva de Queima dos CPs.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A etapa de manutenção em temperatura máxima permite a realização de reações de difusão e rearranjo de partículas, que são essenciais para a consolidação e o fortalecimento da estrutura cerâmica. Nessa fase, ocorrem processos como a formação de ligações químicas, a recristalização e a densificação do material. Por fim, a etapa de resfriamento é fundamental para a estabilização da estrutura cerâmica, evitando tensões internas e possíveis deformações.

Com base na curva de queima, é possível avaliar o comportamento térmico dos corpos de prova e identificar possíveis ajustes nos parâmetros de sinterização, como a taxa de aquecimento e resfriamento, a fim de obter propriedades desejadas.

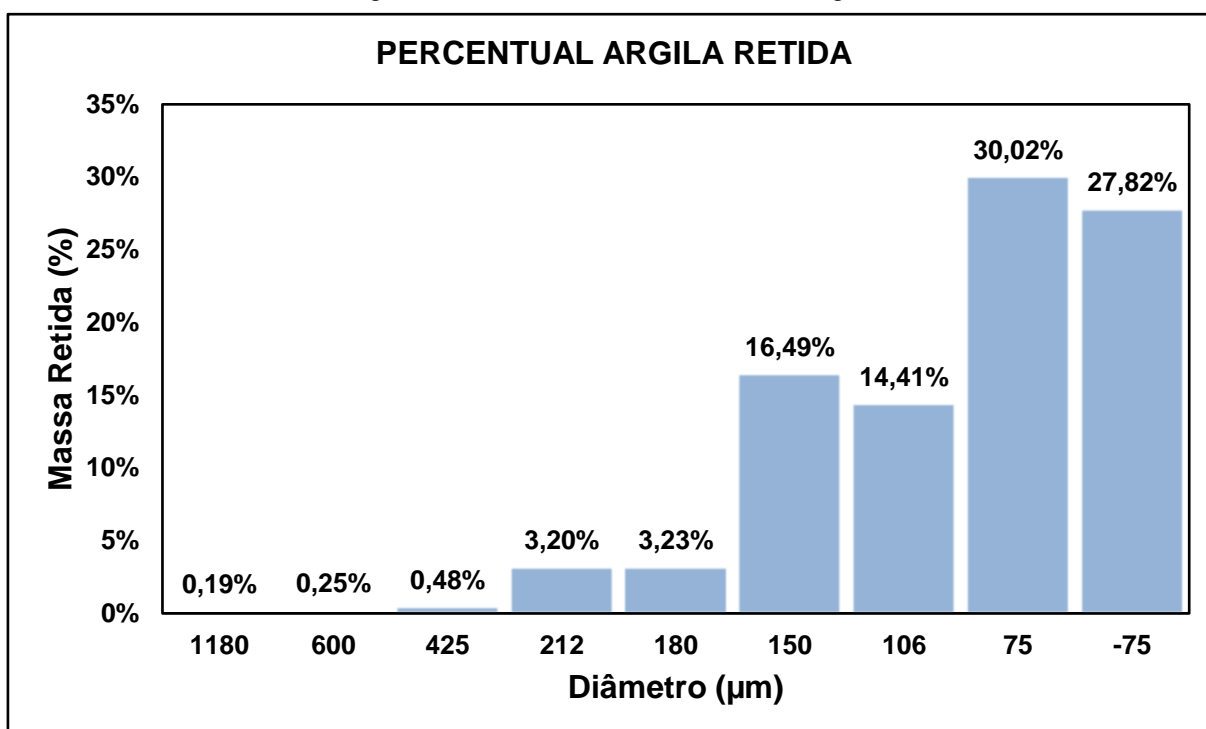
5.3. Análise Granulométrica

5.3.1. Argila

A Figura 12 demonstra a análise granulométrica da argila utilizada. No caso da argila em estudo, foram identificados os seguintes percentuais de massas retidas: cerca de 30% na faixa de 150 a 106 μm , 30% de 106 a 75 μm e 30% abaixo de 75 μm .

A distribuição granulométrica da argila é de extrema relevância para determinar suas propriedades físicas e influencia diretamente nas características dos produtos cerâmicos finais. O percentual de massas retidas em cada faixa de tamanho indica a proporção de partículas presentes na argila que se enquadram nessas faixas específicas.

Figura 12 - Análise Granulométrica da Argila.



Fonte: De própria autoria, 2023.

Na faixa de 150 a 106 µm, onde cerca de 30% das partículas se encontram, essas partículas têm um tamanho intermediário e podem contribuir para a resistência mecânica e a plasticidade da argila durante o processamento cerâmico. Já na faixa de 106 a 75 µm, também com cerca de 30% de massas retidas, as partículas são menores e podem desempenhar um papel importante na compactação e na densificação do material durante a sinterização.

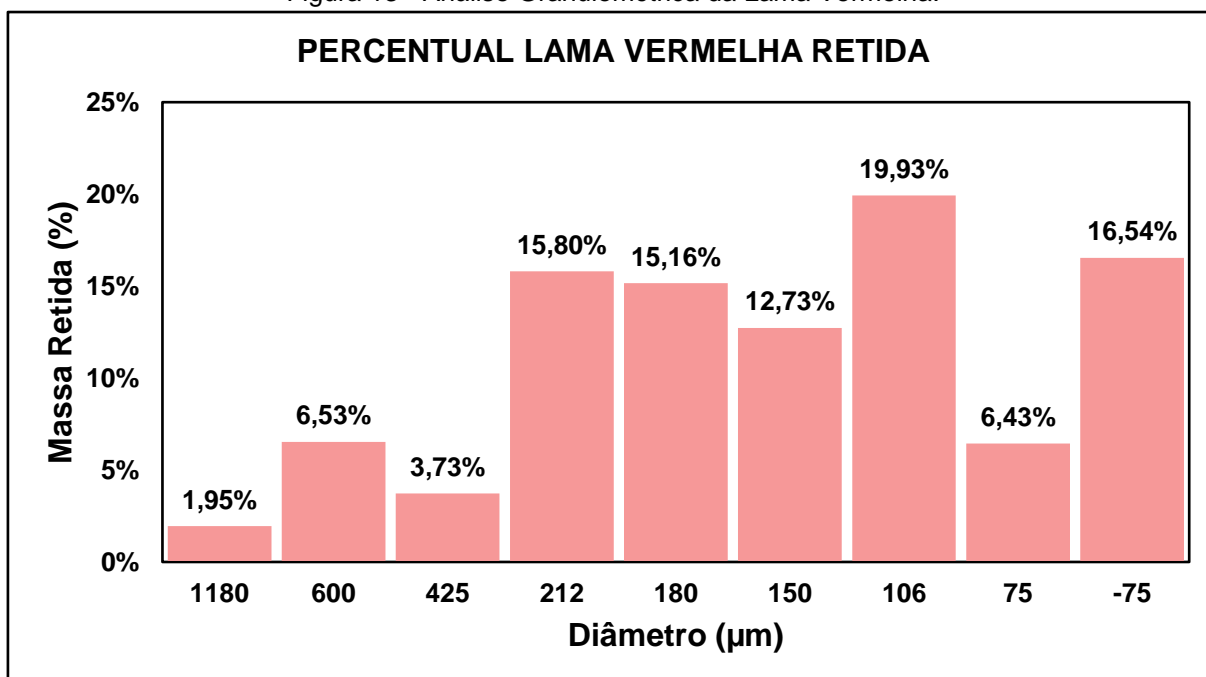
A fração de partículas abaixo de 75 µm, também correspondente a cerca de 30% das massas retidas, é conhecida como fração fina. Essas partículas finas têm uma influência significativa nas propriedades reológicas da argila, como sua plasticidade, viscosidade e capacidade de moldagem. Além disso, essa fração fina pode afetar a secagem e a queima dos produtos cerâmicos, influenciando na formação da microestrutura final.

A distribuição granulométrica da argila é um fator importante a ser considerado no desenvolvimento e na formulação de materiais cerâmicos. A proporção de partículas em cada faixa de tamanho pode ser ajustada para otimizar as propriedades desejadas do produto, como resistência mecânica, absorção de água e porosidade.

5.3.2. Lama Vermelha

A Figura 13 demonstra a análise granulométrica da Lama Vermelha utilizada. No caso da Lama Vermelha, a análise granulométrica revelou que cerca de 52% das partículas se encontram na faixa de 1180 a 106 μm (mícrons), enquanto 6% estão retidas na faixa de 75 μm e 16% estão abaixo de 75 μm .

Figura 13 - Análise Granulométrica da Lama Vermelha.



Fonte: De própria autoria, 2023

A presença de 52% das partículas na faixa de 1180 a 106 μm indica a predominância de partículas de tamanho intermediário nesse intervalo. Essas partículas podem desempenhar um papel importante na densificação e na formação da microestrutura da lama vermelha durante o processo de sinterização. Além disso, a fração retida nessa faixa de tamanho pode influenciar nas propriedades reológicas do material, como sua capacidade de moldagem e resistência à deformação.

A fração de 6% retida na faixa de 75 μm é composta por partículas menores, que têm um tamanho mais fino. Essas partículas finas podem contribuir para a

melhoria da plasticidade da Lama Vermelha, auxiliando na moldagem e na formação de corpos cerâmicos de melhor qualidade. No entanto, é importante controlar a quantidade de partículas finas para evitar problemas como a obstrução de moldes ou a formação de defeitos durante a queima.

A fração de 16% abaixo de 75 μm corresponde a partículas muito finas na lama vermelha. Essas partículas finas podem influenciar as características reológicas do material, como sua fluidez e viscosidade, afetando a capacidade de processamento e moldagem. Além disso, a presença de partículas finas em excesso pode levar a um aumento na porosidade e uma diminuição na resistência mecânica dos produtos cerâmicos finais.

5.4. Avaliação Macroscópica dos CPs

A avaliação visual e macroscópica dos CPs após a queima é uma prática comum na análise de materiais cerâmicos. Essa avaliação permite identificar o padrão de cores desenvolvido durante o processo de sinterização, o que pode fornecer informações valiosas sobre a composição e as propriedades do material.

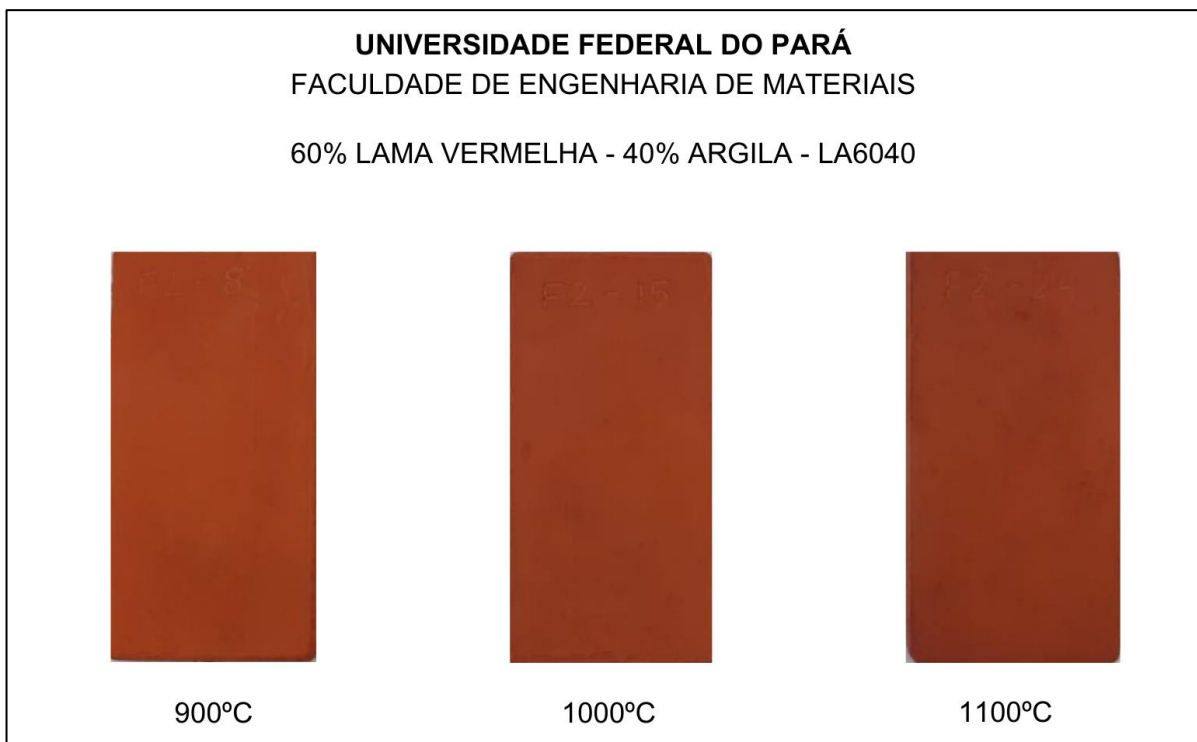
A Figura 14 demonstra os CPs de Argila após a queima, podendo a partir deste, fazer uma avaliação visual do aspecto do material sinterizado e da cor pós sinterização. Já as Figuras 15 e 16 demonstra os CPs produzidos com lama vermelha, formulações LA6040 e LA8020, após a queima.

Figura 14 - CPs da formulação A100 Sinterizados.



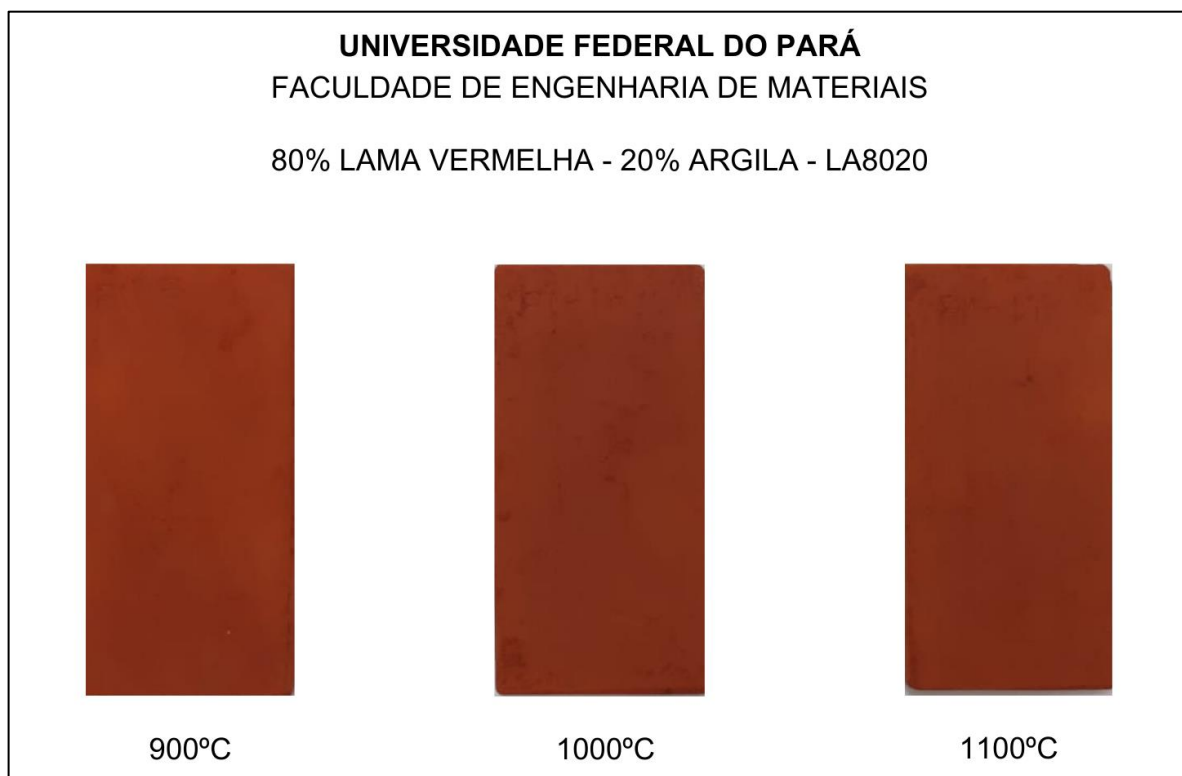
Fonte: De própria autoria, 2023.

Figura 15 - CPs da formulação LA6040 Sinterizados.



Fonte: De própria autoria, 2023.

Figura 16 - CPs da formulação LA8020 Sinterizados.



Fonte: De própria autoria, 2023.

Souza Santos e Santos (1989) ressaltam a importância da análise visual das cores de queima na seleção de materiais para determinação de propriedades cerâmicas. As cores resultantes da queima podem ser influenciadas pela presença de determinados componentes, como óxidos metálicos, minerais e impurezas. Por exemplo, a presença de óxido de ferro pode resultar em tonalidades avermelhadas.

A análise das cores de queima também pode fornecer informações sobre a temperatura alcançada durante o processo de sinterização. Diferentes temperaturas de queima podem levar a variações nas cores e na intensidade das tonalidades. Isso pode ser útil para otimizar o processo de sinterização, ajustando os parâmetros de temperatura para obter a cor desejada e garantir a qualidade do produto.

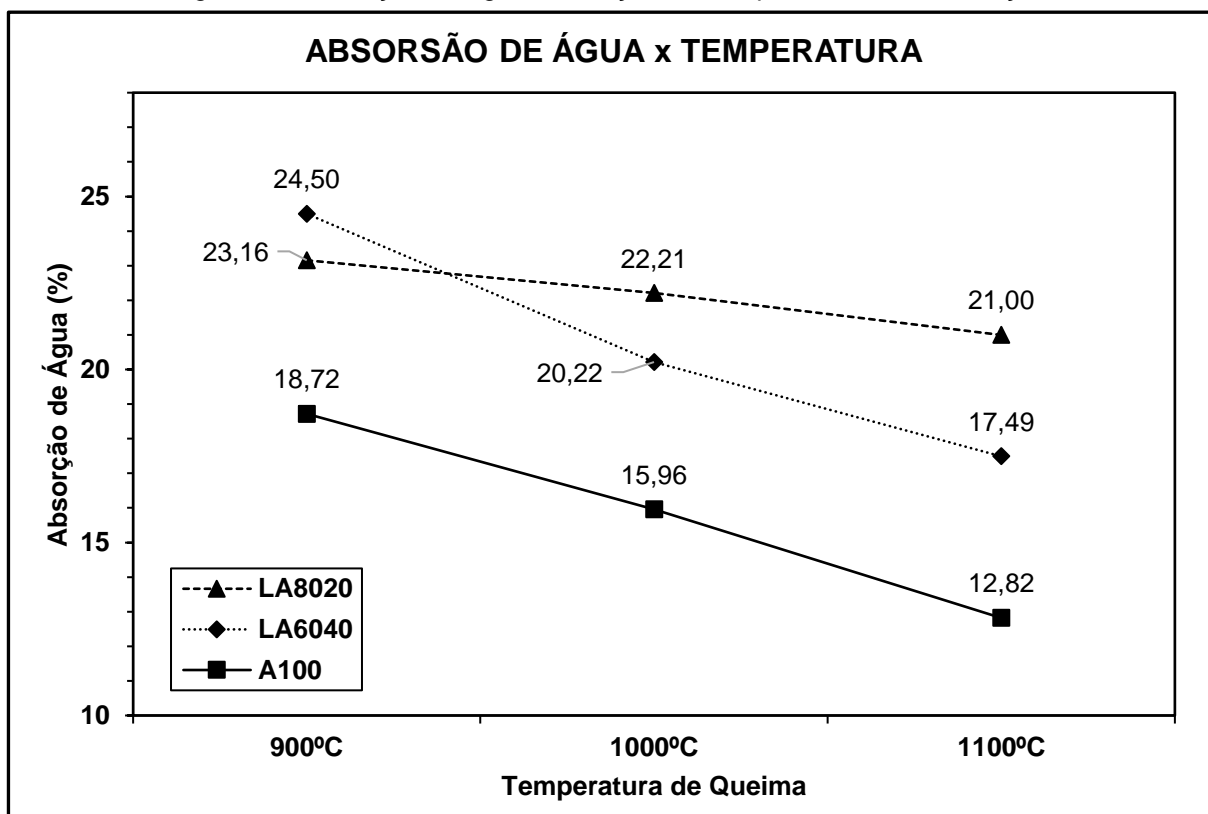
Além disso, a avaliação visual dos CPs pode revelar informações sobre a densificação, homogeneidade e uniformidade da microestrutura. Variações na cor e na textura podem indicar variações na densidade, presença de porosidade ou distribuição desigual dos componentes.

5.5. Propriedades Cerâmicas

5.5.1. Absorção de Água (AA)

A Figura 17 apresenta o comportamento da absorção de água para os corpos de prova sinterizados em diferentes temperaturas.

Figura 17 - Absorção de Água em função da Temperatura de Sinterização.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A absorção de água observada nas amostras de acordo com os parâmetros de produção estabelecidos pela NBR 15270/2017 para blocos ou tijolos de vedação em parede vazada com furos ou vazados horizontais foi analisada. De acordo com a norma, para a classe VED15, a absorção de água deve estar entre 8% e 25%, desde que a resistência à flexão seja superior a 1,5 MPa (15,30 kgf/cm²).

Os resultados obtidos nas amostras demonstraram uma relação esperada entre a temperatura de queima e a absorção de água. Observou-se que, para a maior temperatura de queima, houve uma menor absorção de água nas três formulações avaliadas. Esse comportamento é justificado pela maior densificação do material cerâmico durante o processo de sinterização em altas temperaturas, o que reduz a

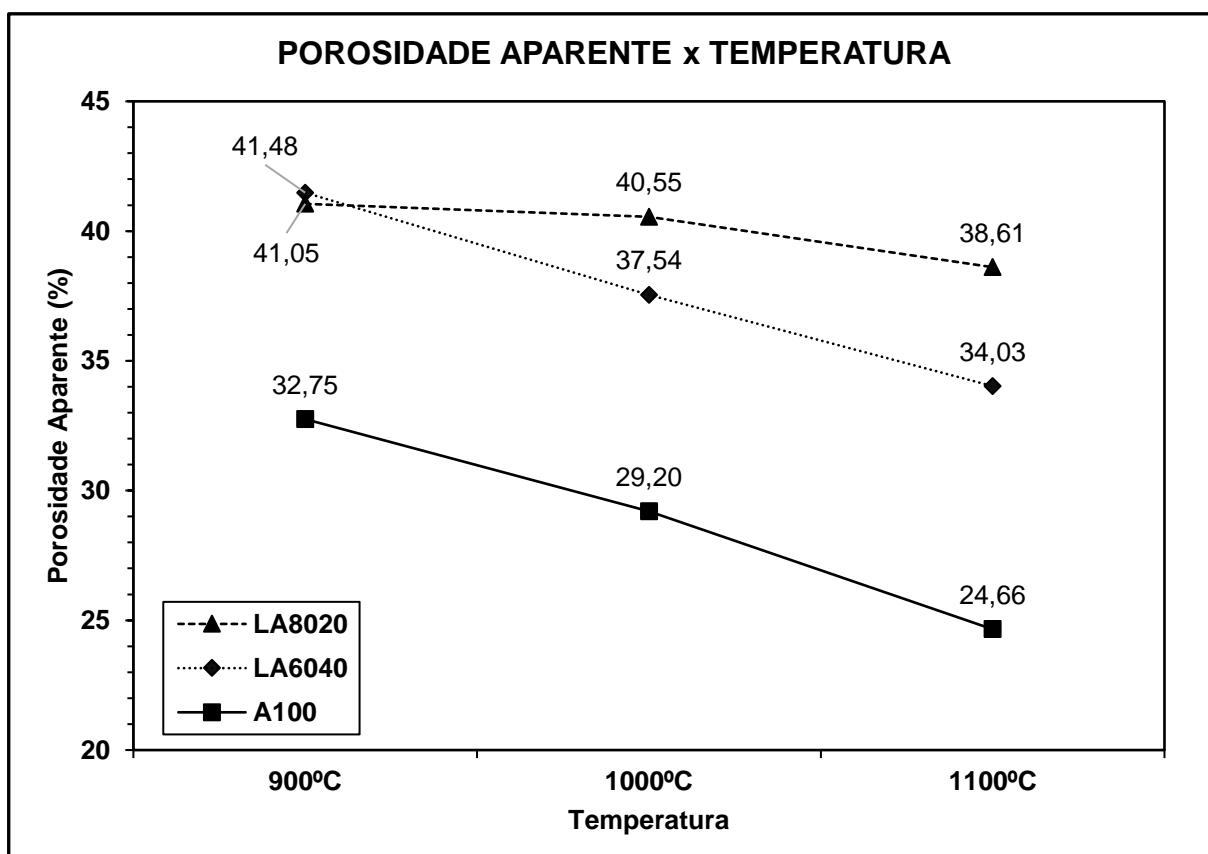
porosidade e, conseqüentemente, a capacidade de absorção de água.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que as três formulações analisadas se enquadram nos requisitos estabelecidos pela norma para blocos de vedação, uma vez que apresentaram valores de absorção de água dentro da faixa recomendada. Essa propriedade é importante para garantir a durabilidade e o desempenho adequado desses materiais em aplicações construtivas.

5.5.2. Porosidade Aparente (PA)

A Figura 18 apresenta o comportamento da Porosidade Aparente para os corpos de prova sinterizados em diferentes temperaturas. De acordo com Souza Santos e Santos (1989), a porosidade aparente está diretamente relacionada à absorção de água, ou seja, quanto maior a porosidade aparente, maior a capacidade do material em absorver água. Essa relação se deve ao fato de que os poros presentes no material facilitam a entrada e retenção de água em sua estrutura.

Figura 18 - Porosidade Aparente em função da Temperatura de Sinterização.



Fonte: De própria autoria, 2023.

Carter e Norton (2013) também ressaltam a relação entre a porosidade aparente e a absorção de água, indicando que a porosidade é um fator determinante para a capacidade de um material em absorver líquidos. Além disso, a porosidade aparente está relacionada à estrutura porosa do material e pode influenciar outras propriedades, como a resistência mecânica e a permeabilidade.

Uma observação importante é que, conforme previsto, com o aumento da temperatura de queima dos materiais cerâmicos, geralmente ocorre uma diminuição na porosidade aparente. Isso ocorre devido à sinterização, processo no qual as partículas cerâmicas se fundem e se compactam, resultando em uma redução dos espaços vazios entre elas. Essa redução da porosidade aparente pode trazer benefícios ao material, como o aumento da resistência mecânica e a redução da permeabilidade do material.

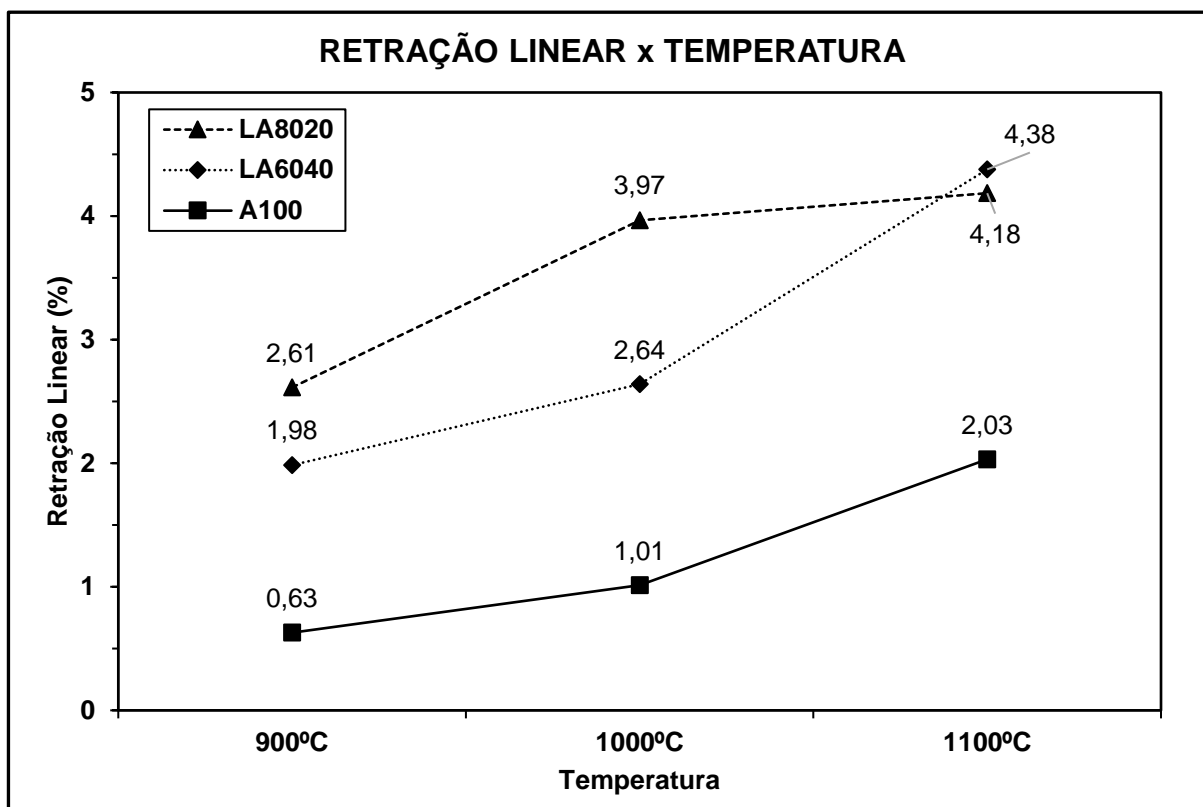
No entanto, é importante ressaltar que a porosidade aparente também desempenha um papel crucial em certas aplicações, como em materiais refratários, onde uma porosidade controlada pode ser desejável para melhorar a resistência ao choque térmico e a capacidade de isolamento térmico. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a porosidade aparente e as propriedades desejadas para cada aplicação específica.

Segundo Souza Santos e Santos (1989), para porosidade aparente os valores máximos são de 35% para uma temperatura de 950 °C e 30% para uma temperatura de 1250 °C, valores considerados aceitáveis para cerâmica vermelha.

5.5.3. Retração Linear (RL)

Nas amostras analisadas, foi observada uma variação da retração linear de sinterização entre 0,33% e 4,38%. Essa variação pode ser atribuída às características específicas dos materiais utilizados e às condições de processamento adotadas. Os valores são observados na Figura 19.

Figura 19 - Retração Linear em função da Temperatura de Sinterização.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A ABNT NBR 15270-2 estabelece que a tolerância para a retração linear de sinterização em blocos e tijolos de vedação (VED) seja de até 5 mm por face (altura, largura ou comprimento). Essa tolerância, quando expressa percentualmente, corresponde a 5% em relação às dimensões originais do material. Para blocos e tijolos estruturais (EST), a tolerância estabelecida é de até 3% em relação às dimensões originais. Para telhas, a ABNT NBR 15310 estabelece a tolerância dimensional em até 2%.

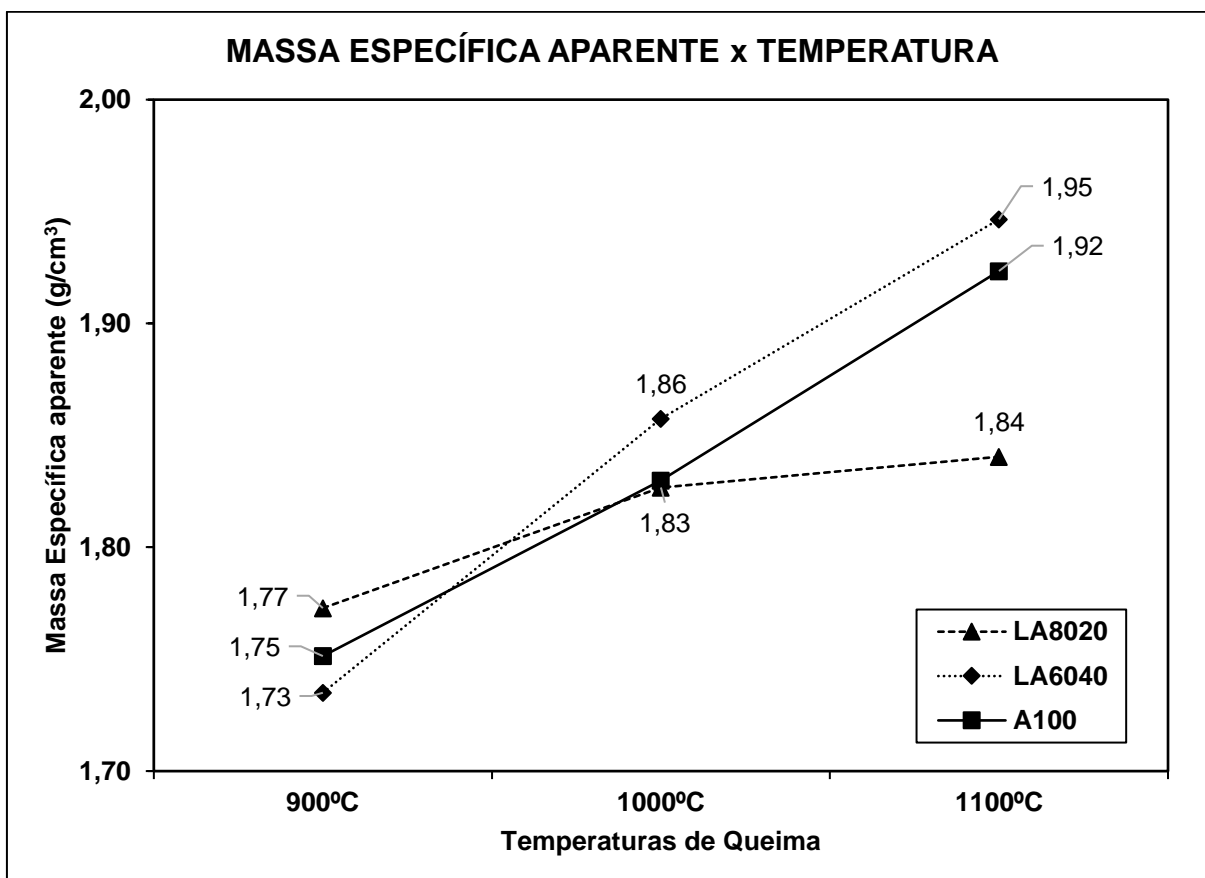
É importante destacar que a retração linear de sinterização é uma propriedade natural dos materiais cerâmicos e ocorre devido a processos de difusão e rearranjo de partículas durante a queima. Essa retração pode afetar as dimensões finais dos blocos e tijolos, sendo necessário controlá-la dentro dos limites estabelecidos pelas normas para garantir a qualidade e a conformidade dos produtos.

5.5.4. Massa Específica Aparente (MEA)

Nas amostras estudadas, Figura 20, foi observada uma variação na massa

específica aparente em diferentes temperaturas de queima. À medida que a temperatura de queima aumenta, ocorre a fusão parcial das partículas e a formação de ligações químicas, resultando em uma maior densificação e consequente aumento da massa específica aparente.

Figura 20 - Massa Específica Aparente em função da Temperatura de Sinterização.



Fonte: De própria autoria, 2023.

A massa específica aparente é uma propriedade importante para a delimitação de projetos em engenharia, pois está relacionada à resistência mecânica, à durabilidade e à capacidade de suporte dos materiais cerâmicos. Valores inadequados de massa específica aparente podem comprometer o desempenho e a segurança das estruturas construídas com cerâmica vermelha, por exemplo.

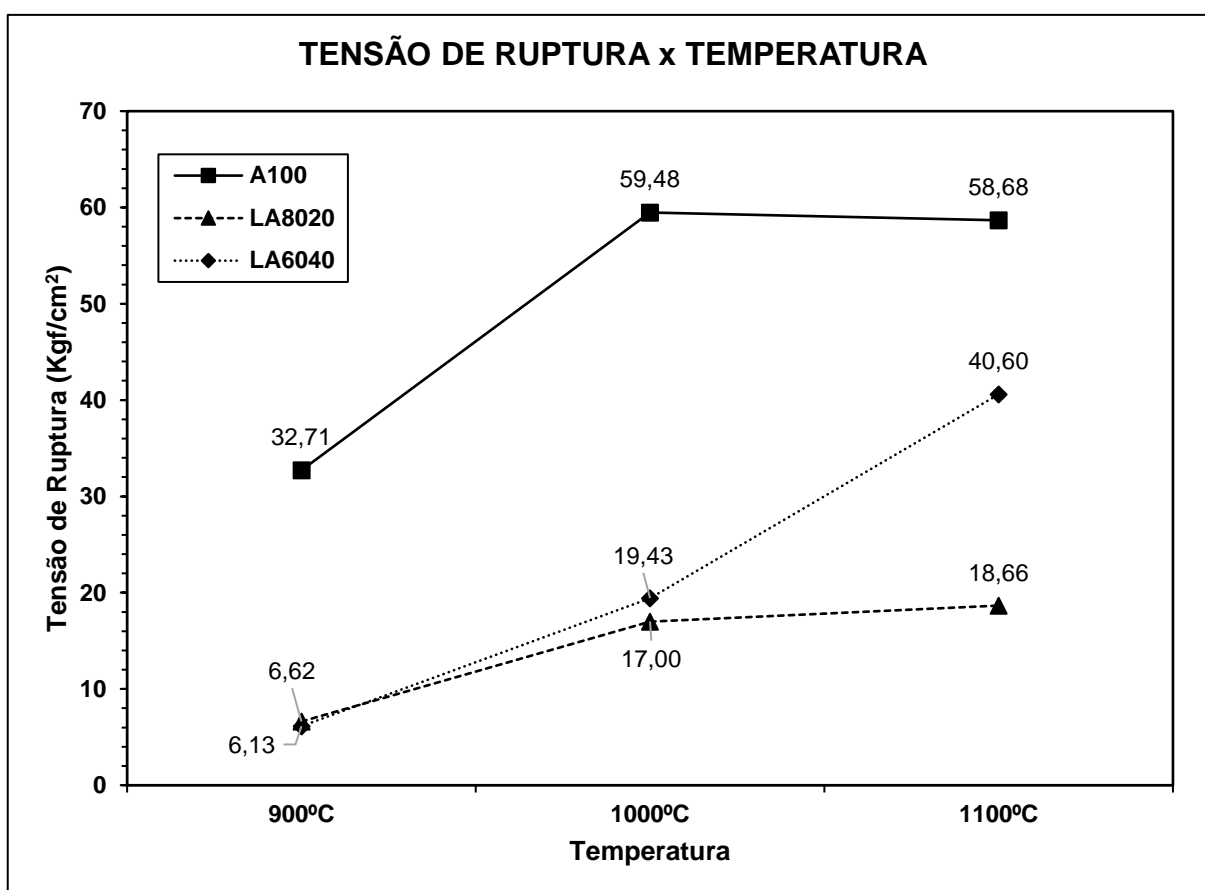
De acordo com estudos realizados por Souza Santos e Santos (1989), os valores de massa específica aparente para argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha apresentam-se entre 1,7 e 2,1 g/cm³. Essa faixa de valores é recomendada pela literatura devido às características desejáveis de resistência e durabilidade que

estão associadas a esses intervalos. É importante destacar que todas as composições analisadas nas amostras obtiveram valores dentro desse intervalo, o que indica a adequação das mesmas para a produção de cerâmica vermelha.

5.5.5. Resistência Mecânica

A Figura 21 mostra módulo de ruptura à flexão das amostras em função da temperatura de sinterização.

Figura 21 - Tensão de Ruptura em função da Temperatura de Sinterização.



Fonte: De própria autoria, 2023.

Ao analisar os resultados, destaca-se a formulação LA6040, que apresentou um crescimento na curva de Tensão de Ruptura. Esse crescimento indica que essa formulação específica obteve um aumento na resistência mecânica em relação às demais formulações. Isso pode ser atribuído aos parâmetros adotados, como a composição e o processo queima.

É importante ressaltar que os resultados obtidos para a Tensão de Ruptura podem ser influenciados por diversos fatores, como a porosidade, a distribuição granulométrica, a estrutura cristalina e a densidade do material cerâmico. Portanto, é fundamental considerar esses aspectos ao realizar análises comparativas e buscar melhorias no desempenho do material.

Para aprimorar ainda mais a resistência mecânica da cerâmica vermelha, podem ser realizadas alterações nos parâmetros de queima, como o tempo e a temperatura. Estudos mostram que essas variáveis podem impactar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, incluindo a Tensão de Ruptura.

5.5.6. Classificação Baseado nas Propriedades

Como forma de identificar, baseados nas propriedades apresentadas pelas formulações e nos parâmetros estabelecidos, as Tabela 5 e 6 destacam a relação das propriedades apresentadas em cada formulação e posteriormente a devida utilização e a viabilidade da mesma, de cada produto, a partir das normas e literatura respectivas em cada caso.

A partir das propriedades é possível identificar que em relação a Blocos e Tijolos de Vedação (VED), as formulações A100, a 900 °C, 1000 °C e 1100 °C e LA6040 a 1100 °C, são suscetíveis.

Para Blocos de Alvenaria Estrutural (EST), somente a formulação A100 a 1000 °C e 1100 °C são suscetíveis.

Para telhas, nenhuma das formulações se enquadram. Contudo, vale ressaltar que, com base na tendência de evolução das propriedades dos materiais apresentados, a formulação LA6040, como alternativa ao uso de argila foi a que apresentou os resultados mais promissores, levando em consideração os parâmetros de sinterização adotados.

Tabela 5 - Propriedades das respectivas formulações de acordo com as diferentes temperaturas de queima.

900 °C					
Formulações	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	RL (%)	TRF (kgf/cm²)
A100	18,72	32,75	1,75	0,63	32,71
LA6040	24,50	41,48	1,73	1,98	6,62
LA8020	23,16	41,05	1,77	2,61	6,13
1000 °C					
Formulações	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	RL (%)	TRF (kgf/cm²)
A100	15,96	29,20	1,83	1,01	59,48
LA6040	20,22	37,54	1,86	2,64	19,43
LA8020	22,21	40,50	1,83	3,97	17
1100 °C					
Formulações	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	RL (%)	TRF (kgf/cm²)
A100	12,82	24,66	1,92	2,03	58,68
LA6040	17,49	34,03	1,95	4,38	40,6
LA8020	21,00	38,61	1,84	4,38	18,66

Fonte: De própria autoria, 2023.

Tabela 6 - Propriedades de diferentes tipos de cerâmicas de acordo com as normas e literatura.

Formulações	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	RL (%)	TRF (kgf/cm²)
Blocos e Tijolos de Vedação (VED)	8 a 25	<35	1,7 a 2,1	<5	>15
Blocos de Alvenaria Estrutural (EST)	8 a 21	<35	1,7 a 2,1	<3	>40
Telhas	<20	<35	1,7 a 2,1	<2	>100

Fonte: De própria autoria, 2023.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados, é possível denotar que todas as formulações desenvolvidas em determinados aspectos demonstraram viabilidade na obtenção de cerâmica vermelha, atendendo aos requisitos estabelecidos para as propriedades analisadas. Embora algumas formulações não tenham atendido todos os requisitos para os diferentes tipos de materiais cerâmicos adotados como exemplo, os resultados obtidos são promissores.

O estudo foi baseado na proposta de avaliação da incorporação do rejeito como alternativa, agregando-o valor a partir de sua reinserção, ao qual, foi evidenciado de forma prática com base no que exemplificam as normas e a literatura a viabilidade de inserção do rejeito como substituto parcial da argila como matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha. Além do mais, os resultados indicam que é possível obter materiais com propriedades similares aos já presentes no mercado, porém com um menor tempo de queima ou temperatura requerida. Esse fator é essencial para a eficiência do processo e a redução dos custos associados.

Dentre as formulações avaliadas, destaca-se a LA6040 como a mais promissora. A tendência observada na curva de suas propriedades, especialmente em relação à resistência à flexão, demonstra sua viabilidade para a produção de blocos ou tijolos de vedação. Essa formulação apresenta potencial para fornecer um material cerâmico de qualidade e desempenho requerido.

7. SUGESTÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, algumas sugestões podem ser consideradas para futuras pesquisas e aprimoramentos na área. São elas:

- Explorar novas formulações: Investigar diferentes combinações de matérias-primas e propor novas formulações para ampliar as opções de materiais cerâmicos disponíveis no mercado.
- Otimizar os parâmetros de queima: Realizar estudos para otimizar os parâmetros de tempo e temperatura de queima, buscando reduzir ainda mais esses valores sem comprometer a qualidade do material.
- Testar o desempenho em aplicações específicas: Realizar testes e avaliações do desempenho dos materiais em diferentes aplicações, como revestimentos e blocos de vedação, para verificar sua adequação e durabilidade.
- Avaliar a viabilidade econômica: Realizar análises de viabilidade econômica para a implementação industrial das novas formulações, considerando os custos de produção e o potencial de mercado.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria**. Brasil, 2017.
- ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P. **Essentials of Materials Science & Engineering**. [s.l.] Cengage Learning, 2008.
- Associação Brasileira do Alumínio - ABAL. Disponível em: <<http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/bauxita/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- ASTM. **ASTM C674-13(2018) - Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials**. , 2018.
- BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos caulíníticos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. 2007.
- BETINI, D. G. **Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá**. Belém: [s.n.].
- BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. **A Indústria Cerâmica Brasileira**. Cerâmica Industrial, v. 5, n. 3, p. 0–0, 11 jan. 2017.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [s.l.] LTC, 2020.
- CARDONA, Y.; KORILI, S. A.; GIL, A. **A nonconventional aluminum source in the production of alumina-pillared clays for the removal of organic pollutants by adsorption**. Chemical Engineering Journal, v. 425, p. 130708, 1 dez. 2021.
- CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials: Science and Engineering**. [s.l.] Springer New York, 2013.
- CHAKRABORTY, A. K. **Phase transformation of kaolinite clay**. [s.l.] Springer, 2014.
- CHOE, G.; KANG, S.; KANG, H. Mechanical Properties of Concrete Containing Liquefied Red Mud Subjected to Uniaxial Compression Loads. **Materials 2020, Vol. 13, Page 854**, v. 13, n. 4, p. 854, 13 fev. 2020.
- CORRÊA, M. M. et al. **Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1857–1872, 2008.
- COSTA, D. H. P. E. **Desempenho estrutural de blocos, primas, mini-paredes e paredes de alvenaria estrutural confeccionadas com blocos cerâmicos produzidos a partir da mistura de lama vermelha com argila**. 27 mar. 2014.
- COSTA, M. G. et al. **Reutilização in situ das Lamas Residuais de uma Indústria**

Cerâmica. Cerâmica Industrial, v. 7, n. 5, p. 0–0, 11 jan. 2017.

FRENZEL, J. et al. **Structural and electronic properties of bulk gibbsite and gibbsite surfaces.** Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, v. 631, n. 6-7, p. 1267–1271, 2005.

FRIZZO, R. G. **Piroplasticidade em cerâmica de composição albita-feldspato potássico-caulim.** 2019.

HABASHI, F. **A short history of hydrometallurgy.** Hydrometallurgy, v. 79, p. 15–22, 1 set. 2005.

HENRIQUES, A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita.** 2012.

HENRIQUES JR., M.; RODRIGUES, J. **Cerâmica Vermelha – Projeto EELA no Brasil.** Rio de Janeiro: [s.n.].

HILDEBRANDO, E. A. **Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) Como Matéria-Prima na Indústria de Cerâmica Estrutural.** Belém: Universidade Federal do Pará, 1998.

Indústria brasileira é referência em guia internacional de mineração sustentável de bauxita - Revista Alumínio. Disponível em: <<https://revistaaluminio.com.br/industria-brasileira-e-referencia-em-guia-internacional-de-mineracao-sustentavel-de-bauxita/>>. Acesso em: 30 maio. 2023.

KILIKOGLU, V. et al. **Mechanical performance of quartz-tempered ceramics: Part I, strength and toughness.** Archaeometry, v. 40, n. 2, p. 261–279, 1998.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics.** [s.l.] Wiley, 1976.

MACÊDO, A. N. et al. **Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila.** Ambiente Construído, v. 11, n. 4, p. 25–36, dez. 2011.

MACEDO, R. S. et al. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha.** Cerâmica, v. 54, n. 332, p. 411–417, 2008.

MAGALHÃES, E. M. **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando a concentração e/ou extração de compostos de titânio.** Belém: [s.n.]. Disponível em: <<https://proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Edilson.pdf>>. Acesso em: 29 maio. 2023.

MELO, V. F. et al. **Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 53–64, 2002.

MERCURY, J. M. R. et al. **Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 15, n. 3, p. 445–460, 2010.

MOTTA, L. C. T.; MARCIANO, J. F. M. **Panorama Setorial - Minerais Industriais**. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, p. 0–0, 11 jan. 2017.

PEIXOTO, R. J. **Avaliação da gestão de resíduos sólidos com características urbanas em mineradoras na Região Norte**. 2012.

PIZANI, P. S. **Physical properties of natural blue Brazilian sodalite. Propriedades físicas da sodalita natural Brasileira**. 1983.

SANTOS, F. **Potencial econômico da atividade oleiro de São Miguel do Guamá e Irituia-ne do Pará**. Belém: [s.n.].

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. [s.l.] Pearson Universidades, 2008.

SOUZA SANTOS, P.; SANTOS, H. S. **Ciencia e tecnologia de argilas**. [s.l.] E. Blucher, 1989.

SUVOROV, S. A.; SKURIKHIN, V. V. **Vermiculite—a Promising Material for High-Temperature Heat Insulators**. *Refractories & Industrial Ceramics*, v. 44, n. 3, 2003.

USGS. **Bauxite and Alumina Statistics and Information | U.S. Geological Survey**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A. DE; MONTEIRO, S. N. **Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 50, n. 315, p. 254–260, set. 2004.

WANG, P.; LIU, D. Y. **Physical and Chemical Properties of Sintering Red Mud and Bayer Red Mud and the Implications for Beneficial Utilization**. *Materials* 2012, Vol. 5, Pages 1800-1810, v. 5, n. 10, p. 1800–1810, 9 out. 2012.

WANG, S.; ANG, H. M.; TADÉ, M. O. **Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes**. *Chemosphere*, v. 72, n. 11, p. 1621–1635, 1 ago. 2008.

WEIBEL, A.; BOUCHET, R.; KNAUTH, P. **Electrical properties and defect chemistry of anatase (TiO₂)**. *Solid State Ionics*, v. 177, n. 3–4, p. 229–236, 2006.

XIAOBIN, L. I. et al. **Bayer red mud sintering process based on reduction of iron minerals**. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 1 jul. 2015.