



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS



FABIO MOREIRA BRITO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM
NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA MARAJOARA PARA
OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

ANANINDEUA

2025

FABIO MOREIRA BRITO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM
NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA MARAJORA PARA
OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof. Dr. Sergio Neves Monteiro
Coorientador(a): Profa. Dra. Verônica Scarpini Candido

Área de concentração: Caracterização, Desenvolvimento e Aplicação de Materiais
Linha de pesquisa: Tecnologia de Materiais

ANANINDEUA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

-
- M835e Moreira Brito, Fabio.
 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DOS
 RESÍDUOS DE CAULIM NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
 DE CERÂMICA MARAJORA PARA
 OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO / Fabio Moreira Brito. — 2025.
 90 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Sergio Neves Monteiro Coorientador(a): Prof.
 Dr. Verônica Scarpini Candido Dissertação (Mestrado) - Universidade
 Federal do Pará,
 Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação em
 Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.
1. Caulim. 2. Argila. 3. Resíduos. 4. Materiais Cerâmicos.
 5. Cerâmica Vermelha. I. Título.

CDD 620.11

FABIO MOREIRA BRITO

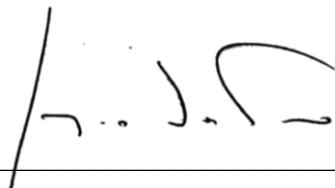
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM
NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE CERÂMICA MARAJORA PARA
OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização, Desenvolvimento e Aplicação de Materiais
Linha de pesquisa: Tecnologia de Materiais

Data de aprovação: 30 / 07 / 2025.

Banca examinadora



Prof. Dr. Sergio Neves Monteiro
Orientador – (PPGCEM/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 VERONICA SCARPINI CANDIDO
Data: 28/08/2025 16:07:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Verônica Scarpini Candido
Coorientadora – (PPGCEM/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 BRUNO APOLO MIRANDA FIGUEIRA
Data: 29/08/2025 13:37:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Bruno Apolo Miranda
Examinador interno(a) – (PPGCEM/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 ARTUR CAMPOS PEREIRA
Data: 28/08/2025 12:54:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Artur Campos Pereira
Examinador externo – (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)

Aos meus pais, pela confiança inabalável em mim, pelo amor constante e pela força de Deus que me guia em cada passo. Sem vocês, nada disso seria possível. Este trabalho é, em grande parte, fruto do exemplo de perseverança e fé que sempre encontrei em vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por nunca me deixar sozinho. Por estar comigo em todas as minhas orações, por me dar força, coragem e por fazer tudo acontecer no tempo certo. Sem Sua presença constante, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço profundamente aos meus pais, Manoel Carivaldo da Silva Brito e Maria Domingos Santos Moreira, por sempre acreditarem em mim e se orgulharem do que sou e do que conquistei. O amor e apoio de vocês foram o alicerce que sustentou essa caminhada.

Expresso minha gratidão à Paulina Quaresma e ao Nelson Rodrigues, que me acolheram em sua casa. Obrigado por acreditarem nos meus sonhos e por fazerem parte deles.

Aos meus amigos, meu carinho eterno. Em especial à minha amiga e colega de curso, Taiana Matos, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio, incentivo e parceria nos trabalhos acadêmicos. Nosso trabalho em equipe foi essencial.

À minha amiga Jucilene, meu agradecimento especial pelo apoio em tantas horas, pelo incentivo constante e pelo apoio moral que tanto me fortaleceram ao longo dessa caminhada.

Sou grato à Dra. Professora Verônica Scarpini, minha coorientadora, por nunca soltar a minha mão. Por confiar na minha capacidade, me acompanhar em todos os espaços e estar sempre presente com palavras de encorajamento e por me orientar com dedicação e paciência.

Ao meu orientador, o professor Dr. Sérgio Neves, meu profundo agradecimento por confiar no meu potencial, me acolher no seu grupo de pesquisa.

Aos meus colegas de bancada e de mestrado, obrigado pela convivência leve, pela parceria nos desafios do dia a dia e pela torcida mútua. Crescemos juntos.

Agradeço ainda a todos os professores do programa, que contribuíram com seus conhecimentos e experiências na construção da minha trajetória acadêmica.

Muito obrigado a todos que, de alguma forma, caminharam comigo até aqui.

“Cerâmicas são compostos entre elementos metálicos e não metálicos; elas são mais frequentemente óxidos, nitretos e carbetos.”
(Callister; Rethwisch, 2011, p. 2).

RESUMO

Os efeitos das alterações climáticas globais estão ocorrendo em um ritmo sem precedentes. Por essa razão, as atividades humanas precisam urgentemente de uma mudança de paradigma para interromper esse processo entrópico antes que as consequências se tornem irreversíveis. Nesse contexto, a utilização de materiais altamente ecoeficientes visa neutralizar convenientemente o CO₂. Este trabalho tem como objetivo a incorporação dos resíduos de Caulim KDI (argiloso) e KAI (arenoso) nas propriedades e nas microestruturas de massa argilosa, verificando sua resistência mecânica após o processo de queima em temperaturas de 750 e 950 °C. Dentro desse contexto, foram testadas seis formulações, variando de 0% a 50% de resíduo de caulim. Os corpos de prova foram prensados uniaxialmente em formato cilíndrico e depois submetidos a queima de 750°C e 950°C por 2 horas em temperatura patamar. As matérias-primas foram submetidas a ensaios que proporcionaram uma caracterização abrangente das suas propriedades, como difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX), microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e técnicas de Difração a Laser (DLS). Após os materiais serem mesclados e dispostos em corpos de prova em diferentes composições, foram prensados uniaxialmente em matrizes cilíndricas e submetidos ao teste de compressão. Os resultados mostraram a viabilidade do uso desses resíduos, sendo favoráveis à incorporação em cerâmica vermelha, para a fabricação de produtos cerâmicos com características permitidas pelas normas vigentes.

Palavras-chave: Caulim; argila; resíduos; materiais cerâmicos; cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The effects of global climate change are occurring at an unprecedented pace. For this reason, human activities urgently require a paradigm shift to halt this entropic process before the consequences become irreversible. In this context, the use of highly eco-efficient materials aims to conveniently neutralize CO₂. This study aims to incorporate Kaolin waste—KDI (clayey) and KAI (sandy)—into the properties and microstructures of clay mass, assessing its mechanical strength after firing at temperatures of 750 and 950 °C. Within this framework, six formulations were tested, varying from 0% to 50% kaolin waste. The specimens were uniaxially pressed into cylindrical shapes and then subjected to firing at 750 °C and 950 °C for 2 hours at peak temperature. The raw materials underwent tests that provided a comprehensive characterization of their properties, such as X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and laser diffraction techniques (LD). After mixing and forming the materials into test specimens with different compositions, they were uniaxially pressed in cylindrical molds and subjected to compression testing. The results demonstrated the feasibility of using these wastes, showing favorable outcomes for their incorporation into red ceramics for the production of ceramic products in compliance with current standards.

Keywords: Kaolin, clay, residues, ceramic materials and red ceramics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Análise granulométrica	17
Figura 2: Mapa de localização dos municípios Arquipélago do Marajó, estado do Pará	19
Figura 3: Resistência à compressão simples de tijolos solo-cimento com incorporação de 40%.....	31
Figura 4: Distribuição granulométrica das argilas: Caulim (a) e resíduo de caulim (b)	32
Figura 5: Micrografias (3000X) para as matérias primas argilosas: (a) caulim comercial (b) resíduo de caulim.....	32
Figura 6: Material passante em peneira de abertura de 300µm (a) Argila Marajoara (AM), (b) Resíduos do Caulim argiloso (KDI) e (c) Resíduo de Caulim arenoso (KAI)	37
Figura 7: Fluxograma Experimental	38
Figura 8: Corpos de prova moldados para avaliação experimental	39
Figura 9: Difratoograma da Argila Marajoara.	44
Figura 10: Difratoograma dos resíduos de caulim. a) KDI e b) KAI.....	45
Figura 11- Micrografia das matéria-primas. (a) Argila Marajoara, (b) resíduo KDI e (c) resíduo KAI.	45
Figura 12: Densidade por dispersão da Argila Marajoara.....	47
Figura 13: Densidade por dispersão dos resíduos (a) Resíduo Caulim Argiloso (KDI) (b) Resíduo Caulim Arenoso (KAI)	48
Figura 14: Curva de distribuição de tamanho de partícula da Argila Marajoara e resíduos KDI e KAI	50
Figura 15: Absorção de água de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 e 950°C).	53
Figura 16: Retração das composições sob diferentes temperaturas.	56
Figura 17: Análise da massa específica aparente das composições sob diferentes temperaturas	60
Figura 18: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 °C e 950°C).	61
Figura 19- Micrografia de MEV das formulações queimadas a 750°C. (a) 100AM. (b) 80AM10KDI10KAI. (c) 50AM25KDI25KAI.	65
Figura 20: EDS das formulações queimadas a 750°C, na faixa de variação de massa específica. (a) 100AM. (b) 80AM10KDI10KAI. (c) 50AM25KDI25KAI.	67
Figura 21: Micrografia de MEV das formulações queimadas a 950°C. (a)100AM. (b) 80AM10KDI10KAI (c) 50AM25KDI25KAI.. Aumento: 500x.	68
Figura 22: EDS das formulações queimadas a 950°C. (c) 100AM. (b) 80M10KDI10KAI. (c) 50M25KDI25KAI.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química das argilas estudadas por diversos autores.	16
Tabela 2: Composição química das argilas (% em peso)	18
Tabela 3: Composição química das argilas (% em peso)	18
Tabela 4: Propriedade mecânica de materiais cerâmicos	26
Tabela 5: Composição química dos resíduos do Caulim estudado por diversos autores.	30
Tabela 6: Composição em peso das matérias-primas utilizadas. AM – Argila Marajoara, KDI- Caulim argiloso; KAI – Caulim arenoso.....	39
Tabela 7- Composição química (% em peso) AM – Argila Marajoara, KDI- Caulim argiloso; KAI – Caulim arenoso.....	43
Tabela 8: Umidade higroscópica (% em peso).....	47
Tabela 9: Resultados dos limites de Atterberg	49
Tabela 10: Resultados do modelo de distribuição de partículas - AM – Argila Marajoara, KDI- Resíduo do Caulim argiloso; KAI – Resíduo do Caulim arenoso	51
Tabela 11: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de absorção de água dos corpos de provas queimados em temperatura de 750°C e 950°C.	54
Tabela 12: Análise Tukey para os resultados de absorção de água dos corpos de provas queimados na temperatura 750 °C e 950 °C.	55
Tabela 13: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de retração diametral de queima.....	57
Tabela 14: Análise Tukey para os resultados de retração diametral dos corpos de provas queimados na temperatura 750 °C e 950 °C.	58
Tabela 15: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de retração diametral de queima.....	61
Tabela 16: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 °C e 950°C).	62
Tabela 17: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de compressão.	64
Tabela 18: Teste de Tukey dos resultados de Resistência à compressão	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2.1. Materiais Cerâmicos.....	14
2.1.1 Argilas	15
2.1.2 Argila Marajoara	18
2.1.3 Cerâmica vermelha e sustentabilidade	20
2.2 O papel da indústria cerâmica vermelha na construção civil.....	21
2.2.1. Panorama da indústria cerâmica no Pará	23
2.3 Resíduos Sólidos Industriais e seus impactos ambientais	24
2.3.1 Quanto à sua classificação.....	27
2.3.2 Contribuição de resíduos sólidos para o processo industrial da Cerâmica Vermelha.....	28
2.3.3 Resíduo do Caulim.....	29
2.3.4 Tijolo ecológico: Uma solução a partir da inserção de resíduos.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Materiais Utilizados.....	37
3.2 – Etapas Experimentais.....	37
3.2.1 – Beneficiamento das matérias-primas	38
3.2.2 – Caracterização das Matérias-primas.....	38
3.2.2.1 –Fluorescência de raios-X.....	39
3.2.2.2 – Difração de raios-X (DRX).....	39
3.2.3 – Preparação das Composições e confecção dos corpos de prova	39
3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS	40
3.2.5 Propriedades físicas e mecânicas.....	40
3.2.5.1 – Umidade higroscópica.....	40
3.2.5.2 – Densidade por dispersão (ensaio de sedimentação)	40
3.2.5.3 –Plasticidade.....	41
3.2.5.4 – Distribuição de tamanho de partícula das matérias-primas.....	41
3.2.5.5 Absorção de água (AA).....	41

3.2.5.6 Retração Diametral de queima	41
3.2.5.7 Massa específica aparente	42
3.2.5.8 Ensaio de compressão	42
3.2.5.9 Análise estatística	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Caracterização das matérias-primas.....	43
4.1.1 Fluorescência de raios-X das matérias-primas	43
1.2 Difração de raios-X (DRX).....	44
3.4 Caracterização morfológica das matérias primas	45
3.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	45
3.2.4 Propriedades físicas e mecânicas	46
4.1.3.2 – Umidade higroscópica	46
4.1.3.3 – Densidade por dispersão (sedimentação).....	47
3.5.1 – Plasticidade.....	48
3.3 Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas	50
3.5.2 Absorção de Água	52
3.5.3 Retração Diametral de Queima	56
3.5.4 Massa específica aparente	59
3.5.5 Resistência à compressão uniaxial.....	61
3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

No setor da engenharia, produtos cerâmicos derivados da argila desempenham um papel crucial na fabricação de materiais essenciais para a construção civil, cuja qual está presente em uma enorme variedade de materiais no dia a dia, desde blocos de vedação para fins estruturais, assim como telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos (Almeida, Soares, Matos, 2020; Masuero 2021). Nesse contexto, a construção civil não apenas impulsiona a economia através da variedade de produtos, mas também desempenha um papel estratégico fundamental na geração de renda e empregos no país (CBIC, 2021).

Os materiais cerâmicos são materiais sólidos inorgânicos não metálicos conhecidos por sua ampla gama de propriedades físicas e químicas que os tornam essenciais em diversas aplicações industriais e tecnológicas. Compostos por elementos como óxidos metálicos, nitretos e carbonetos. Suas propriedades são resultantes de ligações predominantemente iônicas ou covalentes entre os átomos (Locatelli, 2025)

Essa versatilidade permite que os materiais cerâmicos sejam utilizados em uma ampla gama de aplicações, desde componentes estruturais em aeronaves até dispositivos médicos implantáveis e substratos eletrônicos (Vilela *et al.*, 2020).

Dentro da classe dos materiais cerâmicos, destaca-se a cerâmica vermelha, sendo fundamental na construção civil para a fabricação de tijolos, telhas e revestimentos. Materiais esses que podem ser feitos de argila, entendida como um material natural não renovável composto por minerais de silicatos hidratados, como a caulinita, a montmorilonita e a illita, entre outros. A versatilidade e abundância da argila a tornam um recurso valioso em diversas indústrias ao redor do mundo. (Masuero 2021; Doğan-Sağlamtimur *et al.*, 2021).

O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm ou 4 μm (Ebadi Jamkhaneh; Ahmadi; Shokri, 2021).

A mineração de argila pode resultar em degradação do solo, desmatamento e destruição de habitats naturais. A remoção da camada superficial do solo pode provocar erosão e redução da biodiversidade (Cavalcante *et al.*, 2021). Portanto, é crucial buscar alternativas sustentáveis que preservem as propriedades essenciais dos materiais sem depender exclusivamente deste

recurso não renovável. Dentro desse contexto, a busca pelo desenvolvimento do melhor produto final, principalmente quando se refere à atividade de construção civil onde a procura pela inovação e sustentabilidade é requisito indispensável (Magalhães 2021).

Nesse contexto, os resíduos de caulim tornam-se grandes aliados na substituição de materiais naturais. Esses resíduos são subprodutos ou sobras resultantes do beneficiamento do caulim, um mineral argiloso usado principalmente nas indústrias de cerâmica, papel, tintas e cosméticos. Frequentemente, são compostos por partículas finas de caulim que não atendem aos padrões de qualidade exigidos para as aplicações finais, podendo incluir também impurezas e outros materiais inertes (Prasanphan et al., 2023).

Apesar de ser considerado um subproduto, o resíduo de caulim possui potencial para reutilização e reciclagem em diversas aplicações industriais, como em materiais de construção, como agregados para concreto e argamassa, e em processos de remediação ambiental devido à sua baixa toxicidade e capacidade de adsorção de poluentes. A gestão eficiente desses resíduos é crucial para mitigar impactos ambientais e promover a sustentabilidade na indústria extrativa de minerais (Rezende *et al.*, 2008).

Dessa forma, inserção de resíduos sólidos como o caulim à massa argilosa pode ser uma alternativa para diminuir o uso de matérias-primas naturais e proporcionar melhor resistência mecânica ao produto final. Essa abordagem não apenas fortalece a eficiência dos processos, mas também contribui para práticas mais sustentáveis na indústria cerâmica (Magalhães, 2021).

Rezende e colaboradores (2008) encontraram valores acima de 1 MPa, para blocos de vedação observaram que os blocos com 40 e 70% de resíduo apresentam valores dentro das especificações, espera-se que os blocos em estudo possam ser utilizados na construção de habitações populares e instalações agrícolas nas cidades circunvizinhas dos locais geradores deste resíduo.

Alves *et al.* (2016) estudaram um mecanismo de sinterização assistida em fase líquida associado a um teor de mica variando de 13,3 a 22,4 % em peso levou à formação de cerâmicas de alta qualidade e boa resistência a partir de resíduos de caulim.

Nesse sentido, serão desenvolvidas formulações de massa cerâmica com argila do Marajó e resíduos de caulim (KAI e KDI), que serão testadas e analisadas por meio de processos experimentais, em conformidade com as normas vigentes, como a de absorção (NBR 15270-2), massa aparente (ASTM C 373-72, 1997), retração diametral (ABNT NBR 1381) e compressão (NBR 5739). Com isso, busca-se não apenas a produção de um material cerâmico inovador, mas também de baixo custo, que incorpore avanços na fabricação e apresente flexibilidade, durabilidade e resistência.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação do resíduo de caulim na argila localizada no Arquipélago do Marajó, em relação as propriedades tecnológicas e microestruturais da massa argilosa visando a aplicação em tijolo ecológico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias-primas utilizadas na massa cerâmica quanto à composição mineralógica, composição química e morfológica, empregando técnicas de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difração de raios-X (DRX).
- Investigar as características físicas dos solos por meio de ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade;
- Analisar os efeitos da incorporação de resíduos de caulim na microestrutura da cerâmica, utilizando a técnicas avançadas de caracterização de microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Investigar o impacto da incorporação de diferentes proporções de resíduos de caulim na formulação de cerâmica quanto às propriedades físicas, químicas e mecânicas do material.

2.1. Materiais Cerâmicos

A palavra "cerâmica" tem origem na palavra grega "*keramikos*", que se traduz como "matéria queimada". Isso reflete a prática de submeter esses materiais a altas temperaturas por meio de um processo chamado queima ou cozimento, fundamental para obter as propriedades desejadas, como resistência e durabilidade (De Souza Santos; Santos, 1989).

Além disso, estruturalmente os materiais cerâmicos são predominantemente inorgânicos e compostos principalmente por elementos metálicos e não metálicos. Suas ligações interatômicas podem ser totalmente iônicas ou covalentes, muitas vezes com alguma natureza covalente. Essas características contribuem para propriedades específicas, como alta resistência térmica e dureza, tornando-os valiosos em várias aplicações (Almeida, Soares, Matos, 2020; Masuero 2021).

Os materiais cerâmicos podem ser classificados em dois grandes grupos. Cerâmicas tradicionais utilizadas principalmente na fabricação de tijolos, azulejos e louças com ampla aplicação na construção civil e em utensílios domésticos e produzidas a partir de argilas e outros materiais naturais. E cerâmicas avançadas que incluem compostos como óxidos, nitretos e carbeto a exemplo da alumina (Al_2O_3), do carbeto de silício (SiC) e do nitreto de silício (Si_3N_4) empregados em aplicações de alta tecnologia devido às suas propriedades superiores (Otitoju, *et al.*, 2020).

Logo a evolução contínua das técnicas de fabricação e a pesquisa em novas formulações visam melhorar suas propriedades e expandir seu campo de aplicação em diferentes setores industriais e tecnológicos (Magalhães, 2021).

A cerâmica é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações, desde as mais simples até as mais avançadas. Devido ao seu alto ponto de fusão, as cerâmicas são resistentes a altas temperaturas, sendo empregadas na construção de fornos siderúrgicos e na proteção térmica de ônibus espaciais. Elas também servem como isolantes térmicos em resistores e capacitores. (Santos; Rabelo, 2021).

Atualmente, as propriedades dos materiais cerâmicos são objeto de grande interesse científico, visando o desenvolvimento de cerâmicas tecnológicas com propriedades inovadoras em áreas como catálise ambiental, saúde e agricultura (Santos, Rabelo, 2021).

2.1.1 Argilas

Argila é um material inorgânico natural de granulometria fina, composto por minerais como caulinita, montmorilonita e outros filossilicatos em escala microscópica. Ao ser misturada com água, exibe comportamento plástico, podendo ser moldada e manter sua forma sem se desfazer. Isso se deve à sua capacidade de reorganização molecular quando manipulada com água, permitindo que as partículas deslizem e se rearranjem, garantindo a coesão necessária para formar diferentes estruturas e formas desejadas μm (Ebadi Jamkhaneh; Ahmadi; Shokri, 2021).

Além disso, essas partículas são compostas principalmente por argilominerais, que são silicatos filossilicatos caracterizados por folhas tetraédricas de silício e octaédricas de alumínio, podendo incluir magnésio e/ou ferro em menor frequência (Vilela *et al.*, 2020).

A matéria-prima fundamental na indústria de cerâmica vermelha são as argilas comuns, que se caracterizam por sua composição mineral. Essas argilas são capazes de adquirir tonalidades avermelhadas após serem queimadas em temperaturas que variam de 800 a 1.250°C (Doğan-Sağlamtimur *et al.*, 2021). Utilizadas extensivamente na produção de blocos de vedação, blocos estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos, as argilas comuns são conhecidas por sua fina granulometria, conferindo-lhes propriedades como plasticidade quando misturadas com água em quantidades específicas. Isso proporciona excelente trabalhabilidade e resistência tanto no estágio inicial quanto após a queima, características cruciais para a fabricação de uma variedade de produtos cerâmicos (Ebadi Jamkhaneh; Ahmadi; Shokri Amiri, 2021).

De acordo com ABCERAM (2016) as argilas são materiais naturais com textura terrosa e granulação fina. Material este constituído principalmente de argilominerais, como caulinita e haloisita. Os argilominerais conferem propriedades específicas às argilas, como plasticidade, compactação e resistência mecânica após secagem e queima, tornando-as valiosas em várias aplicações industriais e artesanais.

Segundo Lima Silva e Perreira (2021) os argilominerais, são predominantemente classificados no grupo dos filossilicatos. Eles são quimicamente compostos por silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, podendo conter elementos como ferro, potássio, lítio, entre outros. A estrutura desses minerais é caracterizada por folhas tetraédricas e octaédricas bidimensionais e contínuas, o que facilita os deslizamentos entre as camadas, conferindo às argilas sua plasticidade única e outras propriedades essenciais. A tabela 1 apresenta a composição química de diversas argilas.

Tabela 1: Composição química das argilas estudadas por diversos autores.

Composição química (% em peso)					
	Lima Silva, Pereira (2021)	Racanelli <i>et al.</i> , (2020) Argila forte	Racanelli <i>et al.</i> , (2020) Argila fraca	Silva Magalhães; Almeida; Gomes (2022)	Oliveira <i>et al.</i> , (2022)
SiO₂	23,71	59,03	66,39	65.65	77,59
Al₂O₃	14,06	26,75	18,74	17.62	18,86
K₂O	0,59	3,31	4,36	5.26	0,25
CaO	0,25	-	0,97	0.65	0,10
TiO₂	0,79	1,80	1,63	1.34	1,81
Fe₂O₃	10,63	9,09	7,75	7.60	1,13
MnO	0,01	-	0,14	0.09	0,01
P₂O₅	0,84	-	-	-	<0,01
Cl₂O	0,25	-	-	-	-
MgO	-	-	-	1.27	<0,01

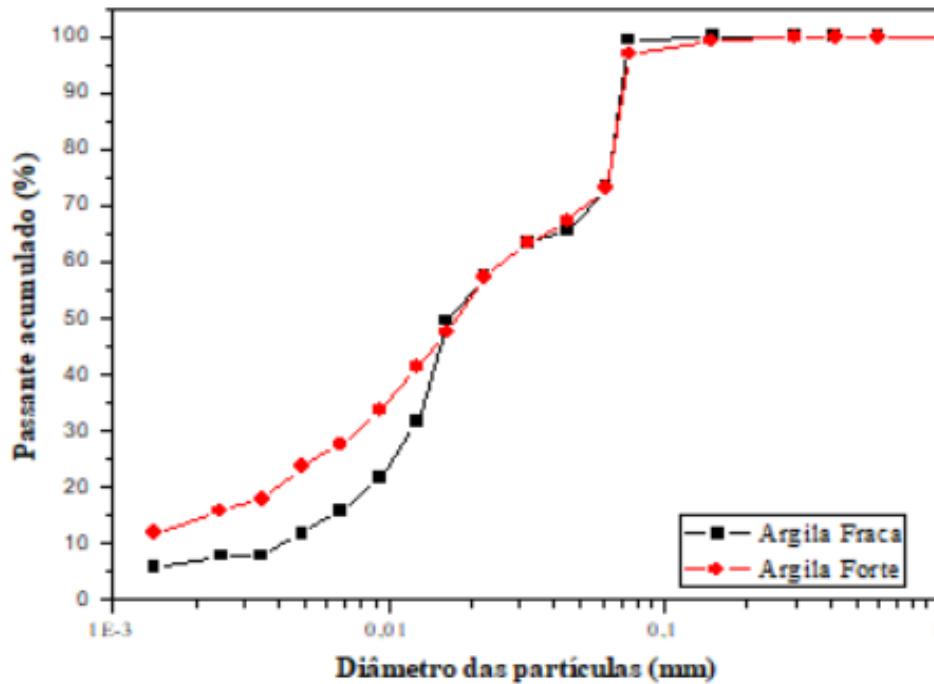
Nos estudos de Lima Silva e Pereira (2021), os resultados revelam teores significativos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ em todas as argilas, com altas porcentagens de K₂O nas argilas A2 e A3. As características estruturais incluem vibrações Al₂-OH, Si-O, Si-O-Al e Si-OH, indicando grupos funcionais em argilominerais. Além disso, presença de grãos lamelares e arredondados, aglomerados e dispersos, destacam-se, assim como concentrações abaixo de 2 µm em todas as amostras. No mesmo estudo os autores destacam o potencial da argila caracterizada direcionada para a confecção de telhas, tijolos e blocos cerâmicos, requerendo controle rigoroso da granulometria.

Os estudos de Racanelli e colaboradores (2020) apontam para uma similaridade na composição química das duas argilas estudadas (Argila forte e argila fraca), com diferenças nos percentuais de óxidos. Destacam-se a sílica e a alumina como predominantes, seguidas pelo óxido de ferro (Fe₂O₃), que, acima de 4%, contribui para a coloração avermelhada dos blocos de vedação após tratamento térmico. Nota-se que a presença de K₂O pode favorecer a formação de fase líquida durante a queima assim como a Perda ao Fogo (PF), ela ocorre devido à eliminação de água, desidratação de hidróxidos e oxidação da matéria orgânica. Os resultados das perdas ao fogo nas duas argilas mostram-se dentro da normalidade para fabricação de

materiais cerâmicos, abaixo de 13%, onde a argila forte apresentou perda ao fogo de 12,19% e argila fraca 5,38%.

No estudo de Racanelli e colaboradores (2020), também foram realizadas as análises granulométricas das duas argilas de acordo com figura 1.

Figura 1: Análise granulométrica



Fonte: (Racanelli *et al.*, 2020).

Conforme a figura 1, os dados coletados nas argilas mostram que na Argila Forte, fração argila é de 14,24%, enquanto na Argila Fraca é de 7,12%. A fração silte, que engloba partículas entre 0,002 e 0,02 mm, representa 45,94% na Argila Forte e 47,68% na Argila Fraca. Já a fração "areia", com partículas maiores que 0,02 mm, representa 39,82% na Argila Forte e 45,20% na Argila Fraca (Racanelli *et al.*, 2020).

Silva Magalhães e Colaboradores (2022) destacaram em seus resultados da caracterização química das matérias-primas, que a argilas citada na tabela 2, denominada de Argila A e B, é composta em sua maioria por SiO_2 e Al_2O_3 , da massa de argila. De fato, o SiO_2 desempenha um papel preponderante na constituição das argilas, geralmente presente na forma de grãos de quartzo.

Tabela 2: Composição química das argilas (% em peso)

Matéria-prima	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	K₂O	TiO₂	MgO	MnO	LoI
Argila A	65.65	17.62	7.60	0.65	5.26	1.34	1.27	0.09	7.58
Argila B	72.04	17.90	3.65	-	3.85	1.29	0.67	0.50	6.91

Fonte: (Silva Magalhães *et al.*, 2022).

Além de conferir estabilidade mineral, sua presença favorece a trabalhabilidade das argilas, contribuindo para redução do tempo de secagem e minimização da retração durante os processos de secagem e queima. Segundo os estudos, a cor avermelhada da Argila A é atribuída ao seu elevado teor de óxido de ferro (Fe₂O₃), geralmente observado em valores acima de 4%. Além disso, outros óxidos como CaO, MgO e K₂O atuaram como fundentes durante o processo de queima, facilitando a formação de uma fase líquida crucial para consolidar as partículas. Isso resultou na redução da porosidade e no aumento da retração linear durante a queima (Silva Magalhães *et al.*, 2022).

Silva Magalhães e Colaboradores (2022) apresentaram em seus estudos os resultados da plasticidade tanto Argila A e B. Conforme a tabela 3.

Tabela 3: Composição química das argilas (% em peso)

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação
Argila A	38.05	22.01	16.04	Altamente plástica
Argila B	25.97	16.23	9.75	Plástica média

Fonte: Silva Magalhães *et al.*, 2022).

Pode-se afirmar que a Argila A apresenta informações sobre limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) relevantes para matérias-primas e formulações. Valores de IP acima de 10% indicam que a argila está dentro de uma faixa considerada aceitável para a produção de tijolos e azulejos, classificando os solos como médios plásticos ($7 < IP < 15$) (Silva Magalhães *et al.*, 2022).

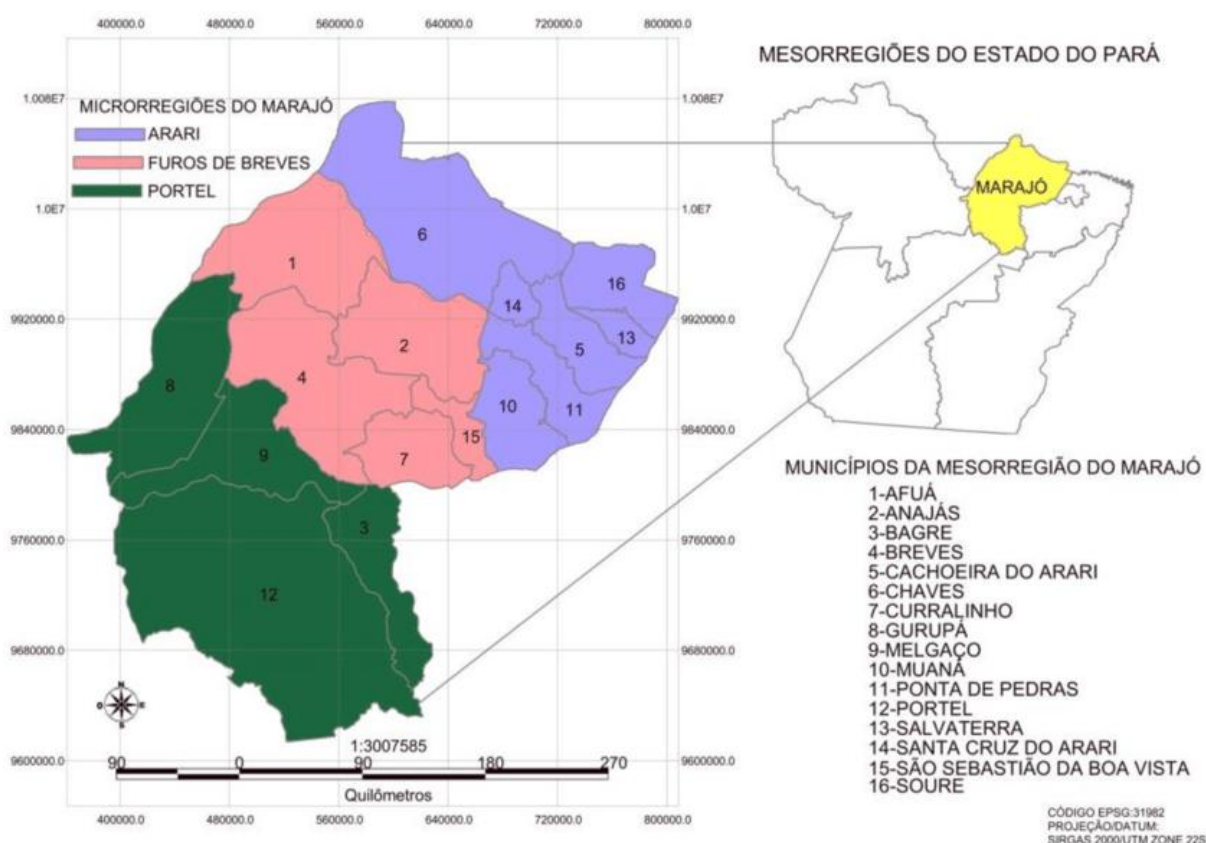
2.1.2 Argila Marajoara

A Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2022) ressalta que o processo da confecção da cerâmica no Brasil tem registros iniciais na Ilha de Marajó, no estado do Pará, onde a cultura indígena desenvolveu cerâmica atendendo suas necessidades. Os artefatos produzidos na região exibem uma especialização artesanal notável, incluindo técnicas como

raspagem, incisão, excisão e pintura. Essa expressão cultural demonstra a riqueza da diversidade e habilidade das comunidades indígenas na criação de peças cerâmicas significativas.

Com base nesse contexto, a Figura 1 apresenta a localização da Ilha de Marajó, destacando os municípios pertencentes ao arquipélago, inclusive a cidade de Curralinho, área em que se concentra o presente estudo.

Figura 2: Mapa de localização dos municípios Arquipélago do Marajó, estado do Pará



Fonte: (Crispim *et al.*, 2016)

A partir dessa contextualização espacial, torna-se evidente que, na vasta Amazônia, as cerâmicas representam artefatos significativos e abundantes em vestígios arqueológicos, revelando a riqueza das tradições indígenas. Embora haja outros artefatos importantes, como cestarias, objetos com penas, cuias, objetos em madeira, flautas em osso e colares de sementes, as cerâmicas destacam-se por transmitir tradições de saber-fazer, relações sociais e universos simbólicos dos povos que as produziam e utilizavam (Quinzani, 2022).

Os grafismos da Cultura Marajoara ganharam reconhecimento como uma linguagem artística valiosa, especialmente devido ao novo olhar de estudiosos e artistas sobre as produções dos povos nativos, que não se conteve em elencar importantes marcos com a criação de uma

tradição em torno dos resquícios da cerâmica arqueológica foi impulsionada pelo estudo científico, que não apenas aproxima, mas também torna contemporânea essa expressão artística. Que se vale a grande importância da apropriação do valor histórico e estético-visual desses objetos que contribui para uma apreciação renovada e uma compreensão mais profunda da rica herança cultural da Cultura Marajoara (Pascoal, 2020).

Na abordagem da produção cerâmica da comunidade Vila Cuera, no estado do Pará, Brasil, que através de conhecimentos tácitos adquiridos, aborda na produção de materiais a inclusão do Caraiapé, uma substância antiplástica proveniente de plantas do gênero *Licania*, na produção oleira. Esse é um exemplo vívido da herança dos conhecimentos indígenas que continua a contribuir para a prática artesanal e para a compreensão das propriedades e potenciais da argila Marajoara (Rosário; Farias, 2023).

A utilização do Caraiapé, proveniente das cinzas da casca e entrecasca de plantas do gênero *Licania*, na pasta de argila, demonstra uma conexão tangível com técnicas ancestrais. Essa prática, com suas variações nas proporções e granulações, é uma representação concreta das tradições transmitidas de geração a geração entre as populações tradicionais. Essa continuidade de conhecimentos e práticas reforça a importância da preservação e valorização das técnicas antigas na produção cerâmica, mantendo viva a herança cultural (Rosário; Farias, 2023).

Rosário e Farias (2023) ainda aponta que a produção de cerâmica tradicional na Vila Cuera, no estado do Pará, destaca-se pela sua relevância histórico-cultural, pois essa atividade preserva antigas tecnologias utilizadas pelos povos que habitaram a região amazônica, criando cerâmicas e artefatos utilitários de argila conhecidos por sua resistência e durabilidade, características que perduram até os dias atuais.

Os caminhos das escavações arqueológicas que revelam um passado que proporciona saberes sobre como as culturas tradicionais possuíam conhecimentos profundos sobre os fenômenos físicos na produção oleira, contribuindo assim para a compreensão da rica herança cultural da região e principalmente como esses materiais começaram a ser utilizados do conhecimento tácito e de grande importância para a cerâmica vermelha (Rosário; Farias, 2023).

2.1.3 Cerâmica vermelha e sustentabilidade

O uso constante da matéria-prima natural na cerâmica vermelha faz com que se abra uma discussão no futuro das atividades produtivas das cerâmicas vermelhas que precisa ser cuidadosamente considerado diante das questões ambientais, abre-se um debate em torno da

inclusão de novas formas de industrialização mais sustentáveis (Santos; Castilho; Oliveira Costa, 2021).

De forma estratégica, a busca por uma produção sustentável é fundamental para as empresas de cerâmica, especialmente diante do crescimento contínuo e desenvolvimento do setor. Ao adotar práticas sustentáveis, como a gestão eficiente de resíduos, o uso responsável de recursos naturais e a implementação de tecnologias mais limpas, as empresas podem não apenas atender às demandas do mercado, mas também contribuir para a redução do impacto ambiental historicamente associado ao setor ceramista. Essa abordagem alinha-se com as expectativas crescentes da sociedade em relação à responsabilidade ambiental das empresas. (Nascimento, 2022).

As inovações voltadas à sustentabilidade nas indústrias de cerâmica vermelha são essenciais para minimizar impactos ambientais. A implementação de práticas como o uso de tecnologias mais eficientes, reciclagem de resíduos não apenas eleva a pegada ecológica, como também impulsiona a eficiência operacional, alinhando a produção de cerâmica vermelha aos princípios sustentáveis necessários para preservar o meio ambiente. (Voanka *et al.*, 2022).

Essa abordagem pode inspirar outras empresas a reavaliar seus processos produtivos, incorporando inovações para aprimorar o desempenho ambiental, social e a competitividade no mercado. (Voanka *et al.*, 2022)

O segmento de cerâmica, necessita de estudos aprimorados onde permitirá a melhor forma possível de produção mais limpa resultando em melhores materiais que contribuam em uma confecção com qualidade e sustentabilidade. (Nascimento, 2022).

2.2 O papel da indústria cerâmica vermelha na construção civil

A cerâmica é, de fato, um dos sucessos úteis mais antigos da humanidade, por conta de sua resiliência desde os tempos pré-históricos, as sociedades têm utilizado a cerâmica para criar utensílios, recipientes, artefatos decorativos e, mais tarde, para a produção de materiais de construção (Rio *et al.*, 2022).

A indústria de cerâmica vermelha desempenha um papel significativo na economia brasileira, contribuindo para setores como construção civil e infraestrutura. abrangendo materiais como tijolos, blocos, telhas, lajes, tubos cerâmicos, argilas expandidas e utensílios de uso doméstico (Pinto, 2021). Em números importantes a fabricação da cerâmica vermelha, vem contribuindo com cerca de 1% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Notavelmente,

aproximadamente 40% desse setor é representado por olarias de cerâmica vermelha. (ANICER, 2021).

Os dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) e da Associação Nacional da Indústria Cerâmica- (Anicer, 2023) indicam a presença de aproximadamente 5.400 empresas no setor cerâmico no Brasil. Essas empresas produzem mais de 4,6 bilhões de blocos cerâmicos e empregam cerca de 111 mil funcionários diretos, destacando a relevância econômica e o impacto no emprego do setor.

No contexto produção, houve a necessidade de construção rápida e em larga escala que impulsionou a transição das formas tradicionais para a introdução de materiais pré-fabricados, como o tijolo. Essa mudança ofereceu eficiência na construção, facilitando a montagem de estruturas de maneira mais rápida e padronizada. (Spiller, 2023).

Entende-se que esses materiais têm a capacidade de absorver e liberar calor lentamente, contribuindo para um ambiente mais estável termicamente. Além disso, a durabilidade e resistência desses produtos impactam positivamente na eficiência energética a longo prazo, reduzindo a necessidade de sistemas de climatização intensivos (Fratel *et al.*, 2020).

Porém, é notório as poucas inovações ainda no processo de fabricações de materiais pelas indústrias, dito isso, a fabricação de tijolos, ao longo da história, evoluiu principalmente por meio da transmissão do conhecimento de geração em geração, sem uma abordagem científica estruturada. Visto que é perceptível abordar a tecnologia de produção baseada em fornos, que mudou relativamente pouco desde seu desenvolvimento há milhares de anos (Valdes *et al.*, 2020).

Tal fato pode ser atribuído à falta de conhecimento ou incentivos locais em implementar tecnologias adotadas de práticas mais avançadas, isso, por vezes, é influenciado pela ausência de incentivos ou regulamentações. A criação de políticas e incentivos pode ser crucial para impulsionar a adoção de tecnologias mais eficientes e sustentáveis no setor (Rio *et al.*, 2022).

De acordo com a ABCERAM (2023), dentro deste cenário de desenvolvimento, as regiões Sudeste e Sul do Brasil se destacaram em desenvolvimento devido à maior densidade demográfica, atividade industrial e agropecuária, infraestrutura aprimorada, distribuição de renda mais equitativa e acesso facilitado a matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas.

2.2.1. Panorama da indústria cerâmica no Pará

O Polo Cerâmico no Estado do Pará é um importante setor da economia local, especialmente devido à produção de cerâmica vermelha, que inclui tijolos e telhas. Segundo Silva e Araújo Ichihara (2016) a localização das indústrias de cerâmica vermelha é influenciada principalmente pela proximidade das jazidas de argila e dos mercados consumidores, devido ao alto volume e peso da matéria-prima que exigem transporte.

O Pará se destaca na região norte do Brasil, por possuir o maior número de empresas de cerâmica vermelha, distribuídas em cerca de sete microrregiões: São Miguel do Guamá, proximidades de Belém, Abaetetuba, Santarém, Bragança, São Sebastião da Boa Vista e Marabá (Silva; Araújo Ichihara, 2016).

Entre essas, São Miguel do Guamá é o principal distrito industrial cerâmico da região norte, com aproximadamente 42 fábricas. Este município está localizado a 144 km de Belém e é responsável por mais de 3 mil empregos diretos, com uma produção mensal de cerca de 30 milhões de tijolos e 9 milhões de telhas. São Miguel do Guamá contribui com 92% da produção estadual de cerâmica vermelha, atendendo principalmente o mercado interno do Pará, com uma pequena parte da produção sendo exportada para o estado vizinho do Maranhão (Rocha *et al.*, 2013).

Os municípios de São Miguel do Guamá e Irituia contêm um grande potencial de exploração de minerais de classe dois (minerais utilizados na construção civil). Além disso, São Miguel do Guamá é um dos principais municípios do Estado que promove a extração de argilas vermelhas usadas na produção de telhas e tijolos para a construção civil. Este município foi até pouco tempo um dos maiores produtores de seixo da região nordeste do Pará, perdendo sua posição para Ourém, devido à exaustão das reservas (Silva; Araújo Ichihara, 2016).

As argilas são os recursos minerais mais importantes da região, sendo utilizada como matéria-prima na fabricação de telhas e tijolos nos municípios enfocados (Silva; Araújo Ichihara, 2016).

Geralmente, após a extração de qualquer atividade mineradora, há o abandono da área explorada, tornado a região infértil e inutilizada para outras atividades. (Santos, 2016)

As áreas formadas por cavas após retirada de argila localizadas nesses municípios são desenvolvidas a partir da utilização de pás mecânicas e retroescavadeiras, que produzem cavas retangulares de medidas não específicas. A exploração dessas áreas é feita por cerca de 42 olarias que se encontram imediatamente ao redor das cidades de São Miguel do Guamá e Irituia. (Santos, 2016).

Em São Miguel do Guamá e Irituia as argilas são de coloração cinza acastanhado, com concreções ferruginosas e pouco plásticas. Constituem depósitos recentes originados pela ação geológica do Rio Guamá e Irituia, o qual se apresenta em forma andrante no trecho que percorre os municípios (Lima, 2000).

Mais de 90% das áreas de produção em ambos os municípios, se encontram margeando ou nas proximidades dos principais cursos de água da região, esses cursos de água em geral são afluentes diretos dos rios Guamá e Irituia (Goeconômico, Lima, 2000).

A deposição das argilas é fortemente controlada pela hidrodinâmica dos rios. As argilas encontram-se aflorando nessas áreas sem apresentar qualquer tipo de capeamento o que torna mais fácil sua exploração (Ribeiro, 2002). Em São Miguel a partir de 1,5 m de profundidade a coloração da argila se torna cada vez mais escura, provavelmente pelo aumento da concentração de matéria orgânica e ferruginoso presente no horizonte em questão. Em Irituia as características são bem semelhantes, divergindo somente, na espessura do leito argiloso, que é aproximadamente 3 metros. Essa característica é marcada pelo maior distanciamento das áreas de cavas deste município com relação ao leito dos rios (Silva; Araújo Ichihara, 2016).

A estratificação dos leitos argilosos desses dois municípios é marcada pela oscilação das zonas de inundações dos rios que demarcam a região, por isso, regiões que se encontram mais adequadamente dentro da zona de inundação, por consequência apresentaram maior nível argiloso e menor conteúdo ferrífero e arenoso (Silva; Araújo Ichihara, 2016).

2.3 Resíduos Sólidos Industrias e seus impactos ambientais

De acordo com o Art. 1º da Res. 001/1986 do CONAMA, impacto ambiental pode ser definido como sendo, alterações provenientes das atividades humanas ao meio ambiente causados por qualquer forma de matéria ou energia que afetam direta ou indiretamente a:

- I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - As atividades sociais e econômicas;
- III - A biota;
- IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - A qualidade dos recursos ambientais.

Além disso, no Brasil é escasso o aproveitamento adequado dos resíduos sólidos, principalmente o doméstico, que em sua maioria não passam por nenhuma triagem para realizar a reciclagem desses materiais (Santos; Aguiar; Gadioli, 2021).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), avaliou também em estudo dados que indicam que a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no país foi diretamente afetada pela pandemia da COVID-19 em 2020, atingindo um total de cerca de 82,5 milhões de toneladas, equivalentes a 225.965 toneladas diárias, o mesmo pode se justificar pelo número de deliveries uma mudança de hábitos recorrentes do acúmulo de lixo nas residências.

A construção civil é um setor com extensa aptidão econômica, tem capacidade de aumentar o índice de contratação e renda, contribuindo para o desenvolvimento social, pontos destacáveis de importância, mas apesar da relevância, o setor de gestão de resíduos consome números consideráveis de recursos naturais, e a geração significativa de resíduos, muitas vezes destinados a aterros irregulares, destaca a necessidade de melhorias na gestão para maximizar o reaproveitamento e minimizar o impacto ambiental (Melo; Ferreira; Rodrigues, 2022).

Para Gomes, a construção civil, ao utilizar uma considerável quantidade de recursos naturais, enfrenta desafios significativos, como a produção excessiva de Resíduos de Construção Civil (RCCs), logo a destinação inadequada desses resíduos pode resultar em impactos ambientais permanentes, nesse âmbito avaliar a qualidade e abrangência dos serviços de gestão e gerenciamento de resíduos nas obras civis torna-se crucial para mitigar esses efeitos adversos (Gomes *et al.*, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que estabelece diretrizes para a destinação final ambientalmente adequada de resíduos, abrangendo práticas como reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação, aproveitamento energético e outras opções autorizadas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (SU-ASA) com objetivo é evitar danos à saúde pública, garantir a segurança e minimizar impactos ambientais adversos, seguindo cada parâmetro dessas normas operacionais (IBAMA, 2022).

Até minha última atualização em janeiro de 2022, a Resolução Conama nº 001/1986 estabelece critérios para o licenciamento ambiental no Brasil. A exigência de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para instalações de tratamento e disposição final de resíduos sólidos é uma prática comum para avaliar os impactos ambientais dessas atividades e garantir a sustentabilidade na gestão de resíduos (Brasil, 2010).

O Brasil não possui metas claras para os resíduos da construção civil, mas como referido na Lei nº 12305/2010 -Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que é o pilar para a gestão dos diversos resíduos do país. Segundo a PNRS, a gestão dos resíduos é caracterizada como o

conjunto de ações voltadas para a busca de soluções, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável. Além de ter como princípio a responsabilidade compartilhada entre poder público, empresas e a sociedade civil organizada.

Mesmo que as metas sejam poucas abordadas na construção civil, é necessário aderir a viável a transformação de material residual que a mesma gera, em matérias-primas destinadas a serem empregues em construções e estruturas, restringindo a demanda de extração de recursos e, portanto, reduzindo a quantidade de material impróprio destinados a aterros sanitários. (Couto; Barbosa; Campos, 2021)

Desse modo, diversas pesquisas têm buscado desenvolver processos que permitam mudanças na forma de fabricação de materiais cerâmicos como uma maneira de reduzir o impacto ambiental e promover a gestão sustentável de resíduos sólidos. Estudos comparativos foram realizados para avaliar a eficácia e viabilidade das propriedades dessas cerâmicas, demonstrados na tabela 4.

Tabela 4: Propriedade mecânica de materiais cerâmicos

Propriedade mecânicas das cerâmicas		
Autores	Tipo de incorporação	Resistência mecânica (MPa)
Brasil, <i>et al.</i> , 2024	Influência do caulim e da argila vermelha nas propriedades dos corpos de prova cerâmicos quando a lama galvânica é incorporada para encapsular metais pesados.	31,8 (Resistência à ruptura por compressão)
Almeida, 2023.	Produção de material cerâmico incorporado com resíduo de TiO ₂ : estudo das propriedades físico-mecânicas e fotocatalíticas.	8,86 (Resistência à ruptura por compressão)
Delaqua <i>et al.</i> , 2022.	Aplicação de resíduos de vidro em cerâmica vermelha para melhorar a sinterização	20 (resistência à ruptura por flexão)
Sultana e Ahmed, 2022.	Estudo das propriedades da mistura cinza-argila do bagaço de cana-de-açúcar para desenvolvimento de materiais cerâmicos vermelhos	59,31 (Resistência à ruptura por compressão)

Brasil e colaboradores (2024) em seus estudos, demonstraram que a influência do caulim e da argila vermelha nas propriedades dos corpos de prova cerâmicos foi investigada quando a lama galvânica foi incorporada para encapsular metais pesados. Verificou-se um aumento na resistência à compressão de 31,8 MPa, com uma densidade aparente de 1,9 g/cm³. Os resultados obtidos estão em conformidade com a ASTM C1314 (2023). Esta norma estipula uma resistência mínima à compressão de 10 MPa para tijolos estruturais em condições climáticas normais e 20 MPa em condições climáticas severas. Para tijolos não estruturais, a resistência mínima é de 2 MPa. Portanto, os resultados do estudo cerâmico seriam aplicáveis a tijolos estruturais.

Nos estudos Almeida (2023) os resultados indicam que a adição de TiO₂ não afeta as propriedades essenciais dos materiais cerâmicos, podendo substituir matérias-primas convencionais. Isso melhora a matriz cerâmica e possibilita a fotocatalise avançada para degradar sujidades na superfície. Além disso, a resistência atende às normas de blocos e tijolos cerâmicos (ABNT, 2017), que recomendam uma resistência à flexão acima de 5,5 MPa para tijolos cerâmicos vermelhos ociosos.

Na pesquisa de Delaqua *et al.*, (2022) foi demonstrado que uma composição de 20% de resíduos de vidro atende aos requisitos para blocos e telhas já a 800°C, mostrando economia. As massas com resíduos de vidro não tiveram problemas na extrusão e melhoraram a densificação do material cerâmico após secagem e queima. A adição de 20% de resíduos de vidro resultou em um aumento na resistência à ruptura por flexão de cerca de 5 para quase 20 MPa.

De acordo com Sultana e Ahmed (2022) empregar cinza de bagaço nos seus estudos, resultou em um aumento na resistência à compressão das amostras cerâmicas. A resistência máxima (59,31 MPa) foi registrada em uma amostra contendo 5% de cinza de bagaço queimada a 1100°C. Esses achados indicam que a inclusão de quantidades moderadas (5-10% em peso) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode servir como uma fonte alternativa e renovável para materiais cerâmicos vermelhos, melhorando também as propriedades físicas, como resistência à compressão e taxa de absorção de água, em comparação com amostras cerâmicas sem adição.

2.3.1 Quanto à sua classificação

Constata-se que, os resíduos de construção civil (RCC) abrange uma ampla gama de materiais provenientes de atividades na construção civil, como tijolos, blocos, concreto, madeira, metais, plásticos, entre outros (Oliveira *et al.*, 2021). O CONAMA, por meio da

Resolução nº 307/2002, estabelece diretrizes para a gestão desses resíduos, visando a redução do impacto ambiental e a promoção da sustentabilidade no setor. A classificação dos RCC, observados no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos RCC Segundo Resolução 307/2002-CONAMA

Classificação	Descrição
Classe A	São resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, demolição, reparos e reformas de edificações, componentes cerâmicos, tijolos, blocos, telhas, argamassa e concreto, pavimentação e pré-moldados.
Classe B	São resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plástico, papel, papelão, metal, vidros, madeira e outros.
Classe C	São resíduos onde não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
Classe D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção ou demolição, tais como; tinta, solvente, óleo, reparos de clinicas radiológicas, bem como telhas e demais objetos que contenha amianto.

Fonte: Conama 2002

Certamente, a reutilização de resíduos de classe A é considerada a forma mais fácil e antiga de reciclagem para uso de pavimentação, seja na preparação de base, sub-base ou recobrimento primário, é uma prática relevante e sustentável. Isso não apenas contribui para a gestão adequada de resíduos de construção civil, mas também reduz a demanda por materiais virgens, promovendo a eficiência e a sustentabilidade no setor de pavimentação brasileiro (Lima Silva; Silva; Calvacante, 2023).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, define resíduos sólidos como materiais, substâncias, objetos ou bens descartados provenientes de atividades humanas. A PNRS busca promover a gestão adequada dos resíduos, estimulando a redução, reutilização, reciclagem e disposição final ambientalmente adequada, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade.

2.3.2 Contribuição de resíduos sólidos para o processo industrial da Cerâmica Vermelha

A indústria da cerâmica vermelha destaca-se como uma significativa recicladora de uma ampla gama de resíduos, valida o processo de aproveitamentos em sua massa argilosa positiva eficaz de diferentes tipos de resíduos no ciclo produtivo, isso se deve principalmente às

características físico-químicas das matérias-primas utilizadas e às particularidades do processamento cerâmico (Magalhães, 2021).

Além disso, a incorporação de resíduos sólidos industriais na massa da cerâmica vermelha é uma abordagem coerente com finalidade de preservar as matérias-primas, essa prática contribui para a redução dos custos de produção e promove a destinação adequada desses materiais, evitando potenciais impactos ambientais decorrentes da poluição (Aguar, Gadioli, 2021).

O aumento significativo na geração de resíduos sólidos pelas indústrias nos últimos anos é atribuído a diversos fatores, a incorporação de resíduos na produção cerâmica oferece vantagens ambientais, evitando descartes inadequados. Essa abordagem alinha efetivamente considerações ambientais e econômicas na gestão de resíduos industriais (Magalhães, 2021).

Almeida, Soares e Matos (2020) investigaram o uso do gesso e pó de granito, com objetivo de aliar com a indústria para minimizar impactos ambientais adversos causados pela disposição inadequada de resíduos como gesso e granito. O uso dos resíduos de granito como material incorporado à massa cerâmica traz benefícios potenciais, mas é crucial considerar a granulometria para evitar impactos indesejados nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água do produto final de cerâmica vermelha. Observou-se também que o equilíbrio nessas características é essencial para garantir a qualidade do produto resultante. É promissor observar que a incorporação de resíduos de granito na produção de cerâmica vermelha pode resultar em benefícios como o aumento da dureza e densificação do produto, além de contribuir para a melhoria da qualidade ambiental. A conformidade com as legislações vigentes reforça a viabilidade dessa abordagem, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria cerâmica.

Essa prática não só contribui para a economia circular, mas também promove o desenvolvimento sustentável ao reduzir a extração de matéria-prima argila e minimizar o impacto ambiental associado (Aguar, Gadioli, 2021).

É notória que a indústria de cerâmica vermelha se configura como uma excelente alternativa para a valorização de resíduos de diversos setores industriais, beneficiando-se da diversidade das matérias-primas utilizadas. (Babisk *et al.*, 2023)

2.3.3 Resíduo do Caulim

O resíduo de caulim, pode ser entendido, como um subproduto gerado durante o processamento deste mineral, utilizado principalmente na indústria de cerâmica, papel, tintas, plásticos e cosméticos (Rodrigues *et al.*, 2021).

O caulim é uma argila caracterizada pela coloração branca e macia, composta principalmente por minerais como caulinita, illita e esmectita, sendo amplamente extraído para diversas aplicações industriais devido às suas propriedades físicas e químicas únicas (Mendonça *et al.*, 2021).

O resíduo de caulim surge principalmente no processo de beneficiamento do mineral, que envolve a remoção de impurezas e a separação do caulim em diferentes graus de pureza. Esses resíduos podem variar em composição dependendo do método de beneficiamento utilizado e das características do depósito de caulim (Almeida *et al.*, 2023).

Apesar de ser considerado um subproduto, o resíduo de caulim possui potencial para ser reaproveitado de várias maneiras. Em alguns casos, pode ser utilizado como matéria-prima alternativa na produção de materiais cerâmicos, cimentícios, fertilizantes, e até mesmo em aplicações ambientais, como em técnicas de remediação de solos contaminados (Jesus Santos *et al.*, 2023).

No entanto, é importante gerenciar adequadamente o resíduo de caulim devido às suas características físicas e químicas. Por exemplo, altos teores de sílica presente no resíduo podem impactar sua utilização em determinadas aplicações, enquanto sua granulometria fina pode ser um aspecto positivo em outros processos industriais (Sousa *et al.*, 2021).

Com um rendimento de apenas 25%, o elevado volume de resíduos gerados no processo de produção de caulim destaca a necessidade urgente de um plano de gestão eficaz. A disposição inadequada desses resíduos em margens de rios e terrenos baldios intensifica os prejuízos nas áreas de saúde, sociais, ambientais e econômicas (Mendonça *et al.*, 2021).

A presença de SiO_2 (dióxido de silício) e Al_2O_3 (óxido de alumínio) no resíduo de caulim é comum devido à sua composição mineralógica. (Araújo *et al.*, 2023). A tabela 5 apresenta a composição química de resíduos de caulim.

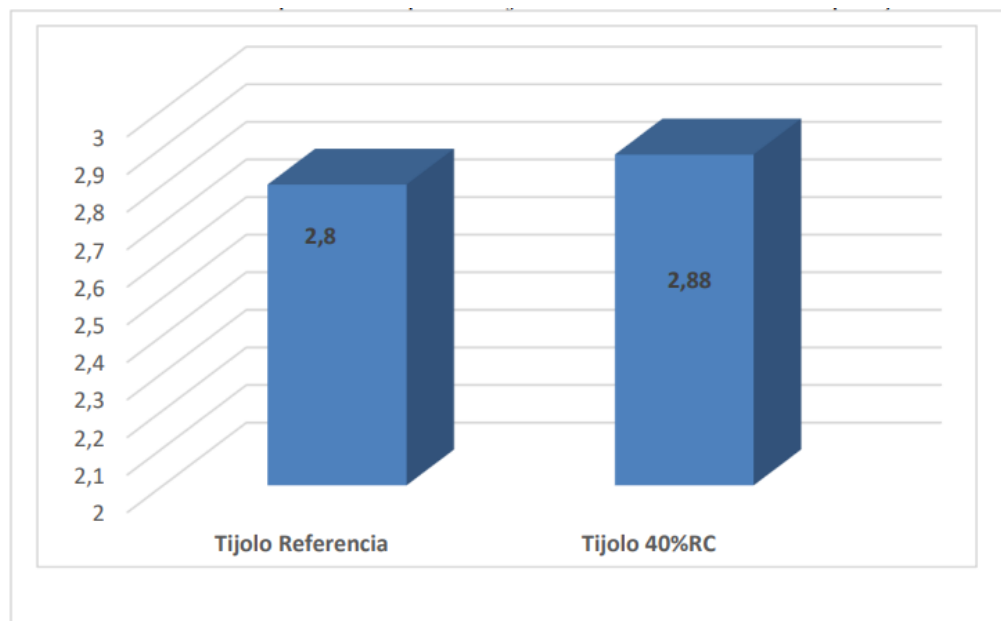
Tabela 5: Composição química dos resíduos do Caulim estudado por diversos autores.

Composição química (% em peso)				
	Araújo Santana <i>et al.</i> , (2021)	Almeida <i>et al.</i> , (2023)	Silva <i>et al.</i> , (2021)	Sousa <i>et al.</i> , (2020)
SiO₂	45,2	75,70	51,61	47,30
Al₂O₃	41,43	19,40	44,57	37,00
Ti₂O	1,25	-	1,35	0,83
Fe₂O₃	2,31	0,36	1,94	1,03

Mendonça *et al.*, (2021) em estudo em que foram feitos tijolos solo-cimento com diferentes proporções de resíduo de caulim substituindo a argila. Ao substituir a argila pelo resíduo de caulim, observou-se que os resultados atendem aos parâmetros normativos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 1984). Esses resultados indicam a viabilidade do uso do resíduo de caulim nesse contexto.

De acordo com a figura 3, é possível inferir que a substituição da argila por resíduo de caulim não apenas manteve a resistência à compressão simples dos tijolos solo-cimento, mas também demonstrou um leve aumento nessa resistência. Esses resultados sugerem que o resíduo de caulim pode ser uma alternativa eficaz na produção de tijolos, oferecendo benefícios adicionais (Mendonça *et al.*, 2021).

Figura 3: Resistência à compressão simples de tijolos solo-cimento com incorporação de 40%.



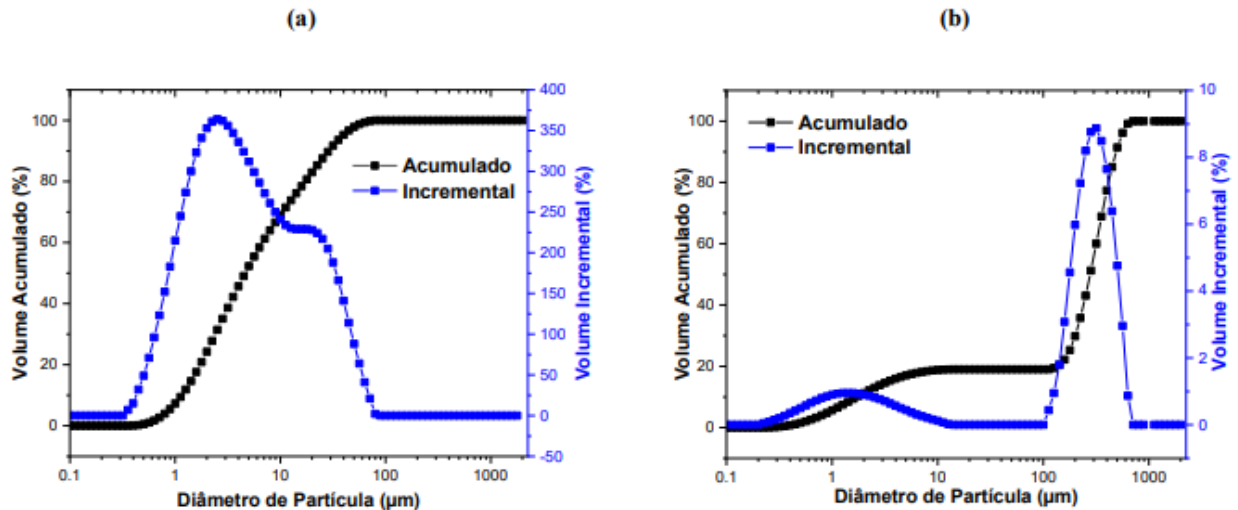
Fonte: Mendonça *et al.*, (2021).

Silva e colaboradores (2021) estudaram de maneira mais comparativa o Caulim comercial (matéria prima) versus os resíduos verificando as amostras que foram calcinadas a 1100 e 1200°C, com taxas de aquecimento de 2 e 30°C/min, para fins de comparação na obtenção da fase mulita, em forno convencional

De acordo com os autores citados acima verifica-se que a amostra de caulim comercial apresenta uma curva de distribuição de partículas polimodal com uma larga faixa de distribuição para os tamanhos de partículas, na qual é possível observar uma concentração de

partículas entre $\sim 0,3$ e $100\mu\text{m}$, sendo obtido um diâmetro médio de partículas de $10,32\mu\text{m}$. Os valores acumulados (curva em preto na figura 4) ilustram um acúmulo de tamanho de partículas de $1,15\mu\text{m}$ até 10%, de $4,62\mu\text{m}$ até 50% e $28,70\mu\text{m}$ até 90%.

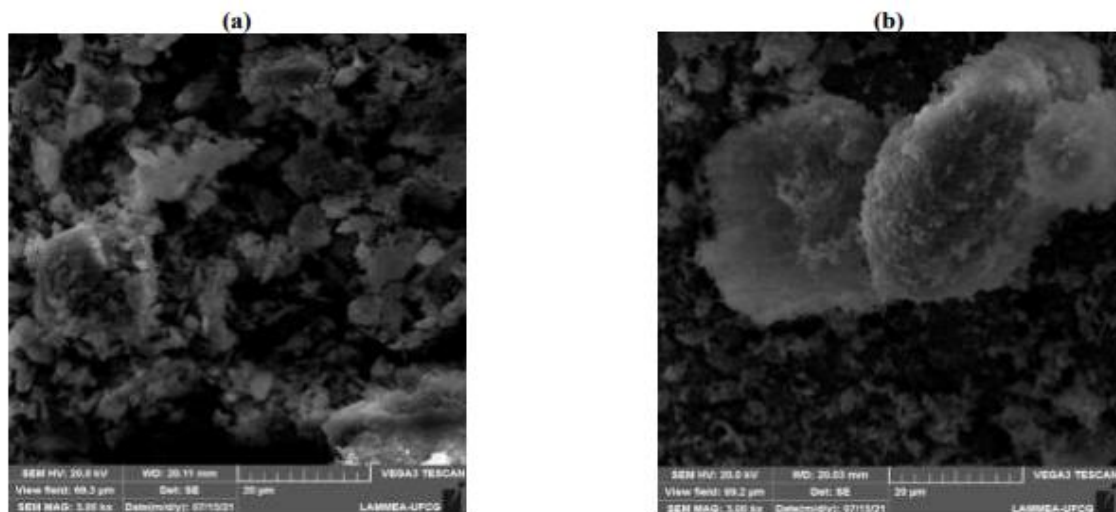
Figura 4: Distribuição granulométrica das argilas: Caulim (a) e resíduo de caulim (b)



Fonte: (SILVA *et al.*, (2021)).

No mesmo estudo Silva *et al.*, (2021) foi demonstrado a imagem da estão apresentadas as micrografias das amostras obtidas por MEV para as matérias primas: (a) caulim comercial e (b) resíduo de caulim. De acordo com a figura 5.

Figura 5: Micrografias (3000X) para as matérias primas argilosas: (a) caulim comercial (b) resíduo de caulim



Fonte: (SILVA *et al.*, (2021)).

Diante do comparativo na figura 5 (a) observa-se predominantemente caulim com formas irregulares com uma sugestão de microplacas empilhadas com uma larga faixa para os tamanhos de aglomerados, conforme revelou a análise de distribuição granulométrica. Já figura 2.5(b) a observação detalhada do resíduo revelou que ele é principalmente composto por partículas aglomeradas com empilhamento do tipo livreto, apresentando cristais de morfologia pseudo-hexagonal característicos da caulinita. Esses resultados coincidem com a análise de distribuição granulométrica, que mostrou uma distribuição de partículas heterogênea.

. Os processos de beneficiamento empregados dependem do uso a que se destina. Existem basicamente dois processos de beneficiamento do caulim, por via seca ou por via úmida (Luz et al., 2008).

Na extração do caulim, o método mais utilizado no mundo todo é por lavra a céu aberto, porém, no Brasil, além desse, também se usa outro método que é o subterrâneo (Luz et al., 2008 apud silva, 2020).

O beneficiamento do caulim a seco consiste na fragmentação inicial da rocha de caulim (britador) abaixo de 2,54 cm, sendo em seguida conduzido para secagem em secadores rotativos (Luz et al., 2008). Após seco, o caulim é pulverizado em moinhos de rolos, para então ser classificado, por tamanho, através da flotação com ar, onde as partículas mais finas são separadas por uma corrente de ar quente. No entanto, dificilmente se encontram caulins, no estado natural, com esses pré-requisitos, predominando, assim, o beneficiamento realizado por via úmida. O beneficiamento por via úmida envolve as etapas de dispersão, desareamento, fracionamento em hidrociclone ou centrífuga, separação magnética, floculação seletiva, alveamento químico, filtragem e secagem (Saikia et al., 2003). Na dispersão, o caulim bruto é transformado em polpa em agitadores móveis (blungers), por meio da adição de, dispersante químico (hexametáfosfato de sódio ou poliacrilatos) e reagentes reguladores de pH como hidróxido de sódio ou carbonato de sódio (Luz et al., 2008).

Quando o caulim é encontrado no seu estado puro, habitualmente depara-se também com impurezas, as quais tornam o caulim impróprio para comercialização direta, devendo passar por processo de purificação e adequação, chamado de beneficiamento, para atender as exigências do mercado. O beneficiamento do caulim pode ocorrer tanto por via seca quanto por via úmida, a escolha destes processos depende da finalidade de uso (LUZ et al., 2008; SAIKIA et al., 2003 apud Silva, 2020).

As etapas de extração e beneficiamento resultam numa acumulação de rejeitos que são classificados em dois tipos, de acordo com as subetapas do beneficiamento. Na primeira etapa

do beneficiamento, o rejeito é do tipo arenoso e sua constituição é basicamente de quartzo e feldspato, devido ao processo de separação da areia e caulim (desareamento). Na segunda etapa do beneficiamento, o rejeito gerado possui uma granulometria mais fina e é constituído, principalmente, por água e o mineral caulinita (separação via úmida). Esses rejeitos são acumulados em grandes áreas a céu aberto, provocando impactos ambientais negativos (Avelino et al., 2012 apud Medeiros et al., 2020).

Assim partindo para uma abordagem sustentável um fator relevante para incorporação do resíduo de caulim é que durante seu beneficiamento 75% do material extraído transforma-se em resíduo, descartado no meio ambiente. O aproveitamento de resíduos de caulim é economicamente e ambientalmente viável, visto que os resíduos da mineração se encontram dispostos de maneira abundante, além de serem caracterizados como passivos ambientais. (Almeida, Vidal e Castro 2023).

2.3.4 Tijolo ecológico: Uma solução a partir da inserção de resíduos

A indústria da construção civil é conhecida por sua alta demanda de matéria-prima não renovável e pelo intenso consumo de energia em todas as etapas, desde a extração dos insumos até o transporte, gerando considerável entulho durante as obras. Os tijolos ecológicos surgem como uma alternativa mais sustentável, pois podem ser produzidos a partir de resíduos urbanos atóxicos, inclusive aqueles provenientes da própria construção civil (Tosello *et al.*, 2021)

No Brasil, ainda não há uma recomendação ou exigência definida quanto à resistência mínima para a utilização de tijolos com alguns resíduos em sua especificidade, porém a norma para materiais ABNT NBR 15270-1, estabelece que as condições mínimas para a fabricação de tijolos cerâmicos, no que se refere a resistência mínima à compressão é de 4,0 MPa para os tijolos destinados a serem utilizados em paredes de vedação (ABNT, 2017).

A Agenda 2030 atribui à indústria da construção civil um papel crucial no avanço do desenvolvimento sustentável, destacando metas específicas a serem alcançadas. Para atingir esses objetivos, é fundamental adotar práticas de construção sustentáveis. Isso inclui não apenas a implementação de tecnologias e técnicas que reduzam o impacto ambiental, como também a promoção de eficiência energética. Essas medidas não apenas contribuem para a preservação dos recursos naturais e a redução das emissões de carbono, mas também promovem o bem-estar das comunidades e a resiliência das infraestruturas frente aos desafios ambientais e sociais emergentes (Freitas, 2023).

Para mitigar os impactos ambientais ocasionados pela construção civil, uma série de estratégias pode ser adotada, incluindo o reaproveitamento de materiais, a reciclagem de resíduos, a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis. O desenvolvimento de materiais sustentáveis, como os tijolos ecológicos, representa uma alternativa promissora para aproveitar resíduos na fabricação de componentes construtivos. Essas práticas não apenas reduzem a demanda por recursos naturais limitados, mas também contribuem para minimizar a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, promovendo assim uma construção mais ambientalmente responsável (Tosello *et al.*, 2021).

Nos estudos conduzidos por Paixão e colaboradores (2023), destaca-se que o principal diferencial dos tijolos ecológicos reside em sua pegada ambiental reduzida quando comparados aos tijolos convencionais. Isso se deve à utilização de materiais reciclados ou renováveis em sua produção, o que não apenas preserva os recursos naturais, mas também reduz significativamente a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Além disso, o processo de fabricação dos tijolos ecológicos consome menos energia e emite menos poluentes, uma vez que dispensa a necessidade de queima em fornos, contribuindo assim para uma construção mais sustentável e aliada ao meio ambiente.

De acordo com Almeida (2021), a produção de tijolos ecológicos por meio da prensagem a frio se destaca por uma redução substancial na emissão de gases poluentes. Além disso, esse método de produção consome menos energia e água em comparação com os processos tradicionais de fabricação de tijolos. Essa abordagem inovadora não apenas contribui para a redução do impacto ambiental da indústria da construção civil, mas também ressalta a importância de adotar práticas mais sustentáveis em todas as etapas do processo produtivo.

Um dos principais diferenciais que tornam os tijolos ecológicos uma alternativa sustentável é a matéria-prima utilizada em sua produção. Enquanto os tijolos convencionais são fabricados através da queima de argila em altas temperaturas, os tijolos ecológicos são produzidos a partir de uma variedade de materiais, como solo-cimento, resíduos industriais e fibras naturais, entre outros. Essa mudança na composição dos materiais não apenas permite a redução do consumo de recursos naturais, como a argila, mas também contribui significativamente para a minimização da emissão de gases de efeito estufa durante todo o processo produtivo (Sousa, 2020).

Os tijolos ecológicos, por sua vez, são concebidos com atributos de longevidade e robustez superiores, diminuindo a urgência de substituições frequentes. Além disso, sua formulação propicia uma reciclabilidade facilitada, reduzindo assim o impacto ambiental decorrente da inadequada disposição de resíduos (Melo, 2022).

Segundo Sousa (2020), a resistência dos tijolos ecológicos varia conforme o tipo de solo utilizado em sua composição, sendo que solos com maior teor de argila proporcionam maior resistência devido à sua capacidade de aglomeração. Portanto, é essencial realizar estudos prévios para determinar a adequação dos solos disponíveis na região de construção. Além disso, a adaptação dos tijolos ecológicos a diferentes contextos construtivos também é um fator relevante a ser considerado.

Conforme Oliveira (2021) observa, os tijolos ecológicos são frequentemente empregados em empreendimentos de custo reduzido, tais como habitações populares e edifícios comerciais de pequena escala. Sua resistência adequada aliada à sustentabilidade inerente a esse material os posiciona como uma alternativa viável para tais empreendimentos.

De acordo com Paixão e colaboradores (2023), o emprego de tijolos ecológicos se revela como uma alternativa ecoconsciente na indústria da construção, desempenhando um papel crucial na redução do consumo de recursos naturais e na mitigação da emissão de poluentes.

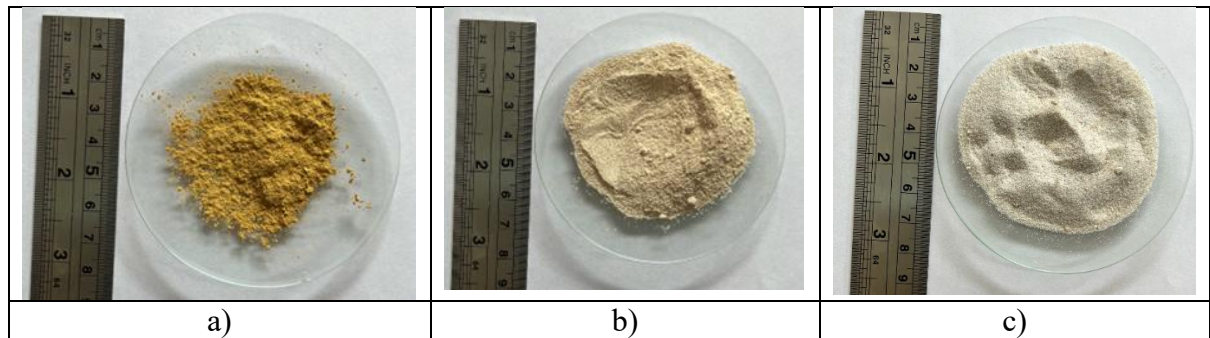
A incorporação de resíduos do caulim na massa da argila apresenta uma série de benefícios significativos. Além de contribuir para a redução do desperdício e a sustentabilidade ambiental, essa prática pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais cerâmicos, como a resistência e durabilidade. Ao utilizar resíduos do caulim, é possível obter produtos finais de alta qualidade, promovendo eficiência na produção e economia de recursos naturais. Portanto, o uso inteligente e eficaz de resíduos do caulim na indústria cerâmica pode representar uma estratégia vantajosa tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais Utilizados

Neste trabalho, foram utilizadas como matérias-primas argila Marajoara (AM) obtida do Rio Aramaquiri, Pará, Brazil, (-1.511581, -49.783492), sitio pertencente ao Hemenegildo Rodrigues Brito, e resíduos industriais oriundos da mineração do caulim, resíduo de caulim argiloso (KDI) e resíduo de caulim arenoso (KAI). A Figura 6 apresenta as matérias-primas utilizadas neste estudo.

Figura 6: Material passante em peneira de abertura de 300 μ m (a) Argila Marajoara (AM), (b) Resíduos do Caulim argiloso (KDI) e (c) Resíduo de Caulim arenoso (KAI)

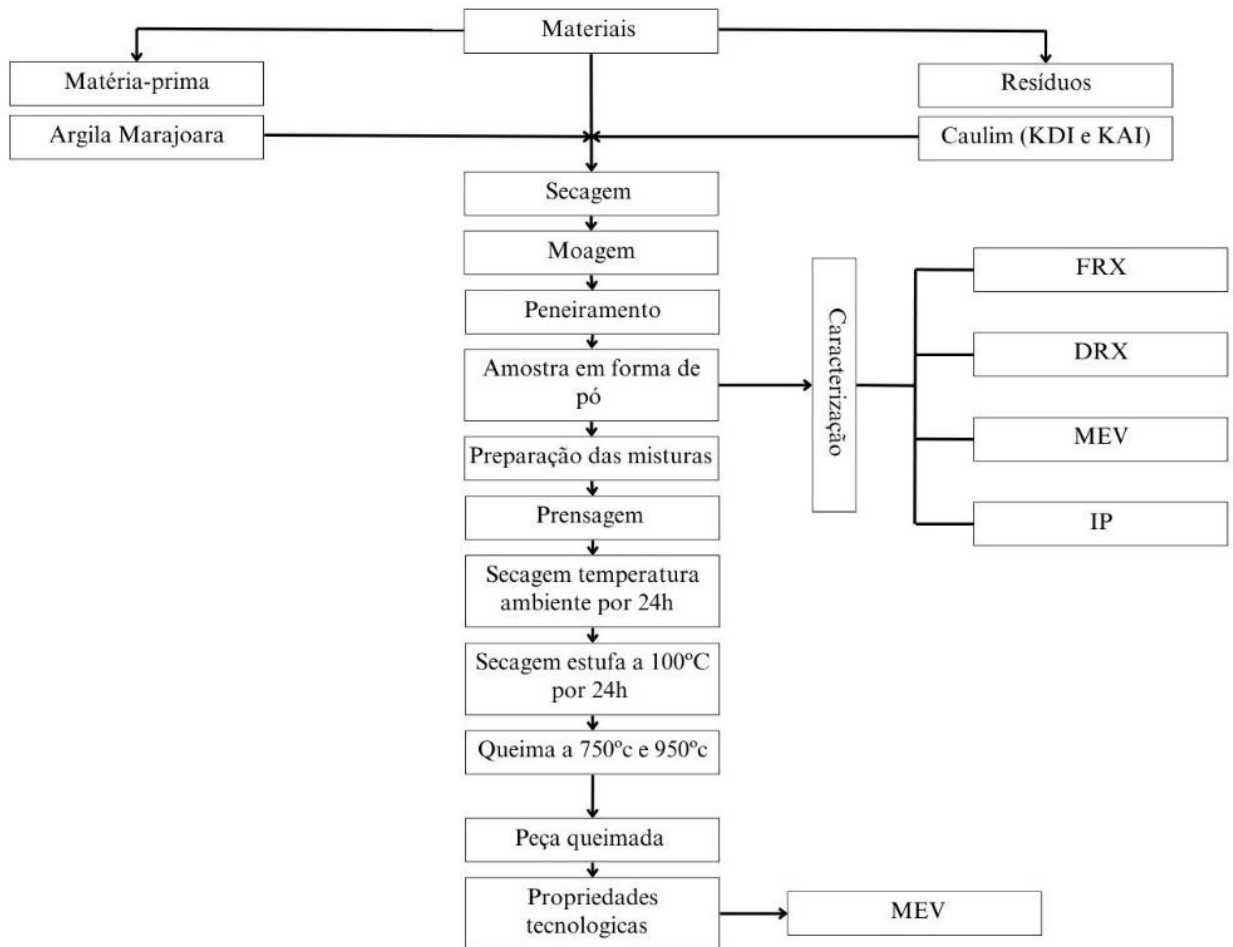


Fonte: Próprio Autor, 2025.

3.2 – Etapas Experimentais

Foram aplicados os seguintes procedimentos:

- Beneficiamento das matérias-primas;
- Caracterização das matérias-primas;
- Conformação dos corpos de prova por compressão uniaxial em matriz metálica;
- Sinterização dos corpos de prova;
- Determinação das propriedades físicas e mecânicas da cerâmica;
- Análise microestrutural

Figura 7: Fluxograma Experimental

3.2.1 – Beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas, foram submetidas à secagem em estufa a uma temperatura de 100°C por um período de 24 horas. Posteriormente desagregadas em moinho de bolas durante 20 minutos seguindo para o peneiramento em peneira com abertura de malha de 50 mesh com auxílio de um agitador de mecânico de peneiras por 10 minutos.

3.2.2 – Caracterização das Matérias-primas

A caracterização das matérias-primas envolveu a análise da composição mineralógica, química e características físicas.

3.2.2.1 –Fluorescência de raios-X

A identificação dos componentes químicos presentes nas matérias-primas foi realizada por meio de uma análise quantitativa utilizando um espectrofotômetro de fluorescência de raios-X da marca Bruker S2 RANGER (c) 2010 AXS GmbH.

3.2.2.2 – Difração de raios-X (DRX)

A análise por Difração de Raios-X (DRX) foi conduzida utilizando um difratômetro XRD7000 da marca SHIMADZU, operando com radiação de cobre ($\text{Cu-K}\alpha$) e uma varredura de 2θ variando de 5 a 50° .

3.2.3 – Preparação das Composições e confecção dos corpos de prova

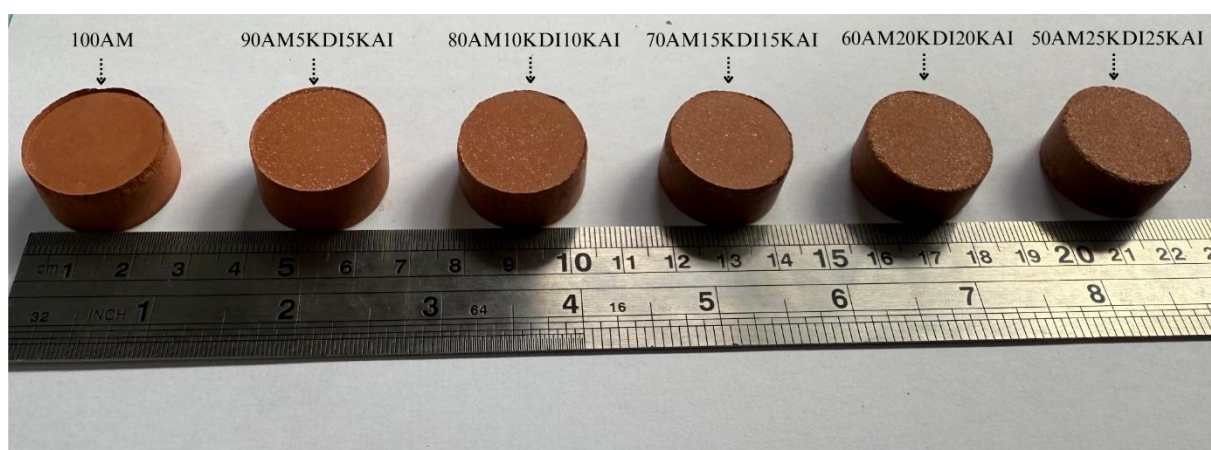
As composições estudadas foram preparadas substituindo-se a argila pelo resíduo da mineração. Após a etapa de beneficiamento, a AM, KDI e KAI foram misturados seguindo as proporções apresentadas na tabela 6 e adicionado 8% em peso de água às massas estudadas.

Tabela 6: Composição em peso das matérias-primas utilizadas. AM – Argila Marajoara, KDI- Caulim argiloso; KAI – Caulim arenoso

Composições	Matérias-primas (% em peso)			Nº de CPS
	Argila	KDI	KAI	
100AM	100	-	-	10
90AM5KDI5KAI	90	5	5	10
80AM10KDI10KAI	80	10	10	10
70AM15KDI15KAI	70	15	15	10
60AM20KDI20KAI	60	20	20	10
50AM25KDI25KAI	50	25	25	10

Para ilustrar os corpos de prova produzidos a partir dessas composições, apresenta-se a Figura 8.

Figura 8: Corpos de prova moldados para avaliação experimental



Os corpos de prova foram moldados em molde cilíndrico de alumínio com dimensões de 25 mm x 12,5 mm, sendo conformados por prensagem uniaxial utilizando uma prensa hidráulica manual da marca BOVENAU-P15000 e aplicação de uma carga de 6 ton. Em seguida foram secos à temperatura ambiente por 24 horas e, depois em estufa a 100°C por 24. A queima foi realizada em forno mufla da marca Solidsteel, nas temperaturas de 750°C e 950°C (para avaliar o efeito da temperatura na propriedade final) com uma taxa de aquecimento de 10°C/min e temperatura patamar por 2 horas.

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS

As matérias-primas e os corpos de prova fraturados foram previamente metalizadas com uma camada fina de ouro por 15 minutos, a uma distância de trabalho de 15 mm e 15 KV. A morfologia das matérias-primas foi observada em MEV da marca TESCAN, modelo MIRA3, equipado com canhão de elétrons tipo FEG (emissão de campo). A morfologia da fratura foi observada em MEV da marca Oxford Instruments, modelo X-maxN, equipado com detector de EDS da marca Oxford, modelo X-act, Spot size: 90-110 nm; tempo morto: 23-25%, com software AZtecOne.

3.2.5 Propriedades físicas e mecânicas

3.2.5.1 – Umidade higroscópica

Determinação do teor de umidade das matérias-primas foram feitas pelo procedimento descrito na ABNT NBR 6457:2016. O ensaio consistiu em pesar 30 gramas de cada material (resíduo de caulim e argila) em balança com precisão de 0,01g, adicionadas em cápsulas metálicas e secas em estufa à temperatura de 100 °C por 24h.

Ensaio realizado no laboratório de Práticas Tecnológicas (LAPTEC) da Universidade Federal do Pará.

3.2.5.2 – Densidade por dispersão (ensaio de sedimentação)

O material foi seco em estufa e destorroado e passado em peneira de 2mm conforme a NBR 7181, para a realização de ensaios de sedimentação para cada material (Argila, KDI e KAI), sendo 70g de argila e 120g para os resíduos em 125mL de solução de hexametáfosfato, realizando ensaios separados com finalidade de determinar, a densidade por dispersão, procedeu-se à dispersão manual e colocou-se a mistura em uma proveta de 1000 mL cujo

volume foi completado com água destilada, em seguida agitou-se a proveta por um minuto e seguiu-se de realização de leituras do densímetro por 24 horas.

Ensaio realizado no laboratório de Práticas Tecnológicas (LAPTEC) da Universidade Federal do Pará.

3.2.5.3 –Plasticidade

Os limites de liquidez e de plasticidade foram obtidos de acordo com as normas, NBR 7180 e NBR 6459. Em que o índice da plasticidade (IP) é o resultado da diferença aritmética entre os limites de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), de acordo com a equação (1).

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

3.2.5.4 – Distribuição de tamanho de partícula das matérias-primas

Para determinar a distribuição de tamanho de partícula da argila, do KDI e KAI, foi utilizado o método de difusão dinâmica de luz utilizando o difratômetro a laser modelo Mastersizer 3000, da Malvern Panalytical.

3.2.5.5 Absorção de água (AA)

O ensaio de absorção de água seguiu os parâmetros descritos na norma NBR15270-2 onde cada corpo de prova seco após a queima (Ms) foi pesado e depois imerso em água fervente por duas horas. Após isso, a água superficial foi removida com lenço de papel e as amostras novamente pesadas (Mu). A equação (2) apresenta o cálculo da AA.

$$\%AA = \frac{Mu - Ms}{Mu} \times 100 \% \quad (2)$$

3.2.5.6 Retração Diametral de queima

As dimensões dos corpos de prova foram obtidas com o auxílio de um paquímetro digital da marca MITUTOYO (resolução $\pm 0,01$ mm) de acordo com a ABNT NBR 13818. A retração linear de queima (RLQ) foi obtida pela equação (3), na qual L_o representa o diâmetro inicial e L_i , o diâmetro final.

$$RLQ = \frac{L_o - L_i}{L_o} \times 100(\%) \quad (3)$$

3.2.5.7 Massa específica aparente

A determinação da massa específica aparente foi realizada por meio do método dimensional, de acordo com a norma ASTM C 373-72 (1997). As medições de altura e diâmetro foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital da marca MITUTOYO (resolução de 0,01mm). A massa das peças foi registrada em uma balança de precisão da marca BEL Engineering, com resolução de $\pm 0,001\text{mg}$ os dados obtidos foram calculados por meio da equação (4):

$$\rho_{ap}: \frac{M}{V} \quad (4)$$

3.2.5.8 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi realizado utilizando 10 corpos de prova por composição, em máquina Contenco de ensaio com célula de carga de 100 toneladas, com taxa de carregamento de 14 kN/s, seguindo as adaptações da norma NBR 5739 para o tamanho do corpo de prova, com 25 mm de diâmetro.

3.2.5.9 Análise estatística

Os resultados dos testes de Absorção de água, Retração Diametral de queima, Massa específica aparente e Ensaio de compressão foram validados por meio da análise de variância (ANOVA), com significância verificada pelo teste de Tukey a 95% ($p < 0,05$) utilizando o software PAST versão 14.0.0.15 (Statsoft Inc., Tulsa, EUA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das matérias-primas

4.1.1 Fluorescência de raios-X das matérias-primas

A Tabela 7 apresenta a composição química da argila marajoara e dos resíduos estudados.

Tabela 7- Composição química (% em peso) AM – Argila Marajoara, KDI- Caulim argiloso; KAI – Caulim arenoso.

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	ZrO ₂	PF (%)
AM	61.4	23.1	9.84	-	2.05	-	0.194	1.50	1.40	-	-	10,22%
KDI	51.0	42.0	1.53	0.565	0.100	0.159	-	0.913	3.20	-	0.405	14,26%
KAI	56.4	31.5	1.80	-	0.211	0.110	-	0.779	5.64	0.102	3.06	6,50%

Nota-se que a argila apresenta elevadas concentrações de sílica associadas a altos níveis de alumina, indicando que o argilomineral predominante seja a caulinita, formada por tetraedros de sílica e octaedros de alumina. A presença de Fe₂O₃ proporciona uma tonalidade avermelhada antes e após a queima da argila, além de contribuir para a redução da refratariedade da massa. O teor de óxido de potássio (K₂O), por sua vez, pode funcionar como fundente, favorecendo a fusão da massa em temperaturas inferiores. Entretanto, na argila marajoara analisada, o conteúdo de K₂O foi identificado em níveis muito baixos, tornando-se praticamente irrelevante para esse efeito (Muñoz *et al.*, 2020; figueiredo *et al.*, 2019).

A composição química dos resíduos de caulim, assim como verificado para a argila, exibe elevados teores de sílica associados à alumina, o que reforça que, embora esses materiais sejam classificados como resíduos de mineração, ainda podem demonstrar potencial para estudos relacionados à incorporação em massas cerâmicas, podendo auxiliar no ajuste da plasticidade (Menezes *et al.*, 2007)

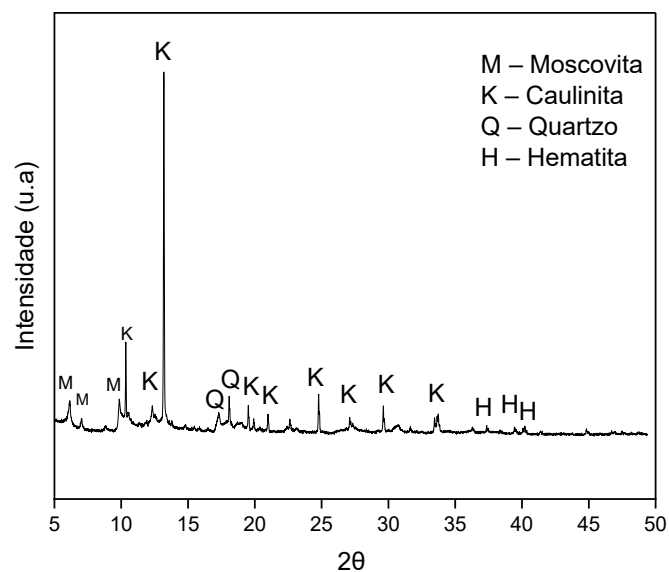
A perda ao fogo (PF) da argila marajoara foi de 10,22%, resultante da eliminação de água, desidratação de hidróxidos e oxidação da matéria orgânica. Esse valor está dentro da normalidade para a produção cerâmica, conforme normas que consideram até 13% como adequado, indicando a viabilidade da argila para tal uso (Racanelli *et al.*, 2020). Os resíduos de caulim apresentaram PF de 14,26% no KDI e 6,50% no KAI. A menor PF do KAI se deve à maior quantidade de silicatos, que retêm menos água, enquanto a PF do KDI é superior devido

aos grupos hidroxilas, tornando-o mais úmido. Resultados aproximados foram encontrados por Barata & Angélica (2012), com 13,96%, Falcão *et al.* (2017), com 14,60%, e Silva (2019), com 14,62%.

4.1.2 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 9 apresenta o difratograma da argila marajoara.

Figura 9: Difratograma da Argila Marajoara.



É possível identificar a presença de fases cristalinas correspondentes à caulinita, muscovita, quartzo e hematita. A caulinita contém, em sua estrutura, sílica e alumina, organizadas em arranjos de tetraedros e octaedros, respectivamente, o que corrobora os resultados obtidos por FRX e caracteriza a argila analisada como sendo de natureza caulinítica (Vilela *et al.*, 2020).

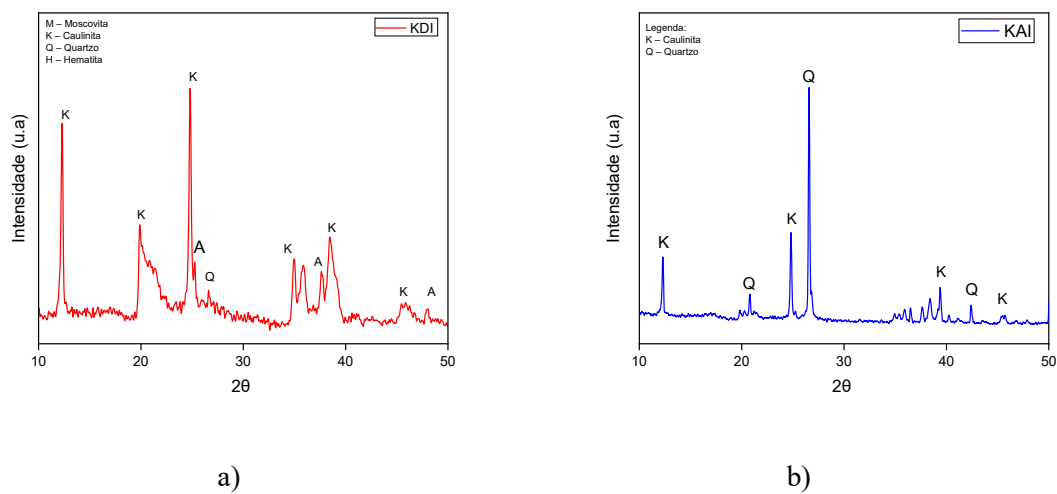
No que se refere ao quartzo, são perceptíveis diversos picos ao longo da varredura, o que confirma sua detecção pelo FRX, devido ao seu elevado teor de sílica. O quartzo, em conjunto com a caulinita, constitui um dos componentes predominantes da cerâmica vermelha. Sua presença contribui para manter a estabilidade dimensional da peça durante a queima e, quando presente em proporções adequadas, favorece o aumento da resistência mecânica (Muñoz *et al.*, 2020). Em relação às demais fases, destaca-se a muscovita, cuja presença pode interferir na temperatura de sinterização da argila, além de influenciar diretamente na

resistência e durabilidade dos produtos cerâmicos, tornando-os menos suscetíveis ao desgaste e ao surgimento de fissuras (Muñoz *et al.*, 2020, Figueirêdo *et al.*, 2019).

A hematita, por sua vez, é responsável pela tonalidade típica da argila. Conforme a quantidade e a forma química em que o ferro se apresenta, pode conferir à massa tonalidades que variam entre vermelho, marrom, laranja ou amarelo (Khalil *et al.*, 2024).

A Figura 10 apresenta o difratograma dos resíduos a) KDI e b) KAI.

Figura 10: Difratograma dos resíduos de caulim. a) KDI e b) KAI



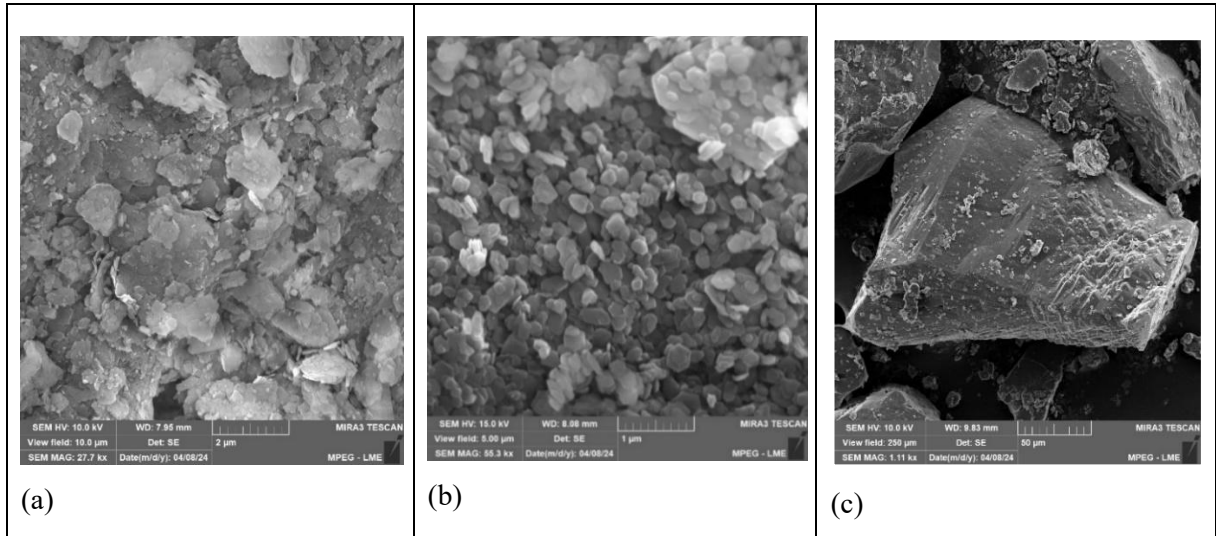
Nota-se que o resíduo KDI apresenta picos cristalinos de caulinita, além de picos de anátasio e quartzo. Já o resíduo KAI apresenta elevados níveis de quartzo e picos menores de caulinita, características típicas de materiais arenosos. A caulinita presente nesses materiais é o principal componente do caulim, frequentemente acompanhada de outros minerais na forma de impurezas, como quartzo, mica, feldspato e óxidos de ferro e titânio (Medeiros *et al.*, 2020).

4.2 Caracterização morfológica das matérias primas

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A figura 11 apresenta a micrografia das partículas das matérias-primas estudadas.

Figura 11- Micrografia das matéria-primas. (a) Argila Marajoara, (b) resíduo KDI e (c) resíduo KAI.



A micrografia da argila, na figura 10a, indica que os grãos apresentam formato delgado e lamelar, alguns dispersos e outros aglomerados. Além disso, observa-se a presença de pequenas partículas de morfologia pseudo-hexagonal e estrutura lamelar, associadas provavelmente à caulinita, um argilomineral presente nas argilas. (Silva *et al.*, 2021, Presotto 2012).

A figura 10b, mostra o resíduo do KDI, onde é possível observar a presença de partículas pseudo-hexagonais dispostos de forma empilhada, o que é uma característica típica da caulinita (Sousa *et al.*, 2020).

Na Figura 10c, observa-se a presença de partículas maiores com formas irregulares e cantos agudos, características morfológicas típicas de partículas de quartzo, confirmando o que foi encontrado no DRX, que apresentou a fase quartzo. Esse valor reforça a predominância de minerais silicatados, especialmente o quartzo, cuja composição é essencialmente dióxido de silício. (Licursi *et al.* 2022, Sousa *et al.*, 2020)

4.3 Propriedades físicas e mecânicas

4.3.1 Umidade higroscópica

Na Tabela 8, é apresentado o teor de umidade de ambas as matérias-primas de argila e resíduos de caulim KDI e KAI.

Tabela 8: Umidade higroscópica (% em peso)

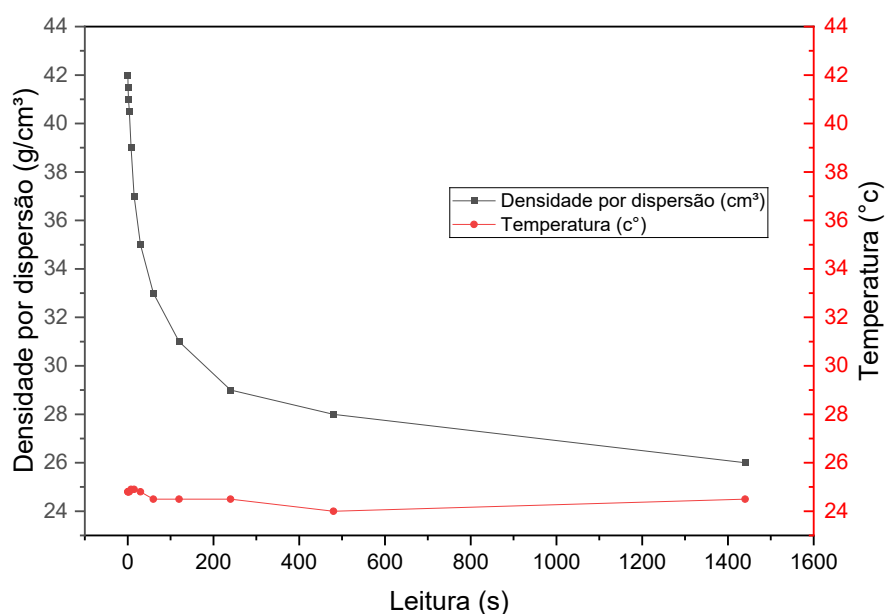
Amostra	W1 (%)	W2 (%)	W3 (%)	Wmédia
Argila Marajoara	7.74	3.16	3.02	4.64
Resíduo Caulim (KDI)	25.4	25.53	25.31	25.41
Resíduo Caulim (KAI)	14.24	14.17	12.73	13.71

Observa-se que o teor de umidade higroscópica tende a ser maior nos resíduos do que a argila em temperatura ambiente, isso se explica pela presença de minerais específicos em sua composição promovendo maior absorção de água (Frizzo, 2019).

As matérias-primas, à medida que a secagem ocorre, têm a temperatura como fator dominante, substituindo a velocidade do ar. Isso acontece porque o processo de secagem depende principalmente da separação das moléculas de água, que estão fortemente ligadas às partículas de argila por forças de adsorção e ligações de hidrogênio. (Zaccaron *et al.*, 2019).

4.3.2 Densidade por dispersão (sedimentação)

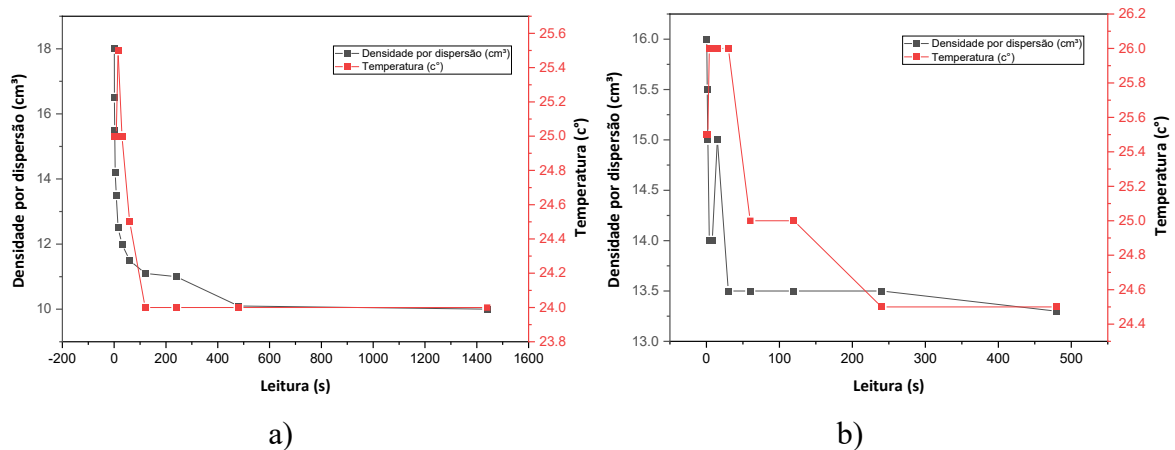
A curva de densidade por dispersão da argila marajoara está apresentada na figura 12.

Figura 12: Densidade por dispersão da Argila Marajoara

A alta densidade do solo argiloso pode ser atribuído à maior compactação entre as partículas do argilomineral predominante que tende a manter uma estrutura mais compacta e densa (Lacerda *et al.*, 2021).

A Figura 13 ilustra as curvas de densidade por dispersão dos resíduos de caulim.

Figura 13: Densidade por dispersão dos resíduos (a) Resíduo Caulim Argiloso (KDI) (b) Resíduo Caulim Arenoso (KAI)



A baixa densidade dos resíduos pode ser explicada pela estrutura porosa e pela composição mineralógica. Outros fatores que contribuem para a baixa densidade do caulim incluem sua textura fina e a presença de vazios entre as partículas. Esses vazios reduzem a massa por unidade de volume do caulim, resultando em uma densidade mais baixa. Além disso, o caulim é frequentemente utilizado em aplicações onde a leveza é desejada, como na fabricação de papel, cerâmica e cosméticos, devido à sua baixa densidade e à sua capacidade de conferir características específicas aos produtos finais (Prasanphan *et al.*, 2023).

Essa diferença notável também se implica pelo fato da argila conter uma diversidade de minerais, enquanto o caulim é principalmente composto de caulinita. Essa variedade de minerais na argila contribui para uma maior densidade devido à presença de minerais mais pesados (Ribeiro, 2024).

Além de uma estrutura mais compacta e menos porosa em comparação com o caulim. Esta compactação resulta em uma maior massa por unidade de volume, o que aumenta a densidade, pois geralmente é formada por processos geológicos que envolvem compactação e metamorfismo, o que pode contribuir para uma estrutura mais densa. (Venturi, 2021).

4.3.3 – Plasticidade

O estudo da plasticidade da argila e dos resíduos está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos limites de Atterberg

Material	Limite de Liquidez (LL, %)	Limite de Plasticidade (LP, %)	Índice de Plasticidade (IP, %)
Argila Marajoara	57,40	35,01	22,39
KDI (resíduo do Caulim argiloso)	41,41	38,98	2,43
KAI (resíduo do Caulim arenoso)	0,00	0,00	0,00

Pode-se aferir que os resultados dos limites de Atterberg indicam diferenças significativas no comportamento plástico dos materiais analisados. A Argila Marajoara apresentou elevada plasticidade com $IP = 22,39\%$, característica de solos argilosos com alta coesão e capacidade de retenção de água, tornando-se um material adequado para aplicações em cerâmica. O resíduo KDI demonstrou um baixo índice de plasticidade com $IP = 2,43\%$, sugerindo a presença de partículas finas, porém com limitada capacidade de deformação plástica. Já o resíduo de caulim arenoso (KAI) não apresentou plasticidade mensurável com $IP = 0,00\%$, evidenciando um comportamento predominantemente granular, típico de materiais inertes.

O limite de plasticidade da argila marajoara de $35,01\%$ reflete a umidade mínima necessária para que o solo passe do estado sólido para o estado plástico. Esse valor está diretamente relacionado à composição mineralógica e à estrutura do solo. Um LP elevado indica que a Argila Marajoara mantém sua coesão mesmo em condições de baixa umidade, o que contribui para sua estabilidade em condições secas (Polivanov *et al.*, 2021; Firincioglu, Bilsel 2021)

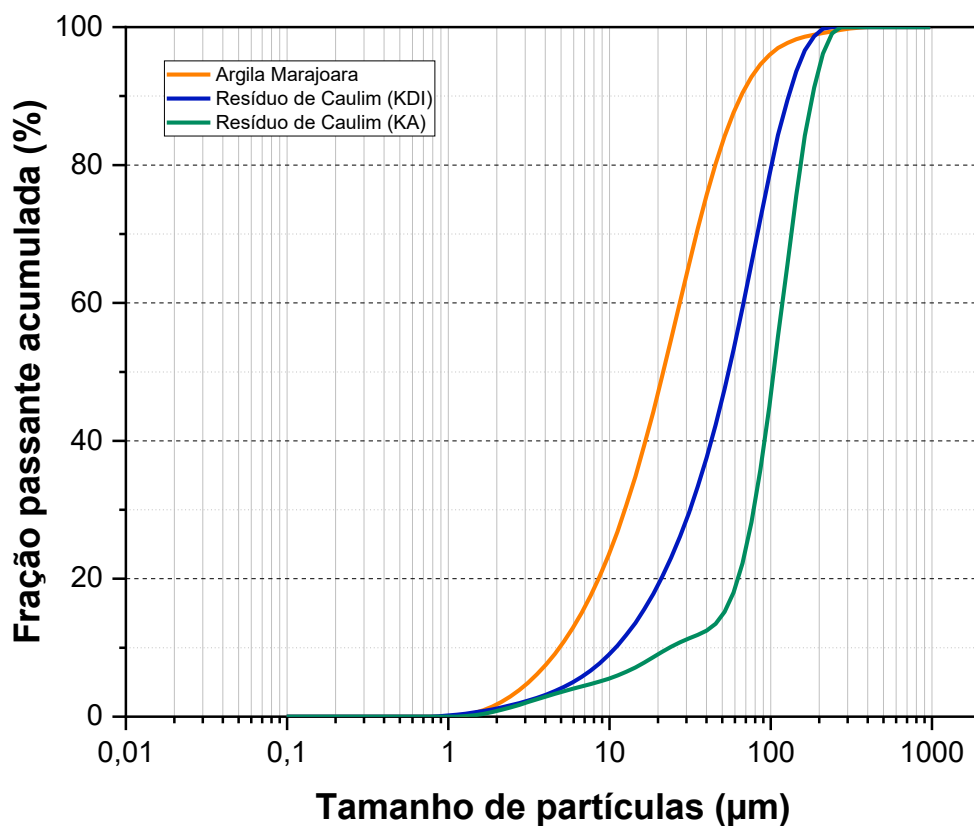
A presença predominante de partículas finas, como silte e argila, em percentual mais altos na argila e até mesmo no KDI resulta em valores mais elevados de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Isso ocorre porque as partículas menores têm maior superfície específica e capacidade de retenção de água, o que aumenta a plasticidade do solo. No caso da Argila Marajoara, os gráficos granulométricos mostram uma alta proporção de partículas finas ($< 2 \mu m$), justificando o LL de $57,40\%$ e o LP de $35,01\%$ (Won *et al.*, 2021, Öser, 2020). O resíduo KDI, por ser um material da segunda camada do processamento do caulim comercial, apresenta características semelhantes a este, pois o caulim comercial é um material composto de silicato de alumínio hidratado isento de plasticidade, justificando o baixo teor de plasticidade do KDI (Almeida Vidal, Castro 2023). O KAI apresenta

plasticidade nula, esse comportamento é típico de materiais predominantemente arenosos, que possuem baixa plasticidade e alta granulometria com capacidade de retenção de água e não exibem mudanças significativas no estado plástico-líquido [Silva 2020; Silva *et al.*, 2021).

4.3.4 Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas

A Figura 14 apresenta curva de distribuição granulométrica acumulada matérias-primas.

Figura 14: Curva de distribuição de tamanho de partícula da Argila Marajoara e resíduos KDI e KAI



Pode-se observar que o teor de fração argila na Argila Marajoara é de 3%, o que proporciona uma plasticidade moderada, permitindo a moldagem de peças cerâmicas de forma controlada. A fração silte, que representa 80% da composição, confere uma textura fina, podendo auxiliar na uniformidade durante a secagem e no controle da umidade. A fração areia fina, com 27% de partículas maiores que 2 mm, pode contribuir para a resistência e estabilidade dos tijolos, melhorando a porosidade durante a queima.

A curva de distribuição granulométrica acumulada da argila marajoara varia de partículas em torno de 0,2 μm a mais de 100 μm, caracterizando-a como material argiloso, segundo a norma NBR

6502. Aproximadamente 3% das partículas têm diâmetro inferior a 2 μm , indicando frações ultrafinas, associadas ao argilomineral que compõe a argila marajoara (Santos, Santos 2021). Cerca de 90% das partículas são menores que 100 μm , refletindo a predominância de partículas pequenas, o que favorece a coesão e compactação do material, essencial para a formação de produtos densos [Santos 2021, Barbosa *et al.*, 2021; Sobczyk *et al.*, 2023).

A curva indica uma transição suave entre as faixas de tamanho, sugerindo uma distribuição granulométrica ampla e homogênea. Isso melhora a fluidez, manuseio e homogeneidade das misturas, beneficiando a moldagem e queima de argilas cerâmicas, além de reduzir defeitos como fissuras e porosidade excessiva [Zheng Zheng, Li 2021, Amorós *et al.*, 2021).

Pode-se observar que o KDI apresenta uma curva granulometria similar com a AM, porém com menor fração de argila e silte. O teor de fração argila desse material é igual a 1,5% conferindo a ele baixa plasticidade. O teor da fração silte é igual a 45% e a fração areia é de 53,5%.

Nota-se uma curva sigmoidal, indicando que a maior parte do material está entre 0 μm e 100 μm , similar à curva da argila, o que sugere um bom controle na classificação ou moagem. A baixa presença de partículas muito finas (<1 μm) ou grossas (>100 μm) indica uma distribuição controlada, adequada para atender às especificações de mercado. Resíduos de caulim com tamanhos entre 20 μm e 40 μm são ideais para aplicações de alto valor agregado (Rodrigues *et al.*, 2021; Du *et al.*, 2021).

Os resultados da curva granulométrica do KAI diferem da argila no que se refere ao baixo teor de fração silte e ao teor quase nulo de fração argila. O teor de fração argila desse material é de 0,5%, o que resulta em um material sem plasticidade. O teor da fração silte é de 14,5%, enquanto a fração areia corresponde a 85%. A granulometria do resíduo KAI é mais grosseira do que a da AM e do KDI. A maioria das partículas do resíduo KAI está entre 0 μm e 100 μm , com uma transição acentuada e distribuição granulométrica uniforme. As três análises granulométricas apresentaram características semelhantes em termos de transição e tamanho médio. A incorporação desse material em proporções adequadas com a matéria-prima argilosa pode facilitar o processo de secagem e melhorar o grau de empacotamento das cerâmicas (Paiva *et al.*, 2019; Makhathini, Bwapwa, Mtsweni 2023).

Na tabela 10 é apresentado o modelo de distribuição de Mie (espalhamento da luz de para calcular a distribuição de tamanho de partículas) e o analisador Mastersizer 3000.

Tabela 10: Resultados do modelo de distribuição de partículas - AM – Argila Marajoara, KDI- Resíduo do Caulim argiloso; KAI – Resíduo do Caulim arenoso

Amostra	Concentração	Span	Uniformidade	Superfície específica (m^2/kg)	D [3;2] (μm)	D [4;3] (μm)	Dv (10) (μm)	Dv (50) (μm)	Dv (90) (μm)
---------	--------------	------	--------------	--	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

AM	0,0262 %	2,816	0,962	458,2	13,1	35,7	5,56	24,4	74,4
KDI	0,0810 %	1,513	0,422	153,5	39,1	121,0	26,7	119,0	206,0
KAI	0,0524 %	2,153	0,666	244,8	24,5	72,0	12,4	62,3	146

Para a Argila Marajoara, a superfície específica é mais alta (458,2 m²/kg) e a dimensão média D[4;3] é menor (35,7 µm), sugerindo partículas mais finas e uniformes. O span de 2,816 indica uma distribuição granulométrica mais ampla, adequada para aplicações como argilas de alta plasticidade em modelagem (Yuan *et al.*, 2024 Shakrani *et al.*, 2020).

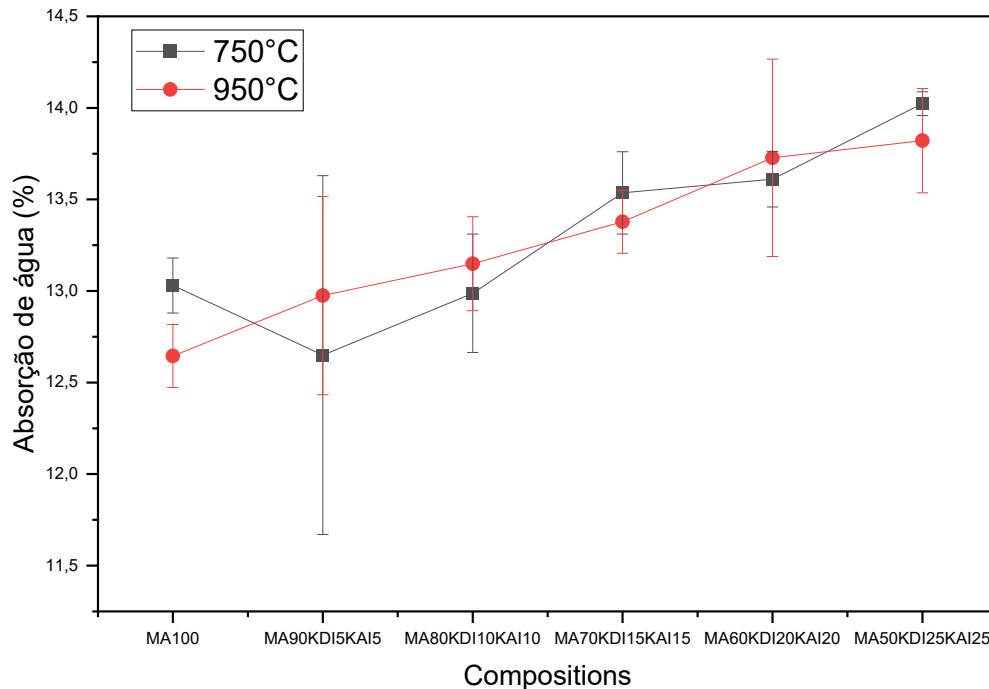
O KDI apresenta uma superfície específica de 244,8 m²/kg e um D[4;3] de 72,0 µm, indicando maior finura e distribuição granulométrica mais uniforme que o KAI, com um span de 2,153. Isso sugere um controle mais eficaz no processo de moagem, favorecendo a qualidade e eficiência do produto. O resíduo KDI tem uma superfície específica de 244,8 m²/kg e D[4;3] de 72,0 µm, indicando maior finura e distribuição mais uniforme que o KAI, com um span de 2,153. Isso sugere melhor controle no processo de moagem, beneficiando a qualidade e eficiência do produto (Guo, Guo 2024; Li *et al.*, 2020).

Os resultados para resíduo KAI, indicam um índice de refração de 1.830 e uma superfície específica de 153,5 m²/kg, sugerindo que o caulim é altamente pulverizado, com grande área disponível para interações como adsorção, o que pode influenciar suas propriedades de dispersão e reatividade (Shakrani *et al.*, 2020, Hopa, Fatehi, 2020). As dimensões médias, D[4;3] (121 µm) e Dv(50) (119 µm), mostram predominância de partículas médias, com uma uniformidade de 0,422, indicando uma dispersão limitada e uma distribuição mais uniforme.

4.3.5 Absorção de Água

A Figura 15 apresenta a absorção de água nas diferentes composições de massa estudadas.

Figura 15: Absorção de água de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 e 950°C).



Para os corpos de prova na temperatura de 750 °C, a composição AM90KDI5KAI5 apresentou a menor absorção de água, com valor médio de $12,84 \pm 1,58$, seguida pela AM100, com $13,31 \pm 1,03$. As demais composições apresentaram valores gradualmente maiores à medida que se aumentou a porcentagem de resíduos, sendo que a AM50KDI25KAI25 atingiu o maior valor, com $14,02 \pm 0,06$. Apesar dessa variação, os valores de desvio padrão, principalmente para AM90KDI5KAI5 e AM100, indicam que as diferenças podem não ser estatisticamente significativas, sugerindo comportamento semelhante entre as amostras a essa temperatura.

Na temperatura de 950 °C, a menor absorção foi observada na composição AM100, com $12,51 \pm 0,25$, seguida por AM90KDI5KAI5, com $12,98 \pm 0,24$. As composições com maiores teores de resíduos apresentaram valores crescentes, chegando a $14,53 \pm 0,14$ na AM50KDI25KAI25. Nota-se que os desvios padrão foram menores nesta faixa de temperatura, indicando maior homogeneidade nos resultados, onde maiores proporções de argila favorecem a densificação da matriz cerâmica, o que pode justificar os menores valores de absorção nessas composições (Merga et al., 2022; Wiśniewska, Pichór, Kłosek-Wawrzyn, 2021).

Comparando as duas temperaturas, observa-se que o aumento da temperatura promoveu redução nos valores de absorção de água para quase todas as composições, indicando o início de uma maior densificação estrutural. A composição AM90KDI5KAI5, mesmo a 750 °C, apresentou desempenho

equivalente ao da AM100 a 950 °C, o que sugere que a adição de 10 % de resíduos não compromete a qualidade cerâmica. Por outro lado, a AM50KDI25KAI25, mesmo em 950 °C, manteve os maiores valores de absorção, o que pode indicar que a elevada presença de resíduos dificulta a coalescência completa das partículas durante o processo de queima (Ramalho *et al.*, 2021, Silva *et al.*, 2021, Ahmad *et al.*, 2022).

Os testes realizados em todas as amostras exibem absorção de água, com resultados que variam de 12 % a 14 %, aproximadamente, configurando os limites para blocos cerâmicos e telhas. Estas composições estão em conformidade com as normas NBR 15270-1:2017 e NBR 15310:2009, que regulamentam os critérios de absorção de água para materiais cerâmicos.

A fim de avaliar estatisticamente os valores de absorção de água obtidos nas diferentes composições e temperaturas de queima (750 °C e 950 °C), foi realizada uma análise de variância (ANOVA), cujos resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de absorção de água dos corpos de provas queimados em temperatura de 750°C e 950°C.

750 C°

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,416796	5	1,8833591	3,0374497	0,017326129	2,38607
Dentro dos grupos	33,48249	54	0,6200462			
Total	42,89929	59				

950 C°

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	29,09154	5	5,818308	139,8127993	1,28E-29	2,38607
Dentro dos grupos	2,247209	54	0,041615			
Total	31,33875	59				

*SQ – Soma dos quadrados, gl – Número de graus de liberdade, MQ – Quadrado médio.

Na Tabela 11 observa-se que-ANOVA para absorção de água, existe diferença estatística onde F calculado é superior ao F crítico. Para todas as temperaturas. Assim, a hipótese de que as médias são iguais não é aceita para um nível de confiança de 95%. Com base nos resultados obtidos, foi realizado o teste Tukey para avaliar quais médias variam de acordo com a variação da absorção de água das temperaturas de 750 °C e 950 °C. Os resultados obtidos pelo teste tukey são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Análise Tukey para os resultados de absorção de água dos corpos de provas queimados na temperatura 750 °C e 950 °C.

Fonte da variação (750°C)	100AM	90AM 5KDI 5KAI	80AM 10KDI 10KAI	70AM 15KDI 15KAI	60AM 20KDI 20KAI	50AM 25KDI 25KAI
100AM	0,00	0,4677	0,3202	0,2279	0,3024	0,7155
90AM5KDI5KAI	0,4677	0,00	0,1475	0,6956	0,7701	1,1832
80AM10KDI10KAI	0,3202	0,1475	0,00	0,5481	0,6226	1,0358
70AM15KDI15KAI	0,2279	0,6956	0,5481	0,00	0,0745	0,4877
60AM20KDI20KAI	0,3024	0,7701	0,6226	0,0745	0,00	0,4131
50AM25KDI25KAI	0,7155	1,1832	1,0356	0,4877	0,4131	0,0
d.m.s	1,1031					
Fonte da variação (950°C)	100MC	90AM 5KDI 5KAI	80AM 10KDI 10KAI	70AM 15KDI 15KAI	60AM 20KDI 20KAI	50AM 25KDI 25KAI
100AM	0	0,4699	0,6278	0,7705	1,6668	2,013
90AM5KDI5KAI	0,4699	0,0	0,1579	0,3006	1,1969	1,5431
80AM10KDI10KAI	0,6278	0,1579	0,0	0,1427	1,039	1,3852
70AM15KDI15KAI	0,7705	0,3006	0,1427	0,0	0,8963	1,2425
60AM20KDI20KAI	1,6668	1,1969	1,039	0,8963	0,0	0,3462
50AM25KDI25KAI	2,013	1,5431	1,3852	1,2425	0,3462	0,0
d.m.s	0,2858					

A partir da ANOVA, obteve-se o valor da diferença mínima significativa (d.m.s), que representa o limite mínimo absoluto a partir do qual se pode considerar que existe diferença estatística significativa entre as médias dos tratamentos comparados. Assim, quando a diferença entre as médias é igual ou superior ao valor da d.m.s, infere-se que há diferença significativa entre os tratamentos. Caso contrário, não há evidência estatística de variabilidade significativa devido ao efeito do tratamento.

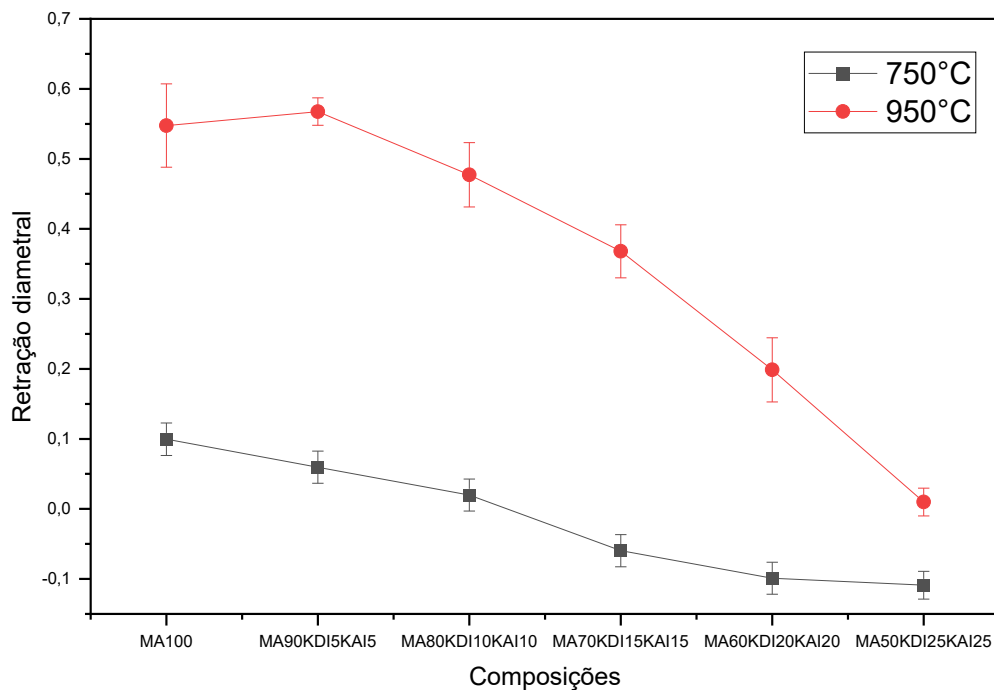
Para a variável absorção de água, os valores de d.m.s obtidos foram de 1,1031 para a temperatura de 750 °C e 0,2858 para 950 °C. Esses resultados indicam que, na temperatura de 750 °C, houve pouca diferença significativa entre as composições, com destaque apenas para as formulações 50AM25KDI25KAI e 90AM5KDI5KAI, que apresentaram diferenças estatisticamente relevantes. Por

outro lado, na temperatura de 950 °C, observou-se efeito significativo nas composições 50AM25KDI25KAI, 60AM20KDI20KAI, 70AM15KDI15KAI, 80AM10KDI10KAI e 90AM5KDI5KAI em relação à absorção de água. Verificou-se que, quanto maior a proporção de substituição da argila por resíduos de caulim, maior foi a absorção de água nos corpos cerâmicos, comportamento associado ao aumento da porosidade provocado pela presença do resíduo.

4.3.6 Retração Diametral de Queima

O comportamento da retração é apresentado na Figura 16 onde se observa uma tendência de aumento com o incremento da temperatura.

Figura 16: Retração das composições sob diferentes temperaturas.



Para os corpos de prova na temperatura de 750 °C, a retração diametral foi praticamente nula ou mínima, com valores inferiores a 0,1 % para todas as composições analisadas. Isso demonstra que essa temperatura não é suficiente para promover uma densificação significativa. Abaixo de 950 °C, o processo de densificação é predominantemente controlado por mecanismos de difusão em estado sólido, os quais são ineficazes a essa temperatura (Milheiro *et al.*, 2005)

A 950 °C, por outro lado, observa-se um aumento expressivo na retração, com valores variando de aproximadamente $0,009912768 \pm 0,19825535$ para a composição 50AM20KDI20KAI, e maior valor

de retração para 90AM5KDI5KAI de $0,567550861 \pm 0,019566041$, evidenciando o início efetivo do processo de queima. Indicando que a maior porcentagem de argila Marajoara, indica que a presença de caulinita, conforme observado no DRX, confere alta plasticidade, tendendo a sofrer maior retração durante a queima, pois a perda de água é mais acentuada para as argilas que apresentam caulinita em sua composição (Khalajzadeh, Beckermann, 2020; Yan *et al.*, 2019, Uludağ 2019).

Por outro lado, a composição AM5025KDI25KAI apresentou o menor valor de retração a 950 °C, que pode estar relacionado à presença de fases menos reativas ou à formação de estruturas mais estáveis, que dificultam o avanço do processo de sinterização.

O comportamento observado está fortemente relacionado à presença de óxidos identificados pela técnica de difração de raios X (SiO_2 e Al_2O_3) das argilas empregadas. Argilas com presença de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tendem a apresentar menor temperatura de sinterização, mas uma faixa de sinterização mais estreita, devido à formação de fase líquida em temperaturas próximas ao ponto eutético. Em contrapartida, argilas com menor razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ exigem temperaturas de sinterização mais elevadas, mas apresentam uma faixa de densificação mais ampla, o que pode resultar em menor retração final (Karamanov *et al.*, 2020; Buruchenk, Vereshchagin, Men'shikova, 2020).

Os valores obtidos neste estudo estão em concordância com os índices de retração delimitados pelas normas NBR 15270-2 e NBR 15310, que constituem uma tolerância de 5 % para tijolos de vedação, 3 % para tijolos estruturais e 2 % para telhas. Para todas as composições, foram obtidos valores inferiores ao que foi determinado pelas normas.

Com o objetivo de avaliar estatisticamente os valores de retração diametral obtidos para as diferentes composições e temperaturas de queima (750 °C e 950 °C), foi realizada ANOVA. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de retração diametral de queima.

750°C

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,424157	5	0,084831412	14,76082188	4,07E-09	2,38607
Dentro dos grupos	0,310342	54	0,005747066			
Total	0,734499	59				

950°C

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,03542 4	5	0,40708 5	38,5114498 1	1,23359E-16	2,38606986 2
Dentro dos grupos	0,57080 6	54	0,01057			
Total	2,60623 1	59				

*SQ – Soma dos quadrados, GL – Número de graus de liberdade, MQ – Quadrado médio.

Fonte: Próprio autor, 2025

A ANOVA aplicada aos valores de retração revelou que o valor de F calculado supera o F crítico, indicando que a hipótese de igualdade entre as médias deve ser rejeitada ao nível de confiança de 95 %. Isso evidencia a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados. Os resultados do teste de Tukey, utilizados para comparar as médias individuais de cada composição, estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Análise Tukey para os resultados de retração diametral dos corpos de provas queimados na temperatura 750 °C e 950 °C.

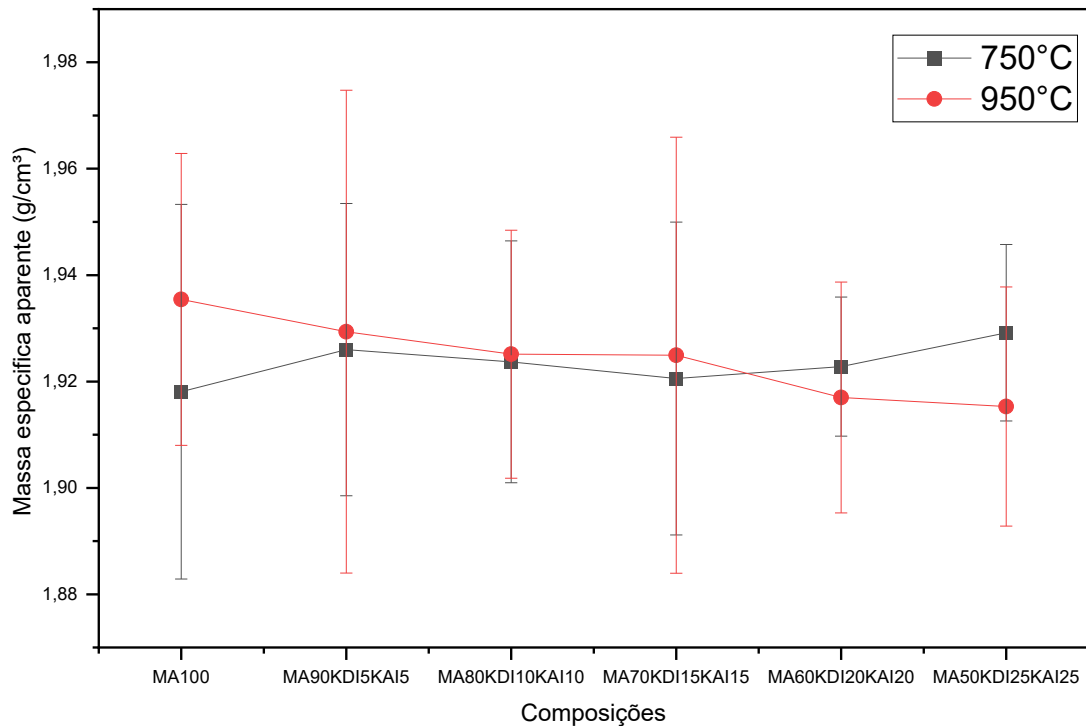
Fonte da variação (750°C)	100AM	90AM 5KDI 5KAI	80AM 10KDI 10KAI	70AM 15KDI 15KAI	60AM 20KDI 20KAI	50AM 25KDI 25KAI
100AM	0,0	0,0477	0,876	0,1669	0,2064	0,2301
90AM5KDI5KAI	0,0477	0,0	0,0399	0,1192	0,1587	0,1824
80AM10KDI10KAI	0,0876	0,0399	0,0	0,0793	0,1188	0,1425
70AM15KDI15KAI	0,1669	0,1192	0,0793	0,0	0,0395	0,0632
60AM20KDI20KAI	0,2064	0,1587	0,1188	0,0395	0,0	0,0237
50AM25KDI25KAI	0,2301	0,1824	0,1425	0,0632	0,0237	0,0
d.m.s	0,1062					
Fonte da variação (950°C)	100AM	90AM 5KDI 5KAI	80AM 10KDI 10KAI	70AM 15KDI 15KAI	60AM 20KDI 20KAI	50AM 25KDI 25KAI
100AM	0,0	0,0,119	0,0962	0,1955	0,3549	0,506

90AM5KDI5KAI	0,0119	0,0	0,0842	0,1836	0,3429	0,494
80AM10KDI10KAI	0,0962	0,0842	0,0	0,0993	0,2587	0,4098
70AM15KDI15KAI	0,1955	0,1836	0,0993	0,0	0,1593	0,3104
60AM20KDI20KAI	0,3549	0,3429	0,2587	0,1593	0,0	0,1511
50AM25KDI25KAI	0,506	0,494	0,4098	0,3104	0,1511	00
d.m.s	0,144					

O resultado da análise de Tukey revela que o d.m.s para a retração diametral, nas temperaturas de 750 °C e 950 °C, foram de 0,1062 e 0,144, respectivamente. Ao comparar as composições analisadas, observa-se que várias apresentaram médias superiores à d.m.s, indicando diferenças estatisticamente significativas principalmente entre os grupos de composição 70AM15KDI15KAI, 60AM20KDI20KAI e 50AM25KDI25KAI, em relação aos demais, isso para todas as temperaturas. Esses resultados confirmam que a substituição da argila por resíduos de KDI e KAI, em maiores proporções, resultou em uma redução significativa da retração diametral dos corpos de prova em ambas as temperaturas. Isso demonstra que materiais com maior teor de resíduos apresentam menor retração, ou seja, as composições com 50% de substituição utilizam menos massa para atingir o tamanho final desejado dos corpos de prova, pode está relacionado a propriedades intrínsecas dos materiais. A argila natural, por ser mais plástica e densa, tende a apresentar maior retração durante a secagem e a queima, em grande parte devido à sua estrutura lamelar e maior capacidade de reter água (Li *et al.*, 2020). Por outro lado, os resíduos de caulim, especialmente em forma de frações arenosas possuem menor plasticidade, menor densidade aparente e são menos ativos em termos de retração (Menezes *et al.*, 2007; Medeiros *et al.*, 2020). Além disso, esses resíduos contribuem para uma estrutura mais porosa, facilitando a liberação de água durante a secagem e reduzindo as tensões internas que normalmente provocariam maior retração.

4.3.7 Massa específica aparente

A Figura 17 apresenta a massa específica aparente das composições.

Figura 17: Análise da massa específica aparente das composições sob diferentes temperaturas

Fonte: Próprio autor, 2025

Os resultados da massa específica apresentaram divergência poucos significativas entre as composições mostrando principalmente que ambos os resíduos (KDI e KAI) e argila não apresentaram forte influência nesta propriedade. A Massa específica aparente das amostras resultou em uma variação entre 1,9 a 2,00 g/cm³ para todas as composições.

Os resultados mostraram que, para as composições, apresentaram pouca variação em função da temperatura de queima, indicando que a composição e o processamento foram homogêneos e estáveis. Portanto, os resultados indicam que o aumento da temperatura de sinterização não impactou significativamente a densidade de composições mais estáveis. Em relação aos resultados, quando a cerâmica é submetida a temperaturas mais elevadas, as partículas de argila sofrem um processo de fusão parcial. Isso não ocorreu nas amostras apresentadas. (Jalaluddin *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, Santos *et al.*, 2021).

Com o intuito de avaliar estatisticamente os valores de massa específica aparente obtidos para as diferentes composições e temperaturas de queima (750 °C e 950 °C), foi realizada ANOVA. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de retração diametral de queima.

ANOVA 750°C

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00150563	5	0,000301126	0,472615	0,79501731	2,386069862
Dentro dos grupos	0,034406034	54	0,000637149			
Total	0,035911665	59				

ANOVA 950°C

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,002843941	5	0,000568788	0,56735545	0,72456893	2,386069862
Dentro dos grupos	0,054136359	54	0,001002525			
Total	0,0569803	59				

*SQ – Soma dos quadrados, GL – Número de graus de liberdade, MQ – Quadrado médio.

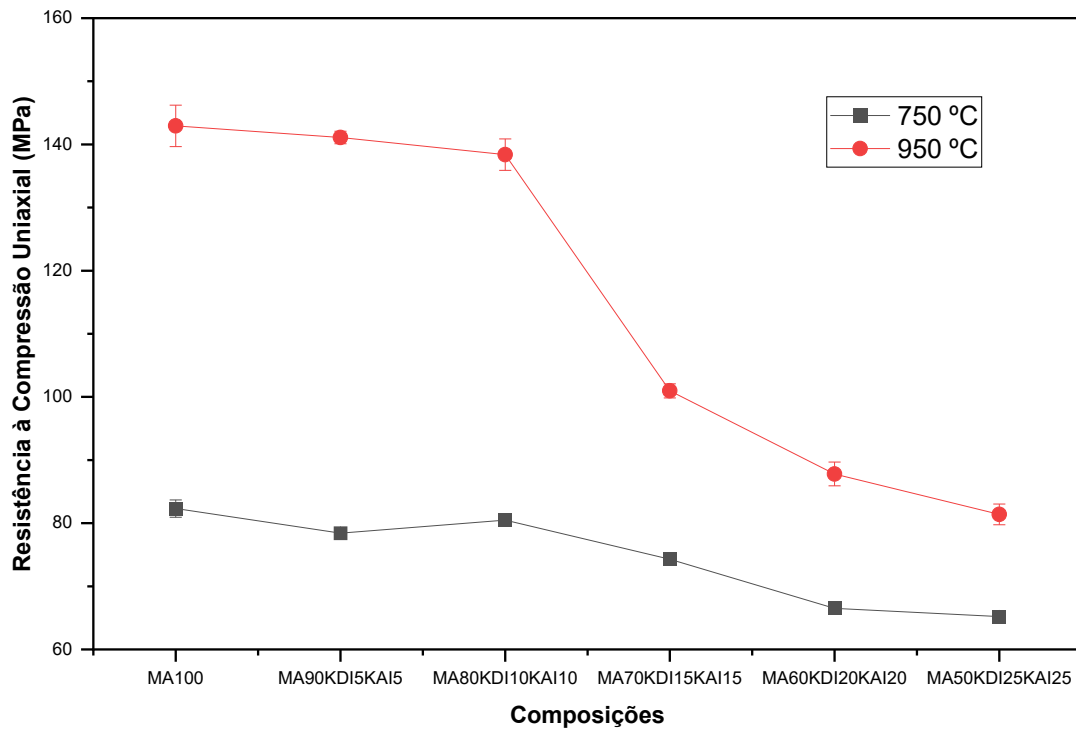
Fonte: Próprio autor, 2025

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos valores de massa específica aparente revelou que o valor de F calculado foi inferior ao F crítico, indicando que não há evidências suficientes para afirmar diferenças significativas entre os grupos. Dessa forma, não se rejeita a hipótese de igualdade entre as médias, considerando um nível de confiança de 95%.

4.3.8 Resistência à compressão uniaxial

A figura 18 apresenta a resistência a compressão uniaxial das composições avaliadas.

Figura 18: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 °C e 950°C).



Para melhor detalhamento dos resultados, a Tabela x apresenta os valores médios de resistência à compressão uniaxial das diferentes composições, considerando as duas temperaturas de queima.

Tabela 16: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (750 °C e 950°C).

Composições	750°C (MPa)	950°C (MPa)
100AM	82,32 ± 1,37	142,94 ± 3,29
90AM5KDI5KAI	78,43 ± 0,53	141,09 ± 0,99
80AM10KDI10KAI	80,48 ± 0,75	138,37 ± 2,49
70AM15KDI15KAI	74,30 ± 0,12	100,97 ± 1,12
60AM20KDI20KAI	66,52 ± 0,96	87,80 ± 1,89
50AM25KDI25KAI	65,22 ± 0,90	81,38 ± 1,64

Observa-se que a resistência à compressão de 750 °C foram maiores na composição MA100, com 82,32 MPa, seguida pela composição 90AM5KDI5KAI, com 78,43 MPa. Dentre as composições, a 80AM10KDI10KAI apresentou 80,48 MPa, cujo resultado é promissor, pois, apesar de 20% da matéria-prima ser composta por resíduos, não houve alteração significativa quando comparada à resistência da argila 100%. Enquanto isso, as composições com maior porcentagem de resíduos, como 70AM15KDI15KAI, 60AM20KDI20KAI e 50AM25KDI25KAI, apresentaram menores valores à compressão avaliados na temperatura de 750 °C, com valores de 74,30 MPa, 66,52 MPa e 65,22 MPa,

respectivamente. Mesmo com resistências inferiores, esses valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR15270-1.

Ao analisar os corpos de prova com variação de massa queimados a 950 °C, infere-se que todos valores médio diminuíram em relação à 100AM para a temperatura de 950°C. Esse comportamento pode ser explicado pela maior densificação do material em temperaturas mais altas, resultando em uma microestrutura mais coesa, com menor porosidade e maior ligação entre as partículas (Mola-Abasi, Saberla, Li, 2019). As composições 100AM e 90AM5KDI5KAI apresentaram resistências mais altas, com valores de 142,94 MPa e 141,09 MPa, respectivamente, não apresentando variações significativas quando comparadas às composições 70AM15KDI15KAI (100,97 MPa), 60AM20KDI20KAI (87,80 MPa) e 50AM25KDI25KAI (81,38 MPa), que apresentaram resistências inferiores, mas com alto potencial de aplicabilidade. Dentre as variações de massa na temperatura de 950°C, a composição 80AM10KDI10KAI apresentou bons rendimentos com a incorporação de resíduos, alcançando uma resistência de 138,37 MPa, o que pode indicar características importantes para o setor da construção civil, bem como a substituição de 20% da argila, sem impacto significativo na resistência e com boa compactação.

Em temperaturas mais altas como a de 950°C, o processo de sinterização é mais completo, resultando em propriedades mecânicas mais uniformes entre as amostras (Yuan *et al.*, 2024). Por outro lado, nas amostras sinterizadas a 750°C, observa-se uma maior variabilidade, possivelmente devido à presença de microestruturas heterogêneas causadas por sinterização incompleta (Somani, Tyagi, Gupta, 2021; Aatthisugan *et al.*, 2020). Os resultados apresentados no gráfico destacam a importância de combinar a composição química apropriada com a temperatura de queima ideal para otimizar as propriedades mecânicas de compressão. Temperaturas mais altas proporcionam maior resistência, mas a escolha da composição também desempenha um papel crucial, sendo essencial equilibrar a matriz principal e os aditivos para atingir o desempenho desejado (Arlazarov *et al.*, 2020; Muhammed, Olayiwola, Elkatatny, 2021).

Dentro dos resultados abordados, a composição 80AM10KDI10KAI, tanto na temperatura de 750°C quanto na de 950°C, apresentou uma evolução menos acentuada, sugerindo que há uma concentração otimizada de aditivos para maximizar as propriedades mecânicas sem comprometer outros aspectos, como a uniformidade microestrutural. A resistência se manteve muito próxima à da composição 100AM.

Para avaliar estatisticamente os valores de resistência a compressão obtidos para as diferentes composições e temperaturas de queima (750 °C e 950 °C), foi realizada ANOVA. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Resultado da análise de variância (ANOVA) para avaliar os valores de compressão.

Fonte da variação (750°C)	SQ	gl	MQ	F	valor- P	F crítico
Entre grupos	1048,894	5	209,778784	211,9684	2,44E- 15	2,772853
Dentro dos grupos	17,81406	18	0,989670259			
Total	1066,708	23				

Fonte da variação (950°C)	SQ	gl	MQ	F	valor- P	F crítico
Entre grupos	16207,62	5	3241,523	640,1677	1,31E- 19	2,772853
Dentro dos grupos	91,14396	18	5,063553			
Total	16298,76	23				

*SQ – Soma dos quadrados, GL – Número de graus de liberdade, MQ – Quadrado médio.

Para a resistência a compressão na temperatura de 750°C, observa-se que o valor de F calculado (211,9684) é superior ao valor crítico de F (2,772853). Dessa forma, rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias, considerando um nível de confiança de 95%. Enquanto, na temperatura de 950°C, o F calculado (640,1677) é novamente superior ao valor crítico de F (2,772853), indicando que há evidências para rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias na temperatura mais alta. Com isso, os resultados das comparações múltiplas entre as composições podem ser visualizados na Tabela 18 que apresenta o Teste de Tukey aplicado aos dados de resistência à compressão.

Tabela 18: Teste de Tukey dos resultados de Resistência à compressão

Fonte da variação (750°C)	100AM	90AM	80AM	70AM	60AM	50AM
		5KDI	10KDI	15KDI	20KDI	25KDI
		5KAI	10KAI	15KAI	20KAI	25KAI
100AM	0	3,8930	1,8446	8,0255	15,8064	17,1006
90AM5KDI5KAI	3,8930	0	2,0484	4,1325	11,9134	13,2076

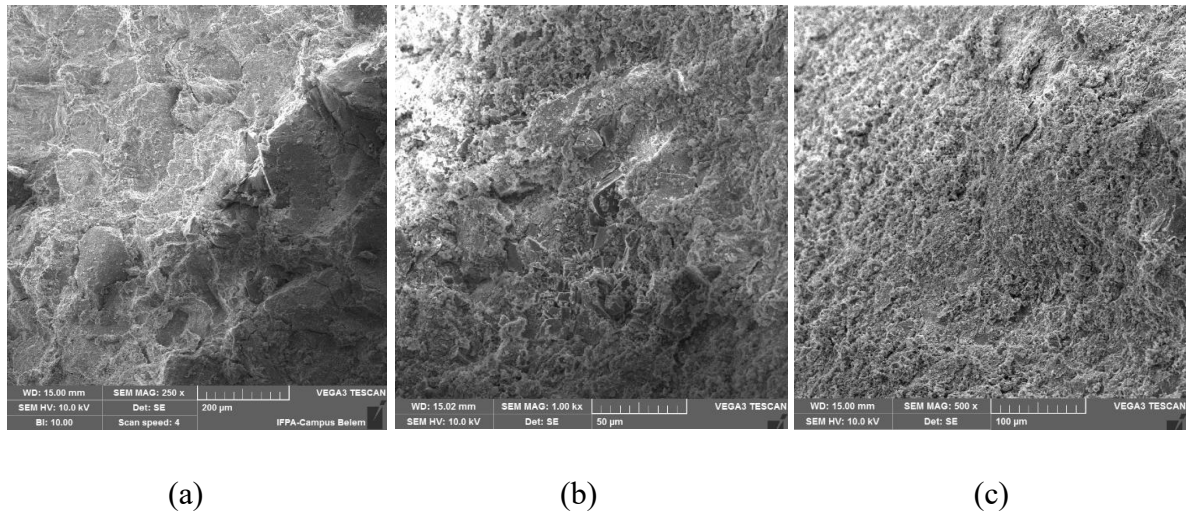
80AM10KDI10KAI	1,8446	2,0484	0	6,1809	13,9618	15,2561
70AM15KDI15KAI	8,0255	4,1325	6,1809	0	7,7809	9,0752
60AM20KDI20KAI	15,8064	11,9134	13,9618	7,7809	0	1,2943
50AM25KDI25KAI	17,1006	13,2076	15,2561	9,0752	1,2943	0
d.m.s	2,2357					
Fonte da variação (950°C)	100AM	90AM	80AM	70AM	60AM	50AM
		5KDI	10KDI	15KDI	20KDI	25KDI
		5KAI	10KAI	15KAI	20KAI	25KAI
100AM	0	1,8540	4,5600	41,9620	54,1401	60,5044
90AM5KDI5KAI	1,8450	0	2,7150	40,1170	52,2991	58,6594
80AM20KDI20KAI	4,5600	2,7150	0	37,4020	49,5801	55,9444
70AM15KDI15KAI	41,9620	40,1170	37,4020	0	12,1781	18,5424
60AM20KDI20KAI	54,1401	52,2951	49,5801	12,1781	0	6,3643
50AM25KDI25KAI	60,5044	58,6594	55,9444	18,5424	6,3643	0
d.m.s	5,0565					

O teste de Tukey foi aplicado para identificar os grupos que apresentaram diferenças significativas no ensaio de compressão. O valor da diferença mínima significativa (d.m.s) foi de 2,2357 para a temperatura de 750°C, e 5,0565 para 950°C. A temperatura de 750 °C indicou diferenças significativas principalmente entre os grupos de composição 70AM15KDI15KAI, 60AM20KDI20KAI e 50AM25KDI25KAI, em relação aos demais, evidenciando que o tratamento térmico influenciou fortemente a propriedade analisada. Aos 950 °C, essa diferença se intensificou em mais grupos, porém mais acentuadas entre os grupos de composição 70AM15KDI15KAI, 60AM20KDI20KAI e 50AM25KDI25KAI. Esse padrão sugere que temperaturas mais elevadas ampliam as diferenças estruturais entre os grupos. Portanto, o comportamento mecânico dos materiais é impactado pela temperatura de queima, o que sugere que em temperaturas mais elevadas, os eventos de sinterização provocam maior densificação nas peças e menor porosidade fechada.

4.3.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 19 mostra a superfície dos corpos de provas, após a fratura das composições 100MC, 80AM10KDI10KAI, 50AM25KDI25KAI, queimadas a 750°C.

Figura 19- Micrografia de MEV das formulações queimadas a 750°C. (a) 100AM. (b) 80AM10KDI10KAI. (c) 50AM25KDI25KAI.



Fonte: Próprio autor, 2025.

A formulação 100AM, apresentou uma superfície com regiões densificadas e a presença de fraturas, características de um processo de sinterização parcial típico dessa faixa de temperatura (Muhammed, Olayiwola, Elkatatny, 2021; Arlazarov *et al.*, 2020). A composição exclusivamente argilosa favoreceu uma compactação mais eficiente entre as partículas, refletindo uma distribuição relativamente homogênea e boa coesão na matriz. Essa estrutura densa está associada ao menor valor de absorção de água de 12,6% e à maior resistência à compressão de 82,32 MPa entre as formulações analisadas a 750 °C, indicando maior eficiência no processo de sinterização e menor presença de poros (Merga *et al.*, 2022; Wiśniewska, Pichór, Kłosek-Wawrzyn, 2021).

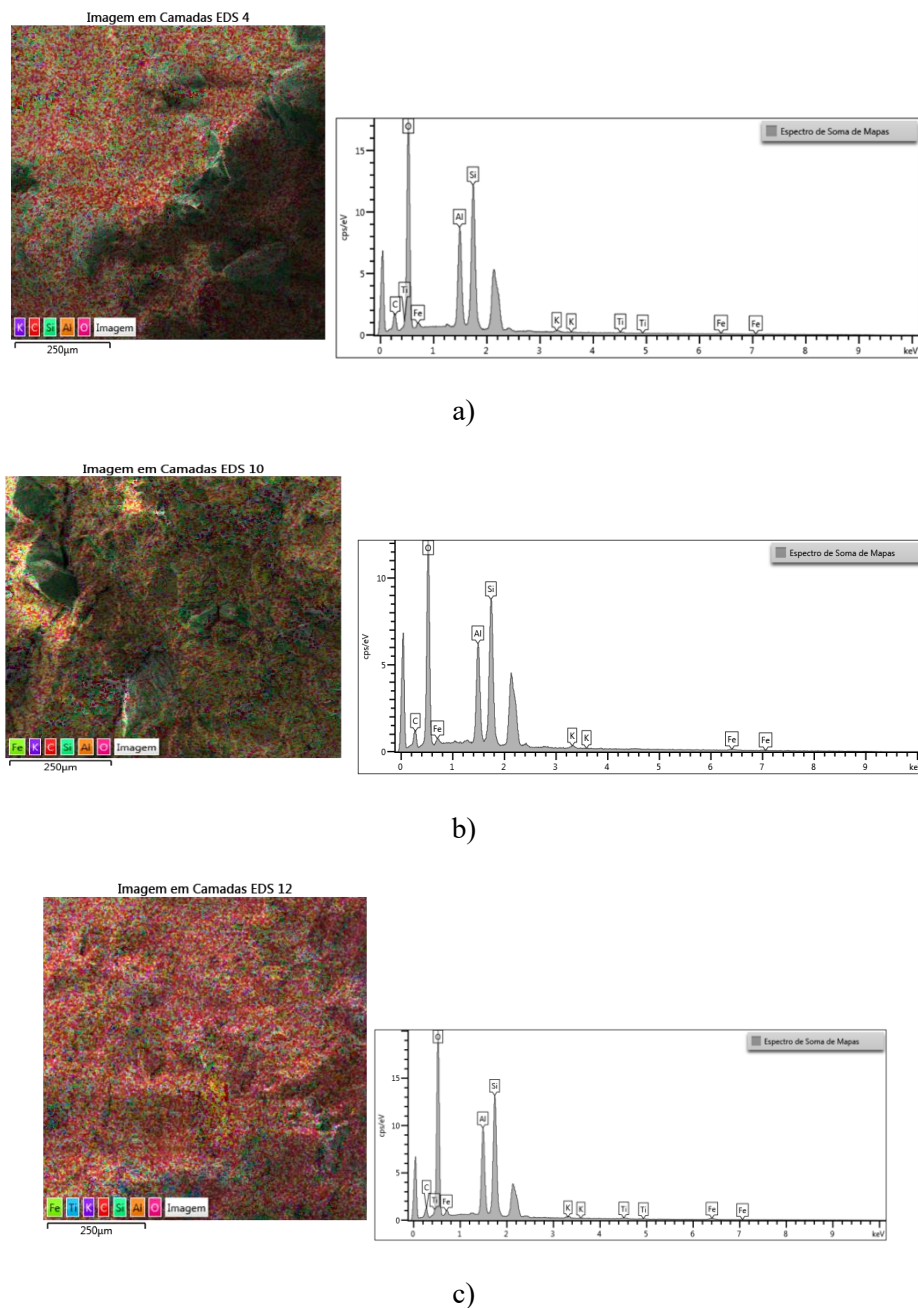
A formulação 80AM10KDI10KAI apresenta uma microestrutura aglomerada, com partículas de tamanhos heterogêneos e poros visíveis, consequência da introdução de 20% de resíduos nas frações argilosa e arenosa (Aydinyan, Kharatyan, Hussainova, 2022). Ainda assim, essa composição manteve uma resistência à compressão considerável de 80,48 MPa, muito próxima à da amostra 100AM, e uma absorção de água controlada com aproximadamente 13,3%, o que sugere que essa proporção de substituição não compromete de forma significativa a integridade do material. A imagem também indica que há um bom grau de empacotamento, mesmo com a heterogeneidade, o que reforça a viabilidade técnica da substituição parcial da argila marajoara.

Já a formulação 50AM25KDI25KAI apresentou uma microestrutura mais heterogênea, com evidência de aglomerados e porosidades mais acentuadas, indicativas de sinterização ainda incipiente e possível presença de resíduos orgânicos ou voláteis sendo eliminados (Jones *et al.*, 2021; Thor *et al.*, 2024). O aumento da fração de resíduos comprometeu o empacotamento e a coalescência das partículas, o que se refletiu nos menores valores de resistência de 65,22 MPa e nos maiores de absorção de água de 14,02% a 750 °C. Apesar de a matriz ainda indicar um processo de consolidação em andamento, a

porosidade observada contribui para a redução da resistência mecânica e o aumento da permeabilidade. Ainda assim, todas as composições avaliadas a 750 °C mantiveram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pelas normas NBR 13818:1997, indicando viabilidade para aplicações cerâmicas.

Na Figura 20 apresenta-se o espectro EDS da formulação na faixa de queima de 750 °C, evidenciando a distribuição elemental na superfície.

Figura 20: EDS das formulações queimadas a 750°C, na faixa de variação de massa específica. (a) 100AM. (b) 80AM10KDI10KAI. (c) 50AM25KDI25KAI.



A composição química por EDS da formulação 100AM da figura 20a, revelou predominância dos elementos silício (Si) e alumínio (Al), além da presença de potássio (K), titânio (Ti) e ferro (Fe) em

menores concentrações, como observado nos resultados de FRX. Esses elementos são característicos de argilas cauliníticas, o que reforça a composição mineralógica já esperada da matéria-prima. Quando associada à imagem de MEV da mesma formulação, observa-se que a superfície apresenta regiões densificadas, o que sugere um estágio intermediário de sinterização a 750 °C.

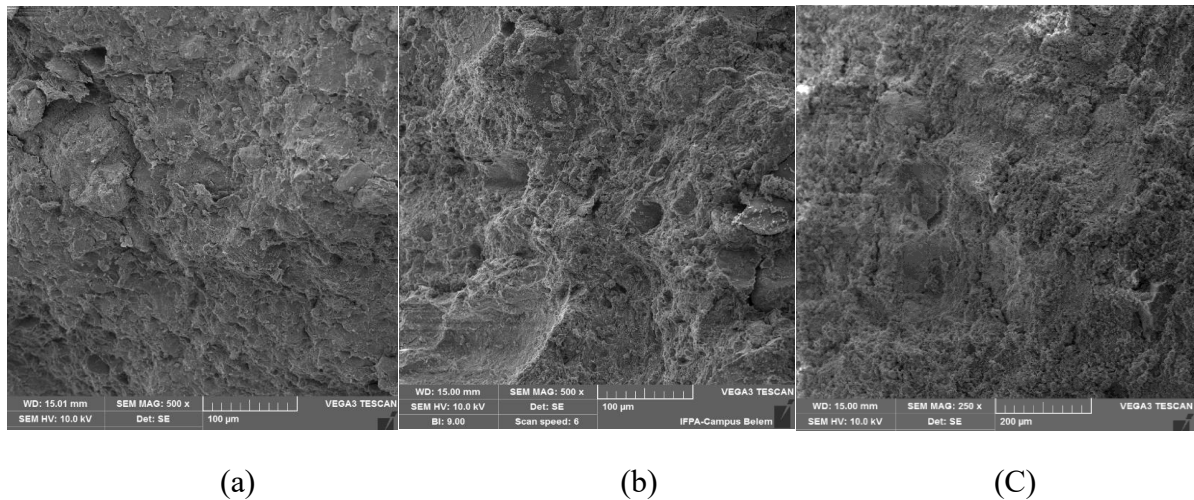
A análise química por EDS da formulação 80AM10KDI10KAI da figura 20b, revelou uma matriz composta majoritariamente por silício (Si) e alumínio (Al), elementos associados à presença de óxidos como SiO_2 e Al_2O_3 . A predominância desses óxidos está diretamente relacionada à estabilidade térmica e estrutural da matriz cerâmica. A distribuição elementar identificada é compatível com a natureza caulinítica da argila base, mas agora modificada com a presença de resíduos oriundos do beneficiamento do caulim.

A microestrutura observada anteriormente por MEV apresenta aglomerados e partículas com distribuição de tamanho heterogênea, o que pode estar associado ao comportamento de dispersão dos resíduos incorporados. A presença de alumínio, amplamente identificada, reforça a formação de fases aluminosilicáticas estáveis, sendo um dos componentes críticos para o desenvolvimento de estruturas cerâmicas mais resistentes e refratárias. (Yilmaz, Bayata, Solak, 2024; Czerwinski, 2020).

Os resultados obtidos por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) da formulação 50AM25KDI25KAI da figura 20c, confirmam a predominância de óxidos, com destaque para os elementos silício (Si) e alumínio (Al), representando majoritariamente a presença de SiO_2 e Al_2O_3 . Essa composição está de acordo com a natureza mineral da argila marajoara e dos resíduos de caulim, ambos tradicionalmente ricos nesses óxidos (Grine *et al.*, 2021; Cheng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2019). Além disso, a presença de ferro (Fe) indica a ocorrência de óxidos férricos ou ferrosos, cuja influência pode se refletir tanto na coloração final quanto em possíveis interações em processos catalíticos (Martínez *et al.*, 2020).

Nesse estudo, também foram avaliados a superfície da fratura dos corpos de provas queimados a uma temperatura de 950 °C. Na Figura 21, mostra a superfície dos corpos de provas, após a fratura das composições 100AM, 80AM10KDI10KAI, 50AM25KDI25KAI.

Figura 21: Micrografia de MEV das formulações queimadas a 950°C. (a) 100AM. (b) 80AM10KDI10KAI (c) 50AM25KDI25KAI.. Aumento: 500x.



A micrografia de MEV da formulação 100AM na figura 21a, revela uma matriz homogênea e compacta, com distribuição uniforme das partículas. Essa textura densa, associada à pureza mineralógica da argila marajoara, reflete um processo de sinterização eficaz a 950 °C. A estrutura coesa observada justifica o elevado valor de resistência à compressão de 142,94 Mpa e a baixa taxa de absorção de água $\pm 12,5\%$, indicando mínima presença de espaços interparticulares. Esses resultados são compatíveis com a maior densificação, promovida pelo tratamento térmico nesta faixa de temperatura, confirmando o bom desempenho da matriz pura (Mola-Abasi, Saberian, 2021, Cardoso *et al.*, 2024).

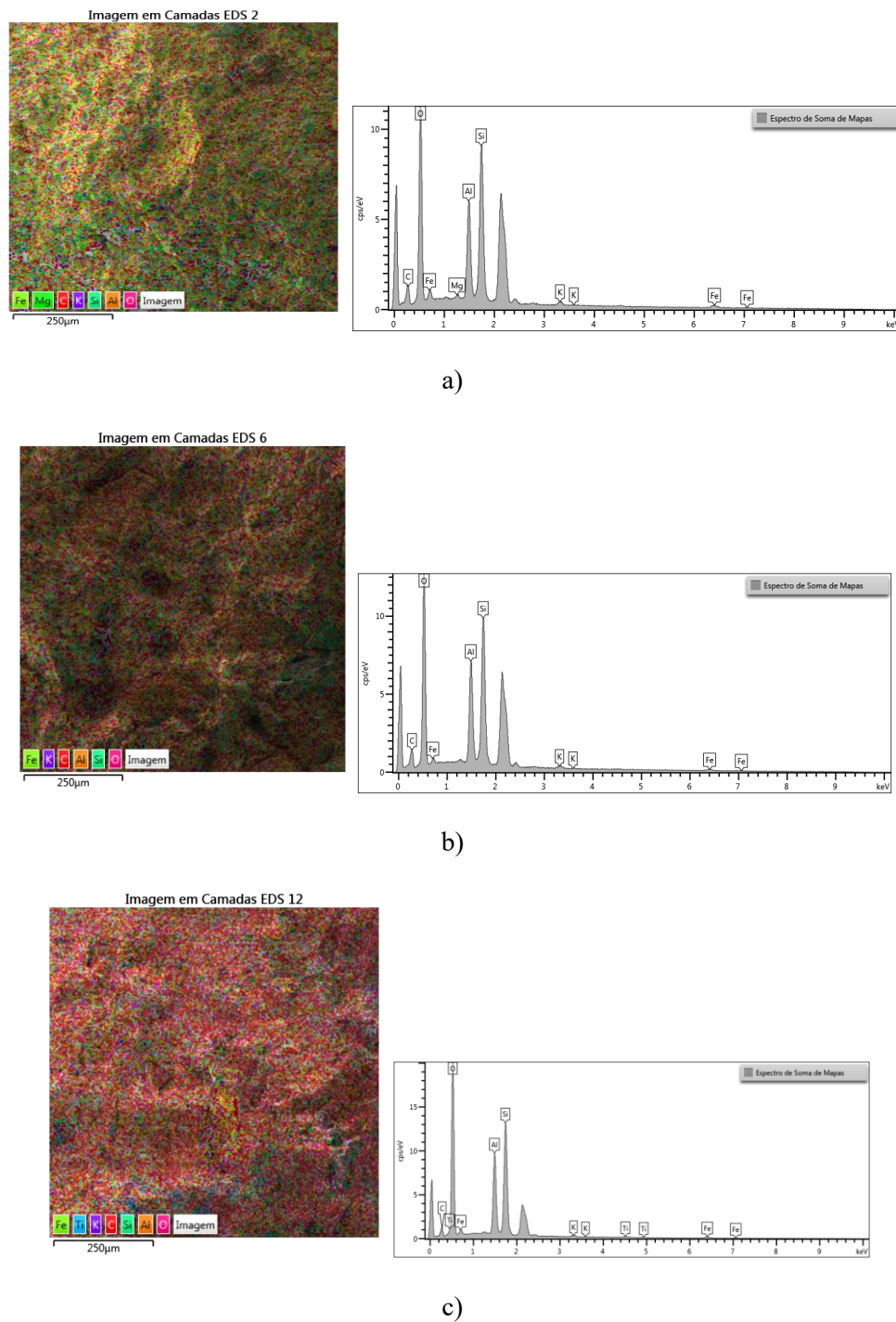
A figura 21b da composição 80AM10KDI10KAI, evidencia uma microestrutura também densa e bem organizada, com distribuição uniforme das partículas e baixa porosidade visível. Em comparação à composição 100AM, a incorporação de 20% de resíduos não comprometeu significativamente a coesão estrutural. Isso é reforçado pelo resultado de resistência à compressão de 138,37 MPa, praticamente equivalente ao da formulação pura, além de manter uma taxa de absorção de água igualmente baixa $\pm 12,7\%$. A organização interna observada sugere que a moderada de resíduos pode favorecer uma boa compactação, mantendo a integridade mecânica. Isso resulta em uma matriz homogênea e compacta, com baixa porosidade e distribuição uniforme das partículas. Destaca-se a organização densa dessas partículas, com distribuição consistente e poucos espaços interparticulares. (Soinne *et al.*, 2023, Ardant, Brumaud, Habert, 2020; Raji *et al.*, 2018, Adeniyi *et al.*, 2021).

A imagem de MEV da formulação 50AM25KDI25KAI da figura 21c, revela uma microestrutura visivelmente mais heterogênea, com porosidade moderada e agregados distribuídos de forma irregular. Essa condição está diretamente associada à redução da resistência à compressão de 81,38 MPa e ao leve aumento na absorção de água $\pm 13,8\%$. Essa microestrutura heterogênea pode ser atribuída ao elevado percentual da fração areia presente na curva granulométrica do KAI, que contribui para uma menor compactação e maior porosidade da matriz cerâmica, dificultando a coalescência dos grãos durante a queima e comprometendo as propriedades mecânicas e físicas do material (Ramalho *et al.*, 2021; Ahmad *et al.*, 2020). A substituição de metade da argila por resíduos compromete

parcialmente a plasticidade da massa cerâmica, resultando em menor coesão e em uma sinterização menos eficiente. A presença de espaços interparticulares maiores, indicados na micrografia, demonstra uma matriz menos densificada (Bouchehma *et al.*, 2023; Kwaśniewska *et al.*, 2020).

Na figura 22 observa-se os espectros obtidos por EDS das formulações queimadas a 950 °C demonstrando particularidades de cada amostra.

Figura 22: EDS das formulações queimadas a 950°C. (c) 100AM. (b) 80M10KDI10KAI. (c) 50M25KDI25KAI.



A análise por EDS da formulação 100AM na figura 22a, queimados na temperatura 950 °C confirma a predominância de silício e alumínio, como observado nos resultados de FRX. Essa composição química está em conformidade com a microestrutura homogênea e compacta observada por MEV da figura 14a, caracterizada pela ausência de poros visíveis e alta coesão entre as partículas que torna a composição 100% de argila adequado para aplicações cerâmicas de alta densidade, como pisos e revestimentos. No entanto, a falta de resíduos pode limitar sua viabilidade econômica e sustentabilidade, pois o uso de resíduos reduz custos e impacto ambiental (97-100). Mymrin *et al.*, 2020; Atan *et al.*, 2021).

Os resultados de EDS da 80AM10KDI10KAI da figura 22b, confirmam a qualidade química da composição, de silício, e de alumínio, garantindo estabilidade estrutural para aplicações de alta resistência. A presença de ferro contribui para a resistência mecânica e térmica, enquanto o potássio favorece a sinterização e a integração das partículas, mas com valores baixo que o torna o insignificativo para esta análise (Sharma, Das, Kumar, 2023; Jakubczak, Bienias, Drożdziel, 2020). Esses dados são coerentes com a análise de FRX. Além disso, a microestrutura observada por MEV da figura 14b, que apresenta uma matriz homogênea e densa, com baixa porosidade e distribuição uniforme das partículas, indicando uma boa integração entre os componentes e sinterização eficiente da composição.

Observa-se que a amostra 50AM25KDI25KAI da figura 22c, que a inclusão de resíduos de caulim resultou em uma composição química balanceada, com alta concentração de silício, predominando de SiO_2 . O óxido de alumínio (Al_2O_3) em concentração que contribui para a estabilidade estrutural, e o ferro melhora a resistência mecânica e térmica, essencial em aplicações cerâmicas duráveis, elementos confirmados pelas análises de FRX dos materiais (Jia *et al.*, 2022; Biswas *et al.*, 2023). Elementos como potássio, titânio desempenham papéis importantes. O potássio, proveniente da mica muscovita, atua como fundente, e o titânio e ferro sugerem fases secundárias que impactam as propriedades finais (Lenar, Piech, Paczosa-Bator, 2022; Feng *et al.*, 2023). A formação de fases secundárias, como Ti, pode influenciar a dureza e resistência ao desgaste (Islak, Ayas, 2019; Namini, Asl, Delbari, 2019). Essas características químicas estão de acordo com a microestrutura observada na imagem de MEV da figura 14c, que revela uma matriz heterogênea, com porosidade moderada e distribuição irregular de partículas, indicando uma sinterização menos eficiente e possível influência da maior concentração de resíduos na coesão do compósito.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a incorporação de resíduos de caulim (KDI e KAI) à massa argilosa Marajoara apresenta grande potencial tecnológico e sustentável para a produção de materiais cerâmicos, especialmente tijolos ecológicos. A incorporação de resíduos permitiu a formulação de composições com desempenho compatível com os padrões técnicos exigidos, promovendo, ao mesmo tempo, uma alternativa ambientalmente mais responsável para o setor cerâmico.

A análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) revelou que a argila Marajoara possui altos teores de SiO_2 e Al_2O_3 , conferindo-lhe boas propriedades cerâmicas. Os resíduos de caulim, por sua vez, apresentaram elevados teores de quartzo (SiO_2), que embora reduzam a plasticidade da massa, favorecem a estabilidade térmica e a sinterização dos materiais. A perda ao fogo observada nos resíduos, especialmente no KDI, foi atribuída à presença de grupos hidroxilas, indicando a natureza dos argilominerais presentes.

A análise granulométrica mostrou que a argila Marajoara possui predominância de partículas finas, 90% abaixo de 100 μm , o que favorece boa compactação e densidade. Os resíduos de caulim apresentaram partículas de tamanhos mais uniformes, com maior porosidade e reatividade, características benéficas para formulações mais leves e com propriedades específicas. Do ponto de vista da densidade, a argila foi mais compacta, enquanto os resíduos apresentaram estruturas mais leves, o que pode ser vantajoso para aplicações que exigem menor peso.

Quando se refere aos teores de umidade higroscópica das matérias-primas, com a argila Marajoara apresentando o menor teor de umidade (4,64%), enquanto os resíduos de caulim (KDI e KAI) possuem teores mais altos (25,41% e 13,71%, respectivamente). A maior umidade nos resíduos se deve à sua estrutura porosa, que favorece a absorção de água. O processo de secagem é influenciado pela temperatura, com as moléculas de água fortemente ligadas às partículas. Em termos de densidade, a argila Marajoara é mais densa que os resíduos, devido à sua estrutura compacta e à variedade de minerais presentes. Já os resíduos de caulim, com baixa densidade, são mais porosos e leves, o que é vantajoso em diversas aplicações industriais.

Na microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matérias revelou que a argila Marajoara é composta por partículas lamelares e heterogêneas, com formatos finos e aglomerados. O resíduo de caulim arenoso (KAI) mostra partículas de diferentes tamanhos, com aglomerados finos e partículas grandes com formas irregulares, possivelmente de quartzo. A micrografia do resíduo de caulim (KDI) também destaca partículas aglomeradas,

predominantemente com cristais pseudo-hexagonais de caulinita. A análise MEV dos resíduos de caulim revela uma estrutura cristalina distinta e a presença de aglomerados de argilominerais. Essas características são típicas dos solos e minerais ricos em caulim.

A análise da Argila Marajoara, conforme os limites de Atterberg, revela um limite de liquidez (LL) de 57,40%, limite de plasticidade (LP) de 35,01% e índice de plasticidade (IP) de 22,39%. Esses valores elevados indicam uma predominância de partículas finas, como silte e argila, que aumentam a capacidade de retenção de água e plasticidade do solo. A alta coesão da argila a torna adequada para aplicações geotécnicas, como barreiras impermeáveis e aterros compactados. O elevado LP também indica que a argila mantém sua coesão em condições de baixa umidade, garantindo estabilidade em ambientes secos.

Nos resultados de retração, absorção de água e densidade estão inter-relacionadas nas composições cerâmicas estudadas. O aumento da temperatura de queima resulta em menor absorção de água, devido à maior sinterização e redução da porosidade, o que também promove maior densificação do material, aumentando sua densidade. A retração, por sua vez, tende a aumentar com a temperatura, refletindo a redução da porosidade e a formação de ligações interpartículas mais densas. Composições com maior capacidade de sinterização mostram menor absorção de água e maior densidade, enquanto aquelas com menor sinterização apresentam maior absorção e variação na densidade. Esses fatores combinados influenciam a estabilidade e as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos.

Outro ponto relevante é que todas as formulações atenderam aos requisitos da norma NBR 7215 mesmo quando sinterizadas a 750 °C, o que evidencia a possibilidade de reduzir a temperatura de queima utilizada na indústria cerâmica paraense (geralmente em torno de 900 °C). Essa redução implica economia de energia térmica, diminuição dos custos operacionais e menor impacto ambiental.

Com base nos estudos realizados, a composição AM80KDI10KAI10 foi considerada a mais promissora, tanto na temperatura de 750 °C quanto de 950 °C. Essa formulação é especialmente indicada para a fabricação de tijolos maciços ecológicos, pois alia alta resistência mecânica, redução de impacto ambiental e compatibilidade com os padrões técnicos e industriais exigidos. Além disso, a adoção dessa solução representa uma estratégia de diversificação da produção cerâmica regional, atualmente concentrada na fabricação de blocos de vedação, promovendo inovação e sustentabilidade no setor.

REFERÊNCIAS

- Aatthisugan, I.; Banerjee, A.; Hasan, M.; Patel, A.; Pushkar, K.; Dey, S.; Sohail, S.; Khateeb, S.; Das, A. Efeito da temperatura de sinterização na microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos de alumínio. *Série de conferências do IOP: Ciência e engenharia de materiais*, 912, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/3/032070>.
- ABCERAM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Cerâmica no Brasil – considerações gerais. 2023. Disponível em: Acesso em: 07 jun., 2023.
- ABNT NBR 6459:2016. Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 10 março 2024.
- Adeniyi, A., Abdulkareem, S., Ighalo, J., Oladipo-Emmanuel, F., & Adeyanju, C. (2021). Propriedades microestruturais e mecânicas dos compósitos de poliestireno híbrido preenchidos com fibra de bananeira/argila local. *Mecânica de Materiais e Estruturas Avançadas*, 29, 7104 - 7114. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1992692>
- AGUIAR, Mariane Costalonga de; GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini. Cerâmica vermelha fabricada com resíduo de rochas ornamentais: Teste industrial. 2021.
- Ahmad, J.; Kontoleon, K. J.; Al-Mulali, M. Z.; Shaik, S.; Hechmi El Ouni, M.; El-Shorbagy, M. A. Substituição parcial de material de ligação por argila bentonítica (BC) em concreto: uma revisão. *Edifícios*, 12(5), 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12050634>.
- ALMEIDA, J.C. Produção de tijolos ecológicos por prensagem a frio: uma análise de impacto ambiental. *Revista de Engenharia Civil*, v.10, n. 2, p. 45-58, 2021.
- ALVES, Hugo Plínio de Andrade et al. Utilização do delineamento de misturas de caulim, resíduo do caulim e alumina para obtenção de cerâmicas à base de mulita. 2016.
- Amorós, J., Blasco, E., Feliu, C., & Moreno, A. (2021). Effect of particle size distribution on the evolution of porous, microstructural, and dimensional characteristics during sinter-crystallisation of a glass-ceramic glaze. *Journal of Non-crystalline Solids*, 572, 121093. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2021.121093>.
- ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Dados do setor. 2023. Disponível em: Acesso em: 07 jun., 2023.
- ARAÚJO, Carla Suellem Sousa et al. SÍNTESE HIDROTERMAL POR FUSÃO ALCALINA DE ZEÓLITA NA-P1 DE REJEITOS DE CAULIM DA AMAZÔNIA E SUA APLICAÇÃO NA RETENÇÃO DE AZUL DE METILENO. *HOLOS*, v. 6, n. 39, 2023.

Ardant, D.; Brumaud, C.; Habert, G. Influência de aditivos no desenvolvimento da resistência da terra vazada. *Materials and Structures*, 53, 2020. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01564-y>.

Arlazarov, A.; Barreto, S.; Kabou, N.; Huin, D. Evolução da temperatura de Ms como uma função da composição e do tamanho do grão. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 6159-6166, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06022-6>.

Arlazarov, A.; Barreto, S.; Kabou, N.; Huin, D. Evolução da temperatura de Ms como uma função da composição e do tamanho do grão. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 6159-6166, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06022-6>.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016) ABNT NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007, Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASTM. ASTM C326-03 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays; 1996.

Atan, E., Sutcu, M., & Çam, A. (2021). Efeitos combinados de resíduos de bauxita do processo bayer (lama vermelha) e resíduos agrícolas nas propriedades tecnológicas de tijolos de argila cozida. *Journal of building engineering*, 43, 103194. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103194>

AVELINO, N. N. M.; SANTOS, H.C.; DANTAS, H.J.; SILVA, S.C.A; LEITE, C.A.; LEITE, I.A. Extração do Caulim em Junco do Seridó, Paraíba: análise dos impactos ambientais e da saúde dos trabalhadores. Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 2012.

Aydinyan, S., Kharatyan, S., & Hussainova, I. (2022). A influência da diluição térmica na evolução da microestrutura de alguns compósitos cerâmicos refratários sintetizados por combustão. *Cristais*. <https://doi.org/10.3390/cryst12010059>.

BABISK, Michelle Pereira et al. Uso de planejamento experimental no aproveitamento de resíduo do processo Bayer em cerâmica vermelha. 2023.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulíníticos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. *Cerâmica*, [s.l.], v. 58, n. 345, p.36-42, mar. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132012000100007>.

Barbosa, G., Marques, E., Ker, J., Assis, I., Cunha, T., & Souza, L. (2021). Geotechnical properties of some kaolinite-rich Brazilian Vertisols. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20210022>.

Biswas, B., Islam, M., Deb, A., Greenaway, A., Warr, L., & Naidu, R. (2023). Compreendendo as impurezas de ferro no caulim australiano e seu efeito nos processos de ativação ácida e térmica da argila. *ACS Omega*, 8, 5533 - 5544. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06795>

Bouchehma, A., Essaleh, M., Benjelloun, M., Bouferra, R., & Belhouideg, S. (2023). Caracterização mineralógica, geotécnica e mecânica de compósitos de fibra curta de argila/alfa para construção sustentável. *NanoWorld Journal* Bondarchuk, I., Bondarchuk, S., Vorozhtsov, A., & Zhukov, A. (2023). Advanced Fitting Method for the Kinetic Analysis of Thermogravimetric Data. *Molecules*, 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28010424>.

BRASIL – Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2 de agosto de 2010; 189º da Independência e 122º da República.

BRASIL, F. M. et al. Influence of kaolin and red clay on ceramic specimen properties when galvanic sludge is incorporated to encapsulate heavy metals. **Waste Management**, v. 181, p. 176-187, 2024.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. “Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabrecfm?codlegi=636>. Acesso em: 11 abr. 2015.

Buruchenko, A., Vereshchagin, V., & Men'shikova, V. (2020). Cerâmica de baixa contração baseada em resíduos de dolerita de grão fino da produção de brita. *Glass and Ceramics*, 76, 415-418. <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00213-8>.

Cardoso, R. Á. M.; et al. I-698–Análise da Viabilidade de Confecção de Argila Expandida com Incorporação de Lodos de Estação de Tratamento de Água, 2024.

CBIC em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI Nacional). Disponível em: <https://cbic.org.br/custo-com-materiais-deconstrucao-aumentou-2505-em-12-meses/>. Acesso em: 15 novembro 2023.

CBIC, Agência. Custo com materiais de construção aumentou 25,05% em 12 meses. 2021. A ação integra o projeto ‘Banco de Dados da Construção – BDC’, realizado pela

Cheng, S., Ge, K., Sun, T., Shui, Z., Chen, X., & Lu, J. (2021). Atividade pozolânica de caulim da série de carvão ativado mecanoquimicamente e termicamente em materiais à base de cimento. *Construction and Building Materials*, 299, 123972. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123972>.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986. Resolução nº 88, 01 de junho de 1983. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ibama, 1986.

COUTO, Karina de Fátima; BARBOSA, José Eduardo do Couto; DE CAMPOS, Patrícia Klinkerfus. Estudo de caso sobre o processo de reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil. *Revista Científica e-Locução*, v. 1, n. 19, p.20-20, 2021.

CRISPIM, Diêgo Lima et al. Espacialização da cobertura do serviço de saneamento básico e do índice de desenvolvimento humano dos municípios do Marajó, Pará. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, n. 4, p. 112-122, 2016.

Czerwinski, F. (2020). Estabilidade térmica de ligas de alumínio. *Materiais*, 13. <https://doi.org/10.3390/ma13153441>

DA SILVA MAGALHÃES, Rodrigo; DE ALMEIDA, Kelson Silva; GOMES, Érico Rodrigues. Caracterização físico-química, mineralógica e tecnológica de argilas de Caxias/MA. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 8, n. 2, p. 13974-01e, 2022.

DA SILVA, Denilson Costa; DE ARAÚJO ICHIHARA, Jorge. Balanceamento de Linhas de Produção de uma empresa de cerâmica vermelha de São Miguel do Guamá através de simulação de eventos discretos. *Revista Eletrônica Produção & Engenharia*, v. 8, n. 1, p. 679-695, 2016.

DA SILVA, Micael Rubens Cardoso et al. Valorization of kaolin mining waste from the Amazon region (Brazil) for the low-carbon cement production. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00756, 2021.

DE ALMEIDA, Kayrone Marvila; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; CASTRO, Nuria Fernández. Uso sustentável de resíduos de caulim do Seridó na formulação de concreto.

DE ALMEIDA, Kayrone Marvila; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; CASTRO, Nuria Fernández. Uso sustentável de resíduos de caulim do Seridó na formulação de concreto. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, v. 21, n. 12, p. 23995-24010, 2023.

DE FREITAS, Gabriel Sousa. Agenda 2030: o desafio para a indústria da construção civil referente ao seu resíduo. *Revista Geociências-UNG-Ser*, v. 22, n. 1, p. 5-14, 2023.

DE JESUS SANTOS, Handellon Kleyton et al. Tijolos de solo cimento com caulim. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-12, 2023.

DE LIMA SILVA, Magno; PEREIRA, Francisca Maria Martins. Caracterização de argilas provenientes de indústria de cerâmica vermelha do Município do Crato–Ceará, Brasil. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, p. e448101018392-e448101018392, 2021.

DE OLIVEIRA COSTA, Valéria Sandra. Tecnologias ambientais para minimização dos passivos gerados nas indústrias ceramistas. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 10, n. 4, p. 627-647, 2021.

De Oliveira Modesto, C.; et al. Deformação piroplastica em porcelanatos: uma breve revisão. *Cerâmica Industrial*, 28(1), 1-13, 2023.

DE OLIVEIRA, Rafael Henrique et al. Caracterização mineralógica, físico-química e tecnológica da argila de Angélica (Brasil): Adequação para aplicação em produtos de construção. *Cerâmica Industrial*, v. 27, n. 1, p. 1-11, 2022.

DE SOUZA SANTOS, Pêrsio; SANTOS, Helena Souza. *Ciência e tecnologia de argilas*. E. Blucher, 1989.

DELAQUA, Geovana et al. Aplicação de resíduos de vidro sobre cerâmica vermelha para melhorar a sinterização. *Sustentabilidade*, v. 14, n. 16, pág. 10454, 2022.

DO ROSÁRIO, Samuel Antonio Silva; FARIAS, Carlos Aldemir. O uso do caraipé na cerâmica Caeteuara: interseções entre os saberes da tradição e a termodinâmica. *REMATEC*, v. 18, n. 45, p. e2023005-e2023005, 2023.

DOĞAN-SAĞLAMTIMUR, Neslihan et al. Eco-friendly fired brick produced from industrial ash and natural clay: A study of waste reuse. *Materials*, v. 14, n. 4, p. 877, 2021.

DOS SANTOS, Antônio Hélon Vasconcelos; DE CASTILHO, Cláudio Jorge Moura; DE OLIVEIRA COSTA, Valéria Sandra. Tecnologias ambientais para minimização dos passivos gerados nas indústrias ceramistas. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 10, n. 4, p. 627-647, 2021.

DOS SANTOS, Felipe Silva; RABELO, Adriano Alves. A IMPORTÂNCIA DA MONITORIA NA DISCIPLINA DE MATERIAIS CERÂMICOS PARA OS DISCENTES DE ENGENHARIA DE MATERIAIS NO PERÍODE DE PANDEMIA. *Seminário de Projetos de Ensino* (ISSN: 2674-8134), v. 5, n. 1, p. 1-4, 2021.

Du, H., Zhong, Z., Zhang, B., Zhao, D., Lai, X., Wang, N., & Li, J. (2021). Estudo comparativo sobre intercalação-esfoliação e caulim modificado por ativação térmica para imobilização de metais pesados ??durante pirólise de resíduos sólidos altamente orgânicos. *Chemosphere*, 280, 130714. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130714>.

EBADI JAMKHANEH, Mehdi; AHMADI, Masoud; SHOKRI AMIRI, Maedeh. Sustainable reuse of inorganic materials in eco-friendly clay bricks: special focus on mechanical and durability assessment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 6, p. 04021111, 2021.

FALCÃO, Patrícia Rodrigues et al. Estudo do efeito da salinidade na resistência não drenada em solo artificial a base de caulim. CRICTE, 2017.

Feng, Y., Wu, K., Wu, S., Guo, Y., He, M., & Xue, M. (2023). Revestimento de nanoesferas de carbono derivadas de pontos quânticos de carbono em Ti₃C₂ MXene como um ânodo superior para baterias de íons de potássio de alto desempenho. *Materiais e interfaces aplicados da ACS* . <https://doi.org/10.1021/acsami.2c20559>

FIGUEIRÊDO, Julliana Marques Rocha de et al. Influence of processing variables on clay-based ceramic formulations. **Materials Research**, v. 22, n. 03, p. e20180548, 2019.

Firincioglu, B., & Bilsel, H. (2023). Potencial de plasticidade unificado de solos. *Ciências aplicadas* . <https://doi.org/10.3390/app13137889>.

FRIZZO, Rafael Guelfi. Piroplasticidade em cerâmica de composição albita-feldspato potássico-caulim. 2019.

GEOECONÔMICO, LIMA JJ Estudo; UTILIZADAS NA INDÚSTRIA, Tecnológico das Argilas. Cerâmica dos Municípios de Irituia e São Miguel do Guamá. **Nordeste do Pará**, 2000.

GOMES, Carla Pinheiro et al. Impacto Ambiental e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Advindos da Construção Civil no Brasil: Uma Revisão de Literatura/Environmental Impact and Solid Waste Management Arising from Civil Construction in Brazil: A Literature Review. ID on line. *Revista de psicologia*, v. 15, n. 55, p. 729-742, 2021.

Grine, O., Moussi, B., Hajjaji, W., Pilate, P., Yans, J., & Jamoussi, F. (2021). Materiais refratários de argila caulinítica do norte da Tunísia de baixo custo e efeito de uma adição de argila rica em alumina. *Arabian Journal of Geosciences* , 14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08099-8> .

Guo, W., & Guo, K. (2024). Efeito da concentração de sólidos na distribuição do tamanho de partículas e na cinética de moagem em moinhos agitados. *Minerais* . <https://doi.org/10.3390/min14070720> .

Hmeid, H., Akodad, M., Aalaoul, M., Baghour, M., Moumen, A., Skalli, A., Anjar, A., Conti, P., Sfalanga, A., Khyabani, F., Minucci, S., & Daoudi, L. (2020). Clay mineralogy, chemical and geotechnical characterization of bentonite from Beni Bou Ifrouf Massif (the Eastern Rif, Morocco). *Special Publications*, 502, 31 - 44. <https://doi.org/10.1144/SP502-2019-25>.

Hopa, D., & Fatehi, P. (2020). Usando Lignina Sulfobutilada e Sulfometilada como Dispersante para Suspensão de Caulim. *Polímeros* , 12. <https://doi.org/10.3390/polym12092046> .

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório de qualidade do meio ambiente – RQMA. Brasil 2020/ Hanry Alves Coelho, Andrea Alimandro Corrêa (coord.). Brasília, DF: IBAMA, 2022. 558 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estatísticas do Cadastro Central de Empresas – CEMPRE. 2020. Disponível em: Acesso em: 07 jun., 2023.

Islak, B., & Ayas, E. (2019). Avaliação das propriedades de compósitos Ti_3SiC_2 e Ti_3SiC_2/SiC sinterizados por plasma de faísca. *Ceramics International* . <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.03.144>.

Jakubczak, P., Bieniaś, J., & Droździel, M. (2020). A comparação do comportamento de impacto de laminados de titânio/carbono, alumínio/carbono e fibras de carbono convencionais. *Thin-walled Structures* , 155, 106952. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106952>.

Jalaluddin, M.; Azlan, U.; Rashid, M.; Tamin, N. Efeito das temperaturas de sinterização nas propriedades físicas, estruturais e microestrutura de cerâmicas à base de mulita. *AIMS Materials Science*, 2024. <https://doi.org/10.3934/matersci.2024014>.

Jia, J., Wu, D., Ren, Y., & Lin, J. (2022). Nanoarquitetura de materiais baseados em ilita: efeito da intercalação de óxidos metálicos nas propriedades mecânicas. *Nanomateriais* , 12. <https://doi.org/10.3390/nano12060997> .

Jones, G., Biesuz, M., Ji, W., John, S., Grimley, C., Manière, C., & Dancer, C. (2021). Promovendo homogeneidade microestrutural durante sinterização instantânea de cerâmicas por meio de gerenciamento térmico. *MRS Bulletin* , 46, 59 - 66. <https://doi.org/10.1557/s43577-020-00010-2>.

Karamanov, A., Karamanova, E., Schabbac, L., Andreola, F., Taurino, R., & Barbieri, L. (2020). Sinterização e formação de fases de cerâmicas baseadas em cinzas de fundo de incinerador municipal pré-tratadas., 100044. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100044> .

Khalajzadeh, V., & Beckermann, C. (2020). Simulação da formação de porosidade de contração durante a solidificação da liga. *Metallurgical and Materials Transactions A* , 51, 2239-2254.

KHALIL, Abdelrahman KA et al. Preparation and characterization of clay based ceramic porous membranes and their use for the removal of lead ions from synthetic wastewater with an insight into the removal mechanism. *Heliyon*, v. 10, n. 3, 2024.

KHALIL, Abdelrahman KA et al. Preparation and characterization of clay based ceramic porous membranes and their use for the removal of lead ions from synthetic wastewater with an insight into the removal mechanism. *Heliyon*, v. 10, n. 3, 2024.

KIM, J.; ROONEY, D. Decarbonizing the ceramics industry: a systematic and critical review of policy options, developments and sociotechnical systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 157, p. 112081, abr., 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112081>.

Kwaśniewska, A., Chocyk, D., Gładyszewski, G., Borc, J., Świetlicki, M., & Gładyszewska, B. (2020). A influência da argila de caulim nas propriedades mecânicas e na estrutura de filmes de amido termoplástico. *Polímeros* , 12. <https://doi.org/10.3390/polym12010073>.

DE LACERDA, Victor Fernando Teixeira et al. IMPLANTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA AGROFLORESTAL COMO ALTERNATIVA PARA AGRICULTURA FAMILIAR NO ALTO VALE DO ITAJAÍ-SC. Anais da Feira do Conhecimento Tecnológico e Científico-IFC Rio do Sul, n. 22, 2021.

Lenar, N., Piech, R., & Paczosa-Bator, B. (2022). Nanomateriais de carbono - Poli(3-octiltiofeno-2,5-diil) – Materiais compósitos triplos de dióxido de irídio hidratado como camadas superhidrofóbicas para eletrodos seletivos de íons. Journal of The Electrochemical Society . <https://doi.org/10.1149/1945-7111/aca838>

Li, Z., Wang, Y., Jin, Z., & Zhou, Y. (2020). Tecnologia e equipamento de controle automático de tamanho de partículas de moagem. Journal of Physics: Conference Series , 1633. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1633/1/012147> .

LICURSI, Ernesto Adler et al. Caracterização mineralógica de caulim halloysítico nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais. 2022.

LOCATELLI, Ana Paula Klaus. CIÊNCIA DOS MATERIAIS PARA ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO: UMA ABORDAGEM SIMPLIFICADA. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, p. 09-81, 2025.

LUZ, A. B. da; CAMPOS, A. R. de; CARVALHO, E. A. de; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B. Argila - Caulim. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (ed.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. Cap. 12, p. 255-294. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1101/1/12%20CAULIMmar%C3%A7o%20Revisado%20B%20ertolino%20e%20Scorzelli.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

MAGALHÃES, Juan Peixoto Barroco. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO PLANO EM CERÂMICA VERMELHA. 2021.

MAGALHÃES, Juan Peixoto Barroco. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO PLANO EM CERÂMICA VERMELHA. 2021.

Makhathini, T., Bwapwa, J., & Mtsweni, S. (2023). Várias opções para resíduos de mineração e metalurgia na economia circular: uma revisão. Sustentabilidade . <https://doi.org/10.3390/su15032518> .

MEDEIROS, Ailma Roberia Souto et al. Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulim da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 6, p. 33575-33588, 2020.

MEDEIROS, Ailma Roberia Souto et al. Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulim da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 6, p. 33575-33588, 2020.

MELO, A.L.R.; FERREIRA, M.L.; RODRIGUES, R.C. Utilização de resíduos da construção civil na pavimentação: uma revisão sistemática. *Engineering Science*, v.9, n.1, p.102-113, 2021. Disponível em: <<http://www.sustenere.co/index.php/engineeringsciences/article/view/CBPC2318-3055.2021.001.0011>> Acesso em: 20 set. 2022.

MELO, P.A. (2022). "Reciclagem de tijolos ecológicos: uma análise da viabilidade ambiental." *Cadernos de Engenharia Ambiental*, 19(2), 78-89

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. Resíduo de caulim como material alternativo para produção de blocos de tijolos solo-cimento. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 44168-44178, 2021.

MENEZES, R. R. *et al.* Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. *Matéria* (Rio de Janeiro). 2007; 12, p. 226-236.

Merga, A.; et al. Efeito do casco na temperatura de queima e nas propriedades dielétricas do isolador de porcelana. *Heliyon*, 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08922>.

Milheiro, F., Freire, M., Silva, A., & Holanda, J. (2005). Comportamento de densificação de uma argila caulinítica brasileira de queima vermelha. *Ceramics International*, 31, 757-763. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2004.08.010>.

Mola-Abasi, H.; Saberian, M.; Li, J. Predição de resistências à compressão e à tração de areia cimentada com zeólita usando porosidade e composição. *Construção e materiais de construção*, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.065>.

Muhammed, N. S.; Olayiwola, T.; Elkatatny, S. A review on clay chemistry, characterization and shale inhibitors for water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 109043, 2021.

MUÑOZ, Pedro et al. Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, minerais e físicas de tijolos de argila feitos pela mistura de argila vermelha caulinítica e resíduos de polpa de papel. *Ciência da Argila Aplicada*, v. 105847, 2020.

Mymrin, V., Borgo, S., Alekseev, K., Avanci, M., Rolim, P., Argenda, M., Klitzke, W., Gonçalves, A., & Catai, R. (2020). Aplicação de resíduos de Cr-Zn galvânico e areia de fundição usada como componentes valiosos de cerâmicas sustentáveis para prevenir a poluição ambiental. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 1239-1250. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05066-7>.

Namini, S., Asl, M., & Delbari, S. (2019). Influência da temperatura de sinterização na microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos Ti-Mo-B₄C. *Metals and Materials International*, 27, 1092-1102. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00469-y>.

NASCIMENTO, Anne Karoline dos Santos. Identificação dos impactos socioambientais gerados pela indústria cerâmica em pequeno município do Rio Grande do Norte. 2022.

NBR 15310, 2009. Componentes cerâmicos. Telhas. Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 15310-2, 2009. Componentes cerâmicos. Telhas. Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 21, n. 12, p. 23995-24010, 2023.

OLIVEIRA, M.S. (2021). Aplicação de tijolos ecológicos em construções de baixo custo. Revista de Arquitetura Sustentável, 4(1), 27-36.

Öser, C. (2020). Determinando as propriedades de plasticidade de argilas altamente plásticas: uma nova abordagem empírica. Arabian Journal of Geosciences, 13, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05412-9>.

OTITOJU, Tunmise Ayode et al. Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. Journal of industrial and engineering chemistry, v. 85, p. 34-65, 2020.

Paiva, H., Yliniemi, J., Illikainen, M., Rocha, F., & Ferreira, V. (2019). Geopolímeros de rejeitos de mineração como solução de gerenciamento de resíduos para um habitat mais sustentável. Sustentabilidade. <https://doi.org/10.3390/SU11040995>.

PAIXÃO, Gabriela Barbosa et al. O USO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COMO MATERIAL SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Revista Contemporânea, v. 3, n. 8, p. 11265-11291, 2023.

PASCOAL, Paola. Criação de vestígios: O neomarajoara e arte nacional. Faces de Clio, v. 6, n. 12, p. 350-380, 2020.

PINTO, L. A.; SOUZA, T. D. de; SILVA, D. B.; PEIXOTO, L. P.; RODRIGUES, M. I. B. Study of clay used in the production of red ceramic pottery on semi-arid Cearense, Brazil. Matéria, v. 26, n. 3, p. 1-11, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13019>.

Polivanov, H., Barroso, E., Porto, R., Ottoni, F., & De Andrade, T. (2021). O Papel da Eletroquímica e da Mineralogia no Comportamento Geotécnico de Solos Salinizados. Anuário do Instituto de Geociências. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_42738.

Português Martínez-García, A., Jung, J., Ai, X., Sigman, D., Auderset, A., Duprey, N., Foreman, A., Fripiat, F., Leichliter, J., Lüdecke, T., Moretti, S., & Wald, T. (2022). Avaliação laboratorial do impacto da oxidação química, dissolução mineral e aquecimento na composição isotópica de nitrogênio da matéria orgânica ligada a fósseis. Geochemistry, 23. <https://doi.org/10.1029/2022GC010396>.

PRASANPHAN, Sitthisak et al. Estudo de RMN de ^{29}Si e ^{27}Al da transformação estrutural de geopolímero à base de resíduo de caulim calcinado utilizando baixo teor de ativador alcalino para materiais de construção sustentáveis. *Revista de Engenharia de Construção*, v. 70, p. 106332, 2023.

PRESOTTO, P.; MYMRINE, V. Desenvolvimento De Novos Materiais Cerâmicos A Partir De Resíduo De Serpentinó E Argila Vermelha. In: **56 Congresso Brasileiro de Cerâmica 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials**. 2012. p. 923-934.

PRESOTTO, P.; MYMRINE, V. Desenvolvimento De Novos Materiais Cerâmicos A Partir De Resíduo De Serpentinó E Argila Vermelha. In: **56 Congresso Brasileiro de Cerâmica 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials**. 2012. p. 923-934.

Qi, S., , W., Zhang, X., Wang, J., Hu, X., Wei, Z., & Liu, J. (2024). Effects of Remolding Water Content and Compaction Degree on the Dynamic Behavior of Compacted Clay Soils. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14082258>.

QUINZANI, Suely Sani Pereira. FROM TO PREHISTORY AND HISTORY: from ceramics to the contents of the indigenous pot. 2022.

RACANELLI, Lêda de Azevedo et al. Caracterização e estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas das argilas caulínicas da Região Nordeste do Estado do Pará. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, p. e-12593, 2020.

Raji, M., Essabir, H., Essassi, E., Rodrigue, D., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2018). Propriedades morfológicas, térmicas, mecânicas e reológicas de polietileno de alta densidade reforçado com argila Illite. *Polymer Composites*, 39, 1522-1533. <https://doi.org/10.1002/PC.24096>.

Ramalho, W. J. C. R.; et al. Avaliação de argilas naturais e organofílicas nas propriedades reológicas de emulsões base óleo para aplicação em fluidos de perfuração, 2021.

REZENDE, Maria Luiza de S. et al. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 61, p. 285-290, 2008.

RIBEIRO, Flávia Pereira. Caracterização mineralógica das argilas presentes no perfil regolítico do depósitos supergênicos de ETR Soberbo e Capão do Mel (Sistema Caldeira). 2024.

RIO, D. D. D. del; SOVACOL, B. K.; FOLEY, A. M.; GRIFFITHS, S.; BAZILIAN, M.; ROCHA, Alexander Lobo et al. A produção industrial da cerâmica vermelha em São Miguel do Guamá e as recentes inovações adotadas pelo segmento em âmbito nacional. *Revista de Arquitetura IMED*, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2013.

Rodrigues, A., Costa, F., Beltrão, S., Fernandes, J., Menezes, R., & Neves, G. (2021). Desenvolvimento de Argamassas Ecológicas Produzidas com Resíduos do Processamento de

Caulim: Visão do Comportamento de Durabilidade. Sustentabilidade .
<https://doi.org/10.3390/su132011395> .

RODRIGUES, Maria Isabel Brasileiro et al. Desenvolvimento Sustentável para resíduos gerados nas Indústrias da Cerâmica Vermelha na região do Cariri–CE. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 40689-40702, 2021.

Santos, C., & Santos, A. (2021). Chemical, Mineralogical, and Rheological Characterization of Regional Clays for Potential Use in Cosmetics and Pharmaceutical Products.

SANTOS, Deivid Teixeira et al. Caracterização socioambiental, econômica da extração de argila no município de São Miguel do Guamá-PA. 2016.

Santos, R. M. dos; *Magalhães*, R. da S.; Sobrinho, N. de O.; Gomes, É. R. Red mud incorporation in ceramic industry: a review. *Research, Society and Development*, 10(10), e321101018949, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18949>.

SARANI, Noor Amira et al. Physical-mechanical properties and thermogravimetric analysis of fired clay brick incorporating palm kernel shell for alternative raw materials. *Construction and Building Materials*, v. 376, p. 131032, 2023.

Shakrani, S., Ayob, A., Rahim, M., & Alias, S. (2020). Estabilidade de partículas de caulim submetidas a temperaturas elevadas usando vários agentes dispersantes. *Journal of Physics: Conference Series* , 1529. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/4/042099> .

Sharma, R., Das, R., & Kumar, S. (2023). Deposição de HVOF, investigação comparativa e seleção ótima de molibdênio, boro, cromo e titânio em revestimentos compostos amorfos de ferro. *Surface Engineering*, 39, 481 - 494. <https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2233263> .

SILVA, Alan Rodrigo Palheta. Estudo do BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos cauliniticos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. *Cerâmica*, [s.l.], v. 58, n. 345, p.36-42, mar. 2012. *FapUNIFESP (SciELO)*. <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132012000100007>.

SILVA, Beatriz Rocha et al. DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REBOCO COM A INCORPORAÇÃO DE CAULIM. *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693*, v. 13, 2021.

Silva, D. A. e; Melo, C. E. L. de. Utilização de material cerâmico proveniente do RCD para aplicação em concreto: uma revisão. *Risco Revista De Pesquisa Em Arquitetura E Urbanismo (Online)*, 19, 1-15, 2021.

SILVA, João Paulo Souza. Análise de mistura entre solo e material cerâmico resultante de resíduos da fabricação de tijolos. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 1575-1585, 2020.

Sobczyk, K., Chmielewski, R., Kruszka, L., & Rekucki, R. (2023). Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13084707>.

Soinne, H., Keskinen, R., Tähtikarhu, M., Kuva, J., & Hyväluoma, J. (2023). Efeitos dos teores de carbono orgânico e argila nas propriedades relacionadas à estrutura de solos aráveis com alto teor de argila. *European Journal of Soil Science*, 74. <https://doi.org/10.1111/ejss.13424>

Somani, N.; Tyagi, Y.; Gupta, N. Uma investigação sobre a influência da temperatura de sinterização nas propriedades microestruturais, físicas e mecânicas de compósitos Cu-SiC. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1108/jedt-07-2021-0374>.

SOUSA, B. B. et al. Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de resíduo de caulim. *Cerâmica*, v. 66, p. 404-412, 2020.

SOUSA, J.A. (2020). A importância dos tijolos ecológicos na construção sustentável. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, 32(1), 45-58.

SPILLER, Naiara Cristine. As olarias no " Velho Oeste Paulista": Estudo sobre a indústria da construção civil no Interior Paulista (1872-1912). 2023.

SULTANA, Sra. Shanjida; AHMED, Aninda Nafis. Estudo das propriedades da mistura cinza-argila do bagaço de cana-de-açúcar para desenvolvimento de materiais cerâmicos vermelhos. *Sugar Tech*, v. 4, pág. 1147-1154, 2022.

Thor, N., Winkens, G., Bernauer, J., Petry, N., Beck, K., Wang, J., Schwaiger, R., Riedel, R., Kolb, U., Lepple, M., & Pundt, A. (2024). Caracterização da microestrutura e propriedades mecânicas de cerâmica derivada de polímero (Hf_xTa_{1-x})C/SiC preparada mediante técnica de sinterização assistida em campo (FAST/SPS). *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.202301841>

TOSELLO, Maria Eunice Carvalho et al. Influência de materiais recicláveis e vinhaça da cana de açúcar na resistência mecânica de tijolos ecológicos. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 2, p. e56910212911-e56910212911, 2021.

Uludağ, M. (2020). Influência do refinador de grãos Al-B na formação de porosidade de ligas Al-Si solidificadas direcionalmente. *China Foundry*, 17, 372 - 377. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-0012-8>.

VALDES, H.; VILCHES, J.; FELMER, G.; HURTADO, M.; FIGUEROA, J. Artisan Brick Kilns: state-of-the-art and future trends. *Sustainability*, v. 12, n. 18, p. 7724, set., 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12187724>.

VILELA, Alan Pereira et al. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*. 2020; 262, p. 120883.

VENTURI, Luis Antonio Bittar. **Recursos naturais do Brasil**. Editora Appris, 2021.

VOANKA, Keli Cristina et al. INOVAÇÃO VOLTADA PARA A SUSTENTABILIDADE EM INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA: UMA REVISÃO. *Revista Gestão em Análise*, v. 11, n. 3, p. 7-24, 2022.

Wiśniewska, K.; Pichór, W.; Kłosek-Wawrzyn, E. Influência da temperatura de queima na composição de fases e propriedades de cor de corpos de ladrilhos cerâmicos. *Materiais*, 14, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14216380>.

Won, J., Park, J., Kim, J., & Jang, J. (2021). Impacto dos tamanhos de partículas, mineralogia e química do fluido dos poros na plasticidade de solos argilosos. *Sustentabilidade* . <https://doi.org/10.3390/su132111741> .

Yan, S., Huang, Y., Zhao, D., Niu, F., , G., & Wu, D. (2019). Impressão 3D de cerâmica eutética Al₂O₃-ZrO₂ em nanoescala: análise de princípios e otimização de processos de poros. *Fabricação Aditiva* . <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.04.024> .

Yilmaz, R., Bayata, F., & Solak, N. (2024). Comportamento de oxidação em alta temperatura de ferro fundido de grafite vermicular com alta liga de Al-Si para componentes de exaustão de extremidade quente de motor de combustão interna. *Metais* . <https://doi.org/10.3390/met14050574>.

Yuan, Y., Tang, X., Shi, J., Zhou, C., Li, L., Sun, H., Northwood, D., Waters, K., & , H. (2024). Controlando e ajustando as propriedades de dispersão de partículas de caulinita calcinadas em vários solventes orgânicos por meio do método de modificação usando trietoxivinilsilano e ácido 3-mercaptopropiônico. *Molecules* 29. <https://doi.org/10.3390/molecules29174129>.

ZACCARON, A. et al. Estudo das propriedades de secagem de cerâmica vermelha: Uma revisão (Study of drying properties about heavy clay ceramics: A review, 2019).

Zheng, J., Zhang, H., & Li, X. (2021). Effect of ternary particles size distribution on rheology of slurry and microstructure of DLP printed ZTA ceramic. *Materials Chemistry and Physics*, 269, 124656. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124656>.