CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL PEREIRA COSTA

ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DE POEIRA DE ACIARIA ELÉTRICA PARA PRODUÇÃO DE ADOQUIM

BELO HORIZONTE

2026

RAFAEL PEREIRA COSTA

ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DE POEIRA DE ACIARIA ELÉTRICA PARA PRODUÇÃO DE ADOQUIM

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2026

Costa, Rafael Pereira.
C837a Estudo da reutilização de poeira de aciaria elétrica para produção de adoquim / Rafael Pereira Costa. – 2026.
59 f. : il.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.

1. Metais - Reaproveitamento. 2. Argilas. 3. Materiais cerâmicos - Propriedades mecânicas. 4. Economia circular. I. Paiva, Renato Perdigão de Paiva. II Título.

CDD: 620.1

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga - CRB/6-3261

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 9 / 2026 - CEMAT (11.51.06)

Nº do Protocolo: 23062.033473/2026-10

Belo Horizonte-MG, 28 de junho de 2026.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 2026/1

Aos **17 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, o aluno **Rafael Pereira Costa**, matrícula 20193018875 apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Estudo da Reutilização de Poeira de Aciaria Elétrica para Produção de Adoquim*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Dr.ª Marcela Silva Lamoglia
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Eng. Rafael Elias Gomes Leal
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

(Assinado digitalmente em 30/06/2026 09:40)
MARCELA SILVA LAMOGLIA
PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO - VISITANTE
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 3471250

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 09:54)
PAULO RENATO PERDIGÃO DE PAIVA
SUBCOORDENADOR - SUBSTITUTO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 2112363

(Assinado digitalmente em 28/06/2026 22:32)
RAFAEL ELIAS GOMES LEAL
DISCENTE
Matrícula: 20255009541

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **9**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **28/06/2026** e o código de verificação: **474d462da5**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Deus de meu coração, pela força que me sustentou e me permitiu seguir em frente, mesmo diante de tantos obstáculos.

Aos meus pais e minha família, pelo apoio incondicional e por serem meu alicerce em cada etapa difícil da vida.

Ao professor Paulo, que aceitou ser meu orientador de pesquisa e me guiou com dedicação ao longo de todo o processo, mesmo diante dos desafios que o ambiente acadêmico impõe.

Ao Rômulo e ao Nikolas, pela colaboração essencial nas etapas experimentais e análises laboratoriais que deram forma a este trabalho.

Aos meus amigos Arthur, Priscyla e Nathália, que caminham ao meu lado há seis anos, compartilhando não apenas esta jornada acadêmica, mas também companheirismo.

E, por fim, a todos que, de alguma maneira, contribuíram para esta etapa tão significativa da minha formação profissional.

RESUMO

O presente trabalho aborda o reaproveitamento de resíduos industriais, focando na incorporação do pó de balão, oriundo de Fornos Elétricos a Arco (FEA), na fabricação de adoquins cerâmicos. O objetivo principal foi avaliar a viabilidade técnica dessa adição em matrizes de argila Terracota e Branca. Para isso, foram preparadas sete amostras para cada condição de substituição da argila pelo pó de balão. As formulações contemplaram desde a matriz pura (100% argila) até diferentes proporções de mistura, como 25% argila branca ou terracota e 75% pó de balão, além de combinações intermediárias. Cada conjunto de amostras foi submetido aos mesmos processos de conformação e sinterização à 1100 °C, garantindo a comparabilidade dos resultados. A caracterização dos corpos de prova envolveu análises físicas (absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente) e avaliações mecânicas por meio do ensaio de resistência à flexão. Os resultados revelaram que a adição de pó de balão em teores iguais ou superiores a 50% é inviável, ocasionando fraturas, colapso estrutural e intensa vitrificação das peças durante a queima, devido à forte ação fundente do resíduo e à geração de gases internos. Por outro lado, concentrações menores apresentaram comportamento estável para o produto. O desempenho mecânico mais viável foi obtido na formulação composta por 90% de argila Branca e 10% de pó de balão, alcançando uma resistência à flexão de 8,3 MPa, valor de estabilidade muito próximo ao da sua matriz pura (8,7 MPa). Conclui-se que a incorporação do resíduo siderúrgico em baixas proporções podem ser tecnicamente aplicável para a produção de pavimentos cerâmicos. Essa alternativa pode promover uma destinação ambientalmente adequada para o pó de balão, reduzindo o passivo em aterros e alinhando-se aos princípios da economia circular no setor industrial.

Palavras-chave: Pó de balão; Adoquim cerâmico; Argila Branca; Resistência à flexão; Economia circular.

ABSTRACT

This study addresses the reuse of industrial waste, focusing on the incorporation of baghouse dust (flue dust) from Electric Arc Furnaces (EAF) into the manufacture of ceramic pavers. The main objective was to evaluate the technical viability of this addition in Terracotta and White clay matrices. For this purpose, seven samples were prepared for each condition of clay replacement by baghouse dust. The formulations ranged from the pure matrix (100% clay) to different mixing proportions, such as 25% white or terracotta clay and 75% baghouse dust, as well as intermediate combinations. Each set of samples was subjected to the same shaping and sintering processes at 1100 °C, ensuring the comparability of the results. The characterization of the specimens involved physical analyses (water absorption, apparent porosity, and bulk density) and mechanical evaluations through flexural strength testing. The results revealed that adding baghouse dust in contents equal to or greater than 50% is unviable, causing fractures, structural collapse, and intense vitrification of the pieces during firing, due to the strong fluxing action of the waste and the generation of internal gases. On the other hand, lower concentrations showed a stable behavior for the product. The most viable mechanical performance was obtained in the formulation composed of 90% White clay and 10% baghouse dust, reaching a flexural strength of 8.3 MPa, a stability value very close to that of its pure matrix (8.7 MPa). It is concluded that the incorporation of steelmaking waste in low proportions can be technically applicable for the production of ceramic pavements. This alternative can promote an environmentally appropriate disposal for baghouse dust, reducing landfill liabilities and aligning with the principles of the circular economy in the industrial sector.

Keywords: Electric arc furnace dust; Ceramic paver; White clay; Flexural strength; Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Necrópole do Cemitério de al-Bagawat no Oásis de El Kharga 15
Figura 2 - Geometria e unidades estruturais de uma argila esmectita 16
Figura 3 - Gráfico com os principais subprodutos de aciaria elétrica no Brasil 20
Figura 4 - Posicionamentos de Adoquins 24
Figura 5 - Exemplo de prensagem uniaxial 27
Figura 6 - Ensaio de Flexão 31
Figura 7 - Fluxograma de produção e ensaios de corpos de prova 32
Figura 8 - Preparação das amostras 33
Figura 9 - Prensa e corpos de prova pós prensagem 34
Figura 10 - Forno e corpos de prova pós sinterização 34
Figura 11 - Preparação dos corpos de prova para pesagem a úmido 35
Figura 12 - Esquema de Pesagem a Úmido 36
Figura 13 - Ensaio de flexão 37
Figura 14 - DRX Argila Terracota 38
Figura 15 - DRX Argila Branca 38
Figura 16 - DRX Pó de Balão 39
Figura 17 - Sinterização dos Corpos de Prova 41
Figura 18 - Porosidade Aparente das amostras de Argila Terracota 44
Figura 19 - Porosidade Aparente das amostras de Argila Branca 44
Figura 20 - Densidade Aparente das amostras de Argila Terracota 45
Figura 21 - Densidade Aparente das amostras de Argila Branca 46
Figura 22 - Absorção de Água das amostras de Argila Terracota 47
Figura 23 - Absorção de Água das amostras de Argila Branca 47
Figura 24 - Resultado do Ensaio de Flexão da Argila Terracota 48
Figura 25 - Resultado do Ensaio de Flexão da Argila Branca 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos principais grupos de argilas 17
Tabela 2 - Comparação de propriedades entre três tipos de Adoquim. 25
Tabela 3 – Norma IRAM comparando tipos de ensaio em Adoquins 26
Tabela 4 - Quantidade de materiais para preparação das amostras 33
Tabela 5 - Resultados de FRX 42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Absorção de Água

AB – Argila Branca

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials

AT – Argila Terracota

CaO – Óxido de Cálcio

($CaAl_2Si_2O_8$) – Anortita

($CaMg(CO_3)_2$) – Dolomita

CEFET MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CO_2 – Dióxido de Carbono

DA – Densidade Aparente

DEMAT – Departamento de Engenharia de Materiais

DRX – Difratometria de Raios X

FEA – Forno Elétrico a Arco

Fe_2O_3 – Hematita

Fe_3O_4 – Magnetita

FeO – Wustita

FRX – Fluorescência de Raios X

GEE – Gases de Efeito Estufa

$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$ – Moscovita

kg – Quilograma

LC_3 – Limestone Calcined Clay Cement

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

O – Octaédrica

PA – Porosidade Aparente

PB – Pó de Balão

PI – Peso Imerso

PPC – Pavimentos intertravados de concreto

PS – Peso Seco

PU – Peso Úmido

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SiO_2 – Quartzo

$(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ – Caulinita

T – Tetraédrica

t – Tonelada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 14
2.1 Objetivos Gerais 14
2.2 Objetivos Específicos 14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
3.1 O Desenvolvimento de Tijolos Cerâmicos ao Longo da História 15
3.2 Argila 16
3.2 Argila Terracota 17
3.3 Argila Branca 18
3.4 Pó de Balão Produzido em Forno Elétrico a Arco 19
3.5 Problemas Socioambientais Da Indústria Cerâmica 21
3.6 Aspectos Econômicos 22
3.7 Adoquim 22
3.8 Prensagem 26
3.9 Secagem e Sinterização 27
3.10 Técnicas de Caracterização 28
3.10.1 Amostragem 28
3.10.3 FRX 29
3.10.4 Determinação de Porosidade 29
3.10.5 Ensaio de absorção de água 30
3.10.6 Ensaio de densidade aparente 30
3.11 Ensaios Mecânicos 31
3.11.1 Ensaio de flexão 31
4 MATERIAIS E MÉTODOS 32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 38
5.1 Difração de Raio-X (DRX) 38
5.2 Sinterização dos corpos de prova 41
5.6 Resultados Porosidade aparente, densidade aparente e absorção de água 43
5.7 Ensaio de Flexão 48
6 CONCLUSÕES 51
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53

1 INTRODUÇÃO

Dentre as diversas classes de resíduos industriais gerados nos processos aciaria, o pó de balão (FEA) se destaca por ser um material fino e escuro que contém diversos metais, incluindo zinco, chumbo, ferro, cromo e cádmio. O reaproveitamento desse pó não só impulsiona a economia através da recuperação de elementos valiosos, mas também minimiza os impactos ambientais e os desafios de descarte relacionados a metais pesados como chumbo, cromo e cádmio. Entre as técnicas existentes e em desenvolvimento, as rotas pirometalúrgicas se sobressaem como a principal opção para o tratamento do pó de balão, dada sua alta eficiência na recuperação de metais e a simplicidade no manejo dos resíduos (Lin *et al*., 2017).

O Relatório Anual do Instituto Aço Brasil indicou que a produção nacional de aço em 2020 foi por volta 31,4 Mt. Nesse período, observou-se que a geração de coprodutos siderúrgicos pela indústria brasileira atingiu um patamar de 622 kg por tonelada de aço produzido, valor baixo devido aos impactos da pandemia do COVID 19. Este indicador evidencia a relevância da temática relacionada à recirculação de coprodutos advindos do processo, os quais apresentam ampla diversidade, destacando-se principalmente os pós, as lamas, as escórias e as carepas (Philippe, 2024).

Com o objetivo de identificar alternativas para o reaproveitamento desse resíduo industrial, este trabalho visa investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do pó de forno elétrico (pó de balão) na produção de adoquins. A relevância deste estudo está diretamente associada ao reaproveitamento do pó de balão, resíduo classificado como perigoso e gerado em grandes quantidades pelas aciarias elétricas.

A destinação inadequada desse material acarreta sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água, além de custos elevados para sua disposição em aterros industriais. Nesse contexto, a proposta de incorporá-lo na produção de adoquins cerâmicos representa uma alternativa sustentável, capaz de reduzir danos ambientais, agregar valor a um subproduto pouco explorado e contribuir para a economia circular na indústria siderúrgica e cerâmica.

O adoquim é um revestimento cerâmico de aparência rústica cujas principais características incluem, entre outras, sua tonalidade natural e acabamento bruto. O adoquim possui configurações geométricas projetadas não apenas para garantir praticidade na instalação, mas também para assegurar uma distribuição adequada das cargas decorrentes dos diferentes tipos de tráfego. Os adoquins possibilitam a pavimentação de vias para diversos tipos de tráfego, calçadas, áreas destinadas a pedestres, estacionamentos e jardins, entre outros. (Candido *et al*.,

2013). O adoquim é produzido a partir de argilas naturais misturadas entre si que conferem o caráter plástico, juntamente com materiais não plásticos, como o chamote e o argilito (Sánchez *et al*., 1990).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da substituição de materiais não plásticos por pó de balão, resíduo proveniente do processo de produção de aço no FEA. Contribuindo assim para o desenvolvimento de soluções que promovam o reaproveitamento de resíduos industriais, em consonância com os princípios da sustentabilidade e socioeconômicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivo estudar a utilização do pó de balão proveniente de aciaria elétrica para produção de adoquim utilizando dois tipos de argila: Terracota e Branca.

2.2 Objetivos Específicos

• Realizar a caracterização físico-química do pó de balão proveniente de aciaria elétrica.

• Produzir blocos de adoquim com diferentes teores de substituição da argila (branca e terracota) pelo pó de balão.

• Realizar ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos produzidos.

• Avaliar a viabilidade técnica da utilização do pó de balão como substituto parcial da argila na fabricação de adoquins.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Desenvolvimento de Tijolos Cerâmicos ao Longo da História

A utilização de minerais extraídos da natureza para a edificação de moradias acompanha a humanidade há mais de dez milênios. Essa prática teve início quando grupos étnicos diversos abandonaram o estilo de vida nômade e se estabeleceram em assentamentos permanentes, um comportamento que se difundiu amplamente por toda a região do Mediterrâneo (Love *et al*., 2013).

De acordo com Cajamarcazuniga et al., o uso de argila cozida, ou tijolos cerâmicos, remonta a cerca de 3000 a.C., marcando um avanço significativo na história das construções. Um exemplo de aplicação de tijolos na antiguidade, pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Necrópole do Cemitério de al-Bagawat no Oásis de El Kharga



Fonte: iStock, 2025.

Em relação a manufatura de materiais de alvenaria no Brasil, consta-se que a utilização de tijolos para construções civis está datada a partir da chegada dos Portugueses em terras nacionais no período colonial, principalmente nos Estados da Bahia e Pernambuco (Rocha., 2012). Apesar de sua longa história, foi apenas a partir de 1850 que o uso do tijolo em larga escala se tornou uma realidade em terras brasileiras, popularizando-se nas últimas décadas do século XIX.

Conforme WEIMER.,2005, a alvenaria estrutural de tijolos maciços tem sido o método construtivo predominante. Um exemplo disso é o Sítio Histórico de Santa Leopoldina, onde a grande maioria das edificações foi erguida com alvenaria de tijolos cerâmicos. Em algumas

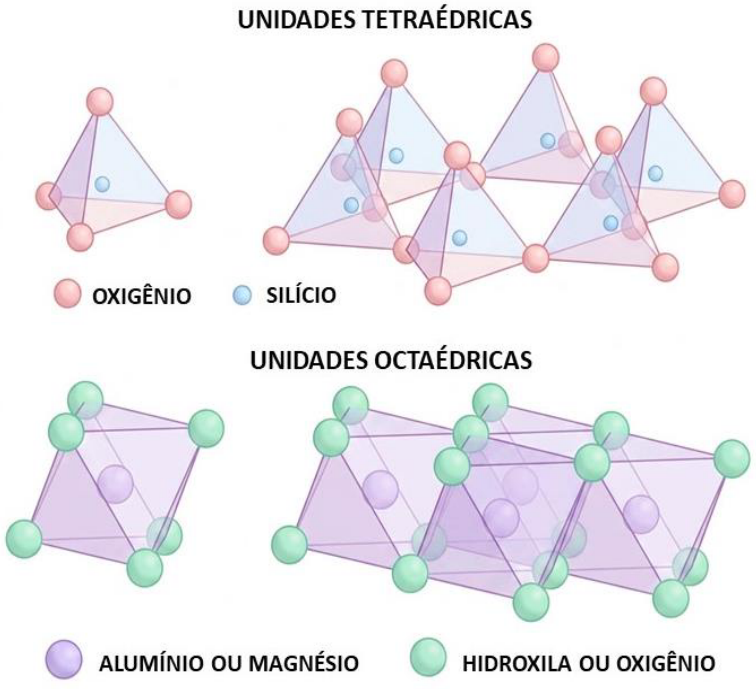
construções, é possível observar o uso de alvenaria de pedra no térreo, complementando a estrutura de tijolos.

3.2 Argila

A argila é um material de origem natural constituído predominantemente por partículas de tamanho coloidal, com diâmetro inferior a 2 μm. Sua estrutura lamelar confere elevada área superficial específica e capacidade de adsorção. Em presença de água, apresenta comportamento plástico devido à hidratação das superfícies minerais e à mobilidade das partículas, enquanto o processo de secagem ou a exposição a altas temperaturas promove a perda de água adsorvida e interlamelar, resultando em endurecimento e consolidação da massa (Kumari., 2021).

A argila é constituída predominantemente por minerais aluminossilicatos hidratados, entre os quais se destacam caulinita, esmectita, ilita e clorita. Frequentemente, sua composição inclui fases acessórias como quartzo, feldspato, óxidos de ferro e matéria orgânica, presentes sob a forma de impurezas. Essa diversidade mineralógica confere ao material propriedades físico-químicas específicas, relevantes para aplicações tecnológicas e estudos geológicos (Murray., 1991). A Figura 2 exemplifica a geometria e as unidades estruturais de uma argila esmectita.

Figura 2 - Geometria e unidades estruturais de uma argila esmectita



Fonte: Adaptado de Carastan, 2007.

A Tabela 1 exibe os principais tipos de argila, os tipos de estruturas e suas características. A letra “T” significa unidade tetraédrica e a letra “O” significa unidade octaédrica.

Tabela 1 – Características dos principais grupos de argilas

Grupo	Tipo de camada	Características
Caulinita	T-O	Baixa expansão, boa plasticidade.
Esmectita	T-O-T	Alto intumescimento, alta troca catiônica.
Ilita	Ligação potássio	Plasticidade moderada, baixo intumescimento.
Clorita	T-O-O	Plasticidade variável.

Fonte**:** Adaptado de Kumari., 2021

3.2 Argila Terracota

A argila terracota é caracterizada pelo elevado teor de óxido de ferro (aproximadamente 5–9% de Fe_2O_3), responsável pela coloração avermelhada após a queima. Esse componente atua como fundente, reduzindo a temperatura de maturação e favorecendo a obtenção de peças mais “maduras” em temperaturas relativamente baixas. Trata-se de uma cerâmica porosa de baixa temperatura, amplamente utilizada na fabricação de tijolos, tubos, vasos de flores, esculturas e peças de grande porte. Apresenta elevada plasticidade e versatilidade, sendo frequentemente misturada com outros minerais, o que a caracteriza como uma argila não pura (Suman *et al*., 2023).

Entre suas propriedades distintivas, destaca-se a elevada capacidade de absorção de umidade, que a torna particularmente adequada para utensílios culinários e recipientes de armazenamento, sobretudo em preparações de cozimento lento (Boyi, John Mallam, 2025). Como material corante e de revestimento vítreo, o pó de terracota, utilizado em proporções entre 20% e 50% em esmaltes transparentes aplicados sobre porcelana, promove a formação de superfícies lustrosas, cremosas e translúcidas, livres de defeitos, quando submetidas a processos de queima em temperaturas próximas de 1200 °C (Suman *et al*., 2023).

Quando finamente moído, o resíduo de demolição de terracota pode atuar como material

pozolânico, substituindo parcialmente o clínquer de cimento em proporções de até aproximadamente 30% em sistemas LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Essa substituição contribui para a manutenção de boas propriedades mecânicas, ao mesmo tempo em que favorece a redução das emissões de CO_2 associadas à produção de cimento (Tokareva; Kassamani; Waldmann, 2024).

3.3 Argila Branca

A chamada argila branca corresponde a um tipo de argila cerâmica que, após o processo de queima, apresenta coloração predominantemente branca ou creme. Essa característica cromática decorre da utilização de argilas com baixo teor de ferro e reduzida presença de impurezas minerais que, de outra forma, poderiam escurecer o material durante a sinterização. A argila branca é amplamente valorizada na produção de cerâmicas decorativas e utilitárias, em virtude de sua capacidade de realçar os efeitos cromáticos e os motivos aplicados por meio de esmaltes e técnicas de decoração (Molinari *et al*., 2023).

Esse material é particularmente adequado para a fabricação de porcelanas finas e cerâmicas de elevada qualidade, nas quais a pureza da tonalidade branca funciona como suporte ideal para a expressão artística. Além disso, a argila branca potencializa a luminosidade dos esmaltes, favorecendo a obtenção de acabamentos brilhantes e detalhados, os quais são de difícil execução quando se empregam argilas de coloração mais escura (Smalted, 2022).

Rica em caulinita (*kaolinite*), também denominada caulim ou China clay, essa argila é frequentemente combinada com feldspato e quartzo para compor massas cerâmicas. Nas formulações típicas de porcelana, a mistura apresenta proporções aproximadas de 40% a 55% de argila caulinítica ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), 20% a 25% de sílica (SiO_2) e 25% a 40% de feldspato ($KAlSi_3O_8$). Essa composição balanceada é fundamental para assegurar as propriedades desejadas de plasticidade, resistência mecânica e translucidez, características que distinguem a porcelana de alta qualidade (Elie Kamseu *et al*., 2007).

A argila branca, quando submetida a processos de queima em temperaturas elevadas (aproximadamente entre 1200 °C e 1350 °C), alcança o estágio de vitrificação, caracterizado pela formação de uma matriz cerâmica densa e homogênea. Esse processo resulta em valores extremamente baixos de absorção de água (inferiores a 0,5%), além de conferir elevada resistência mecânica ao material, atributos que a tornam particularmente adequada para aplicações em porcelanas e cerâmicas de alta performance (Molinari *et al*., 2023).

3.4 Pó de Balão Produzido em Forno Elétrico a Arco

No panorama das diversas cadeias de suprimentos da siderurgia, os fornos elétricos a arco (FEA) se destacam como a tecnologia predominante para a reciclagem de sucata de aço. Este processo, fundamental para a economia circular na indústria, apresenta características específicas em termos de consumo de energia e emissões de dióxido de carbono (CO2). O consumo energético total para a produção de uma tonelada de aço via FEA varia de 1.389 a 4.250 quilowatts-hora por tonelada de aço (kWh/taço). Desse total, a eletricidade representa uma parcela significativa, correspondendo a 40% a 65% do consumo energético específico (Bonacina *et al*., 2024).

Segundo Araújo 2014., a proporcionalidade da quantidade de resíduos que são gerados em uma rota siderúrgica está diretamente relacionada com a natureza física do material e o tipo de processamento utilizado na produção. Araújo ainda aborda especificamente sobre o pó de balão, explicando se tratar de um resíduo obtido por um sistema coletor de pó, e destaca os principais problemas relacionados a sua produção:

- É classificado como resíduo perigoso onde os elementos chumbo e cádmio se apresentam acima do valor máximo permissível;
- Sua produção se encontra na faixa de 14 a 20 kg. t -1 de aço produzido;
- A destinação do pó de aciaria para aterro industrial classe 1, tem custos de R$ 250,00 t -1, entre disposição e transporte, além de ser uma solução que é finita e insustentável.
- Os aterros industriais estão cada vez mais escassos e afastados das empresas geradoras e há uma tendência para que resíduos perigosos sem pré-tratamento tenham sua disposição proibida;
- As soluções para o tratamento desse resíduo têm duas características fundamentais, são complexas e custam caro.

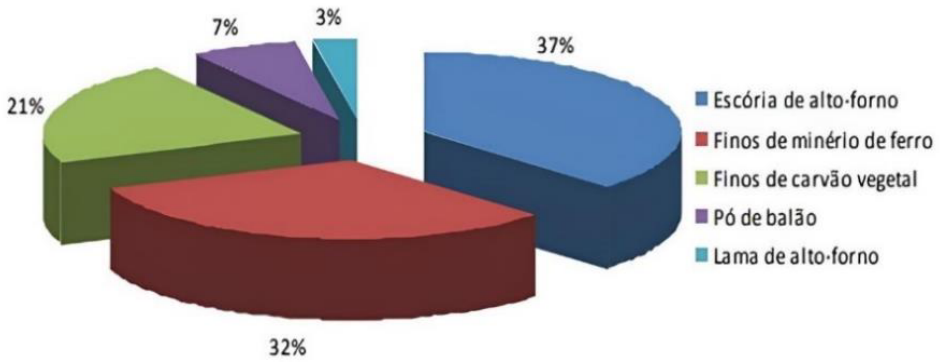
O pó de balão, também denominado Charcok, constitui um subproduto oriundo da aciaria, caracterizando-se como um resíduo cuja aplicação industrial ainda é relativamente pouco explorada. No entanto, ele pode ser aproveitado mediante processos de aglomeração por sinterização, permitindo sua reincorporação às matérias-primas utilizadas no processo. Esse material é obtido por meio do sistema de captação a seco dos gases gerados na produção de aço, com uma produção estimada entre 28 e 45 kg para cada tonelada de ferro fabricada. A disposição desse resíduo ocorre frequentemente em sacos armazenados a céu aberto nos pátios industriais, o que pode acarretar impactos ambientais significativos, incluindo a contaminação

do solo, da atmosfera e dos recursos hídricos, além de potenciais prejuízos à saúde respiratória das populações expostas (Andrade; Magalhães., 2019).

Uma outra definição do pó de balão o caracteriza como sendo um dos subprodutos oriundos do setor siderúrgico, se caracterizando por ser um material particulado resultante do sistema de limpeza de gases a seco. Esse resíduo é captado nos fornos por meio do sistema de despoeiramento denominado balão gravitacional. Sua composição é predominantemente formada por óxidos de ferro, manifestando-se nas formas FeO, Fe_2O_3 e Fe_3O_4, correspondentes às fases cristalinas conhecidas como wustita, hematita e magnetita, respectivamente (Augusto., 2009).

A porcentagem da distribuição dos resíduos sólidos gerados no processo de fabricação do ferro gusa em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal no Brasil, é representada de forma gráfica, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Gráfico com os principais subprodutos de aciaria elétrica no Brasil



Fonte: Augusto, 2009.

Em Minas Gerais, a composição de misturas com argila frequentemente incorpora resíduos industriais como o pó de balão, proveniente da siderurgia, a lama de alto-forno (fercoque) e materiais descartados das próprias unidades produtivas, incluindo peças cerâmicas quebradas e cinzas. Além desses, outros subprodutos, como escória de alto-forno, pó de ardósia, areia de fundição, carepa e diversas lamas oriundas de processos de tratamento de efluentes líquidos, também podem ser empregados nesse contexto. No entanto, a utilização desses materiais no estado ainda é relativamente restrita, limitando seu potencial de aproveitamento em aplicações industriais e ambientais.

Assim, utilizar resíduos de origem industrial como o pó de balão como matéria não plástica em produtos cerâmicos, apresenta-se como uma ótima opção para desenvolvimento de novos materiais todavia, é preciso garantir a queima de maneira precisa dos elementos tóxicos presentes na composição dos resíduos, bem como realizar estudos relacionados a incorporação

dos mesmos na matriz de sinterização, evitando o arraste de meio líquido durante a utilização e descarte destes produtos (Andrade; Magalhães., 2019).

3.5 Problemas Socioambientais Da Indústria Cerâmica

De acordo com Murmu Patel, 2018, o crescimento populacional exacerbado e o grande fluxo migratório para as cidades ao longo dos séculos, têm gerado uma enorme demanda por moradias a preços acessíveis, criando um desequilíbrio significativo nos centros urbanos. Esse desafio é alavancado pelo alto custo dos materiais de construção, incluindo os tijolos, que podem representar cerca de 60% do investimento total de uma obra. Além do custo, a produção desses materiais exige a utilização de grandes quantidades de energia, se tornando prejudicial ao meio ambiente e gera grandes volumes de resíduos. Em muitos países, a construção civil não sustentável é vista como uma séria ameaça ecológica.

A indústria da construção na Índia, por exemplo, contribui com 22% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) do país (Murmu; Patel., 2018). Paralelamente, a indústria metalúrgica tem se mostrado uma grande geradora de resíduos tal qual a indústria cerâmica. Em 2020, a produção brasileira de aço atingiu 31,4 milhões de toneladas de resíduos, um volume ligeiramente menor em comparação aos anos precedentes, atribuído principalmente aos efeitos da pandemia de COVID-19. Nesse mesmo período, a indústria siderúrgica nacional registrou uma geração de coprodutos de 622 kg por tonelada de aço que produziu. Esse dado sublinha a importância da recirculação desses resíduos, que são diversos e incluem, notavelmente, pós, lamas, escórias e carepas (Philippe, 2024).

Nos últimos anos, a indústria de produção de tijolos cerâmicos tem direcionado esforços à incorporação de resíduos industriais como substitutos parciais das matérias-primas tradicionais, visando à mitigação dos impactos ambientais associados ao setor. Apesar de numerosos estudos científicos apontarem resultados tecnicamente viáveis, a transposição desses achados para a escala industrial ainda se mostra incipiente. Tal limitação decorre, em grande medida, das divergências entre as condições operacionais de laboratório e de fábrica, bem como da competição pelo uso de determinados resíduos que já possuem inserção consolidada em outras cadeias produtivas da economia circular (Muñoz *et al*., 2023).

3.6 Aspectos Econômicos

Além do interesse em reduzir os danos ambientais, existe também o teor econômico na utilização de resíduos industriais incorporados em tijolos. O descarte indevido de rejeitos provenientes de indústrias como os de siderurgia por exemplo, pode configurar crime ambiental de acordo com a Lei nº 9.605, resultando na penalidade de multas que podem variar de R$ 5.000,00 a R$ 50.000.000,00, dependendo de alguns fatores como o tipo de resíduo, o nível do dano ambiental causado e onde ocorreu a infração.

Portanto, avaliar novas formas de agregar resíduos de fábrica em tijolos pode se tornar uma rotas de lucratividade para determinados segmentos industriais. Estudos conduzidos no Brasil corroboram com a perspectiva econômica na produção e utilização de tijolos ecológicos, uma vez que podem gerar uma economia por volta de 20% e 40% em comparação aos métodos construtivos convencionais de acordo com o SEBRAE.

Somado aos critérios econômicos que a junção de resíduos industriais em tijolos pode trazer, a lucratividade também se torna um fator significativo para fábricas voltadas para o ramo de olaria e alvenaria. A produção por ano de peças cerâmicas vermelhas em território Brasileiro é estimada em aproximadamente 100 bilhões de unidades. Desse montante, 30% correspondem à fabricação de telhas, e 70% são compostos por blocos cerâmicos. O faturamento anual do setor é estimado em R$ 30 bilhões, contribuindo significativamente para o mercado de trabalho com a geração de cerca de 300 mil empregos diretos e mais de 900 mil empregos indiretos (Ferreira *et al*., 2023).

3.7 Adoquim

O Adoquim é um revestimento cerâmico que possui características favoráveis a sua utilização em pavimentação como facilidade de manejo, com vida útil por volta dos 30 anos e possuir um processamento economicamente viável (Almeida *et al*., 2020).

Trata-se basicamente de um bloco cerâmico gresificado (processo de transformação de uma massa cerâmica em grés ou porcelanato por meio de queima em altas temperaturas). projetado para pavimentos externos que suportam tráfego de pedestres e veículos leves. Sua aplicação é flexível em bases permeáveis, tornando-o ideal para áreas como jardins, estacionamentos e caminhos (Adoquines Jardín Vermelho Vulcânico., 2022). O processamento do adoquim pode variar de acordo com a disponibilidade de pesquisa, consistindo basicamente na mistura de um material plástico e outro não plástico. Candido por exemplo, utilizou chamote,

um resíduo industrial que pode, assim como o pó de balão, ser incorporado à argila após trituração para produção de adoquim cerâmico. A diferença entre ambos é que o Chamote geralmente possui granulometria mais grosseira que o Pó de balão, que é um pó relativamente mais fino o que pode influenciar no empacotamento do produto final.

Cada país possuí suas próprias normas específicas para produção de adoquins. No Brasil, as normas para adoquins são definidas principalmente pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A principal norma que estabelece os requisitos para a produção e qualidade desses elementos de pavimentação é a ABNT NBR 9781:2013. O material utilizado para a produção do Adoquim dessa norma é o concreto, e neste documento são estabelecidos alguns procedimentos para garantir a qualidade do produto como por exemplo:

- ABNT NBR 9781:2013: Estabelece os requisitos para peças de concreto utilizadas em pavimentação, incluindo aspectos como resistência, dimensões, formatos e métodos de ensaio.
- ABNT NBR 9871:2012: Esta norma define os requisitos para a avaliação da qualidade das peças de concreto para pavimentação com adoquines, incluindo aspectos como resistência, absorção de água e durabilidade.

Essas normas são essenciais para garantir a qualidade, segurança e durabilidade das pavimentações intertravadas, contribuindo para a redução de problemas como trincas, rachaduras e desgaste precoce. O aprimoramento das propriedades técnicas, aliado à ampla diversidade de formatos disponíveis, viabilizou a aplicação desse material em pavimentações destinadas a diferentes propósitos. Além disso, sua característica de intertravamento confere elevada praticidade na implementação, favorecendo a eficiência do processo de instalação e a estabilidade estrutural das superfícies construídas.

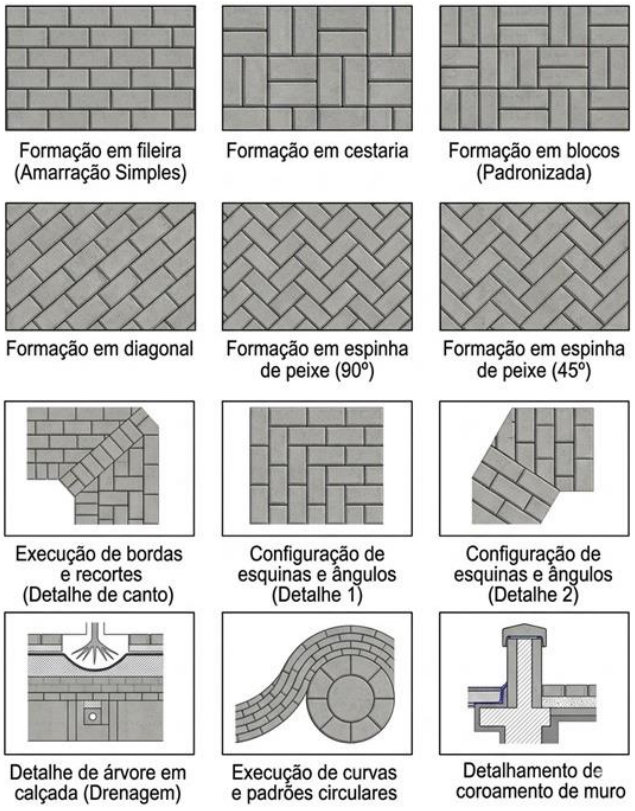
Na Espanha, nos Estados Unidos e na Colômbia, observa-se um crescente investimento na utilização desse tipo de material. Em diversas regiões dos Estados Unidos, particularmente nas cidades de Orlando, Houston e Columbus, os adoquins são amplamente empregados em espaços que vão desde jardins até rodovias de alto fluxo veicular. Nessas localidades, a aplicação dos adoquins contribui para a criação de ambientes que combinam um caráter rústico com elementos inovadores, proporcionando um aspecto diferenciado à infraestrutura urbana. No Brasil, os adoquins cerâmicos ainda apresentam baixa notoriedade, tendo como principal concorrente os pavimentos intertravados de concreto (PPC) citados anteriormente, cuja popularização ocorreu a partir de meados do século XX.

O país adota majoritariamente pavimentos asfálticos, enquanto os pavimentos de

concreto são empregados em menor escala. Nas últimas duas décadas, os PPC consolidaram-se como uma alternativa relevante no setor de infraestrutura viária. Em contraste, os adoquins cerâmicos foram introduzidos recentemente no mercado brasileiro, emergindo como uma inovação para a indústria de cerâmica vermelha, com perspectivas promissoras para seu desenvolvimento e aplicação.

Os adoquins cerâmicos podem ser classificados em pavimentos flexíveis ou rígidos, distinção que decorre do método de assentamento e do acabamento da estrutura. Nos pavimentos flexíveis, os adoquins são posicionados sobre uma camada espessa de areia compactada, sendo posteriormente vedados com uma camada adicional de areia mais fina, a fim de preencher as juntas resultantes do intertravamento das peças. Já os pavimentos rígidos são instalados sobre uma base de concreto e, em seguida, rejuntados com uma argamassa de cimento, procedimento que acarreta um custo de implantação mais elevado devido à maior complexidade do processo construtivo (Cândido *et al.,* 2013). A Figura 5 exibe as diferentes disposições em que um piso intertravado de adoquim pode ser posicionado.

Figura 4 - Posicionamentos de Adoquins



Fonte: Adaptado de LaPaloma, 2025.

Além do design único, variando tanto sua coloração quanto sua geometria, os adoquins de cerâmica possuem uma série de vantagens quando comparados com os adoquins de pedra e concreto, como demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação de propriedades entre três tipos de Adoquim.

Propriedade	Adoquim Concreto	Adoquim pedra	Adoquim Cerâmico
Resist. Compressão (KG/CM2)	350	320	1000
Absorção DE Água (%)	< 6	0,3 – 0,6	3
Resist. Congelamento (*) (N/MM2)	Sem Congelamento	Sem Congelamento	Sem Congelamento
Desgaste por Fricção	20	0,8 – 0,95	0,70
Densidade Aparente (KG/M3)	2000	2190	2100
Resist. Ácido Sulfúrico	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: Adapado de LaPaloma, 2026.

O adoquim cerâmico apresenta uma resistência significativamente superior (1000 Kg/cm²) em comparação ao concreto (350 Kg/cm²) e à pedra (320 Kg/cm²), indicando maior capacidade de suportar cargas elevadas. O adoquim cerâmico também demonstra ter um menor desgaste por fricção (0,70) do que os demais, tornando-se mais durável em ambientes de alto atrito, além de penas o adoquim cerâmico ser resistente ao ácido sulfúrico, tornando-o uma opção viável para ambientes agressivos. Sendo assim, os adoquins cerâmicos demonstram vantagens significativas em resistência mecânica, durabilidade e resistência química, sendo uma alternativa promissora para aplicações estruturais exigentes.

Em 2006, o Instituto do Cimento Portland Argentino (ICPA) e a Associação Argentina do Bloco de Hormigón (AABH) propuseram uma nova abordagem normativa para avaliação da resistência mecânica dos pavimentos de adoquins de concreto. A proposta considerava que, caso os adoquins apresentassem comportamento flexível, a flexibilidade deveria ser o principal critério de desempenho de cada unidade (BENÍTEZ; BERTONE; CIVITILLO, 2009).

A tabela 3 compara os critérios da norma Argentina IRAM 11656:1998 com o projeto de revisão proposto em 2006 para adoquins de concreto. Enquanto os limites de absorção permanecem inalterados (≤ 5% em média e ≤ 7% individual), o novo projeto substitui parte da avaliação de compressão por parâmetros de resistência à flexão, introduzindo valores mínimos de 4,2 MPa (média) e 3,8 MPa (individual). Essa mudança reflete uma evolução na abordagem

normativa, priorizando o comportamento flexível dos pavimentos como indicador mais realista de desempenho estrutural.

Tabela 3 – Norma IRAM comparando tipos de ensaio em Adoquins

TIPO DE ENSAIO	NORMA IRAM 11656:1998		PROJETO NORMA IRAM 11656	
	Média	Valor Individual	Média	Valor Individual
Absorção	≤ 5%	≤ 7%	≤ 5%	≤ 7%
Compressão				
Adoquim Tipo I	> 45 Mpa	> 40 Mpa	-	-
Adoquim Tipo II	> 35 Mpa	> 30 Mpa	-	-
Flexão	-	-	≥ 4.2 MPa	≥ 3.8 MPA

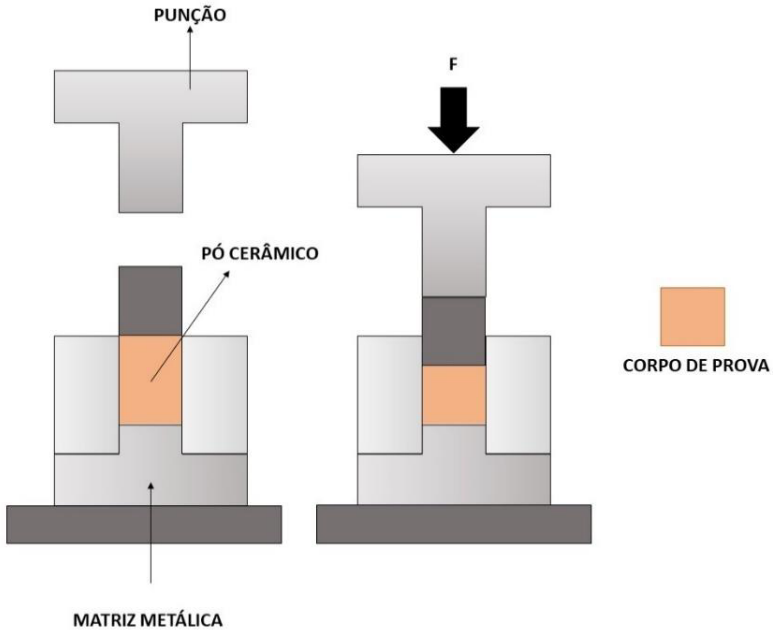
Fonte: Adaptado de BENÍTEZ; BERTONE; CIVITILLO, 2009.

3.8 Prensagem

O processo de compactação de uma massa cerâmica, normalmente contendo pequenas quantidades de água ou outro agente aglutinante (promovendo a coesão entre partículas), ocorre por meio da aplicação de pressão para obtenção da geometria desejada. Na prensagem uniaxial, a compactação do pó ocorre em uma matriz metálica sob a ação de uma carga aplicada em uma única direção. A peça conformada adquire a forma definida pela matriz e pela punção responsável pela transmissão da pressão.

Embora esse método seja mais adequado para a fabricação de componentes com geometrias relativamente simples, destaca-se por proporcionar elevadas taxas de produção e baixo custo operacional, sendo amplamente empregado na indústria cerâmica e na metalurgia do pó (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 490). A Figura 6 demonstra como ocorre uma prensagem uniaxial.

Figura 5 - Exemplo de prensagem uniaxial



Fonte: Próprio Autor, 2026.

3.9 Secagem e Sinterização

Após a mistura das matérias plásticas e não plásticas, o Adoquim passa por etapas de secagem e sinterização, processos convencionais para a produção de materiais cerâmicos. A secagem é uma fase essencial na produção de materiais cerâmicos, ocorrendo antes da queima e demandando significativa energia térmica para eliminar a umidade incorporada durante a moldagem. Esse processo é fundamental para garantir a resistência e a estabilidade das peças ao serem submetidas às altas temperaturas da queima. Caso a secagem não seja realizada adequadamente, a evaporação abrupta da água no forno pode provocar falhas estruturais, comprometendo a qualidade do produto e, em situações extremas, causando sua ruptura (Gomez *et al*., 2020).

Já a sinterização é um processo térmico essencial na manufatura de materiais cerâmicos, realizado em altas temperaturas para promover a densificação do material. Durante essa etapa, a peça é submetida a um aquecimento controlado, permitindo a redução da porosidade e o aumento da coesão entre as partículas. O resfriamento gradual, por sua vez, é fundamental para evitar tensões internas que possam gerar defeitos e trincas, garantindo a integridade estrutural do produto final (Ferreira *et al*., 2019). Existem dois tipos de sinterização; sinterização por fase sólida e sinterização por fase líquida.

Na sinterização por fase sólida, o material é aquecido a uma temperatura inferior ao seu ponto de fusão, de modo que a consolidação ocorre exclusivamente por difusão no estado sólido. A ligação entre partículas é promovida pela migração de átomos ao longo dos contornos, resultando na formação de uma estrutura mais compacta (Silva; Junior, 1998). Já na Sinterização por fase líquida, uma fração do material funde-se durante o aquecimento, criando uma fase líquida que atua como meio de transporte para os componentes sólidos remanescentes. Essa fase líquida facilita a reconfiguração das partículas, acelerando a densificação do material. Esse tipo de sinterização é aplicado quando há a necessidade de obtenção de estruturas mais homogêneas ou quando se busca diminuir a temperatura do processo, como em cerâmicas estruturais e ligas metálicas (Silva; Junior, 1998).

3.10 Técnicas de Caracterização

A caracterização de materiais é um conjunto de técnicas analíticas utilizadas para investigar suas propriedades e estrutura, permitindo decisões informadas em engenharia e ciência dos materiais. Essas técnicas se dividem em duas categorias principais: microscopia, que examina aspectos atômicos, moleculares e cristalinos, e testes macroscópicos, que avaliam características volumétricas do material. Esse processo é essencial para o desenvolvimento de projetos, aprimoramento de simulações e realização de análises forenses (ANSYS., 2024).

3.10.1 Amostragem

A amostragem é um procedimento que envolve a extração de determinadas quantidades de material de uma amostra global, com o objetivo de garantir sua representatividade de forma precisa. Trata-se de um processo fundamentado na seleção e na inferência, no qual a análise de uma fração permite a formulação de conclusões abrangentes e coerentes sobre o conjunto total do material estudado (Goes *et al*., 2010).

3.10.2 DRX

A Difratometria de Raios X (DRX) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais, especialmente para determinar sua estrutura cristalina. O princípio da DRX baseia-se na difração dos raios X, um fenômeno que ocorre quando um feixe de raios

X incide sobre um material cristalino e interage com seus átomos, gerando padrões de interferência que podem ser analisados para obter informações sobre a organização dos átomos no cristal (MIAGUSUKU., 2020). O processo de difratometria de Raios-X acontece da seguinte maneira:

- Emissão de Raios X: Um feixe de raios X é direcionado para a amostra.
- Interação com o Material: Os raios X interagem com os planos cristalográficos do material, sendo difratados em ângulos específicos.
- Registro dos Padrões de Difração: Os feixes difratados são captados por um detector, gerando um difratograma, que é um gráfico com picos característicos da estrutura cristalina da amostra.
- Análise dos Dados: A posição e intensidade dos picos permitem identificar a composição do material, sua fase cristalina e até mesmo possíveis impurezas.

3.10.3 FRX

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) se trata de uma técnica analítica utilizada para identificar e quantificar os elementos químicos presentes em um material. Ele funciona a partir da interação entre os raios X e os átomos da amostra, gerando uma emissão característica que permite determinar sua composição química. O ensaio de RX consiste em estimular uma excitação dos átomos da amostra, que é exposta a um feixe de raios X. Em seguida, os átomos retornam ao seu estado fundamental, liberando energia na forma de raios X fluorescentes. Após essa etapa, um detector registra essas emissões, permitindo a identificação e quantificação dos elementos químicos na amostra (TAVARES., 2024).

3.10.4 Determinação de Porosidade

Tavares define ensaio de porosidade como a determinação da quantidade de espaços vazios presentes num material, visando entender seu comportamento. Os principais métodos para calcular a quantidade de material de um material são:

- Método de Deslocamento de Água: Este método, baseado no princípio de Arquimedes, é utilizado para medir a porosidade de materiais que absorvem água. Há a pesagem do material seco que em seguida é submerso em água, permitindo que os poros se preencham. Finaliza-se então com a medição do volume de água deslocado, que corresponde ao volume de poros presentes no material.

- A medida de poros utilizando mercúrio é um método mais sofisticado, que é feito para determinar a distribuição de tamanho dos poros em materiais sólidos. O processo envolve a intrusão de mercúrio sob diferentes pressões no material poroso para que haja registro da pressão necessária para preencher os poros, permitindo calcular seu tamanho e distribuição.
- O MEV é uma técnica avançada que permite visualizar a estrutura interna dos materiais em alta resolução. Feixes de elétrons incidem sobre a amostra, gerando imagens detalhadas que permitem identificar e medir os poros presentes no material.

3.10.5 Ensaio de absorção de água

É um método utilizado para avaliar a porosidade de materiais cerâmicos, determinando a quantidade de água que um material pode absorver. Essa propriedade é essencial para prever o comportamento do material em diferentes condições ambientais e aplicações. A absorção de água está relacionada diretamente com a porosidade residual e, dessa forma, desempenha um papel essencial como indicador da qualidade e do processo de sinterização dos materiais cerâmicos (Menegon *et al.*, 2024). O ensaio tem como objetivo avaliar a capacidade de absorção de água de materiais cerâmicos. Para sua execução, utilizam-se corpos de prova previamente secos, que são posteriormente submetidos à imersão em água por um intervalo de tempo determinado. A partir da comparação entre a massa da amostra no estado seco e após a saturação, calcula-se o percentual de absorção hídrica, parâmetro que caracteriza o comportamento do material frente à presença de umidade.

3.10.6 Ensaio de densidade aparente

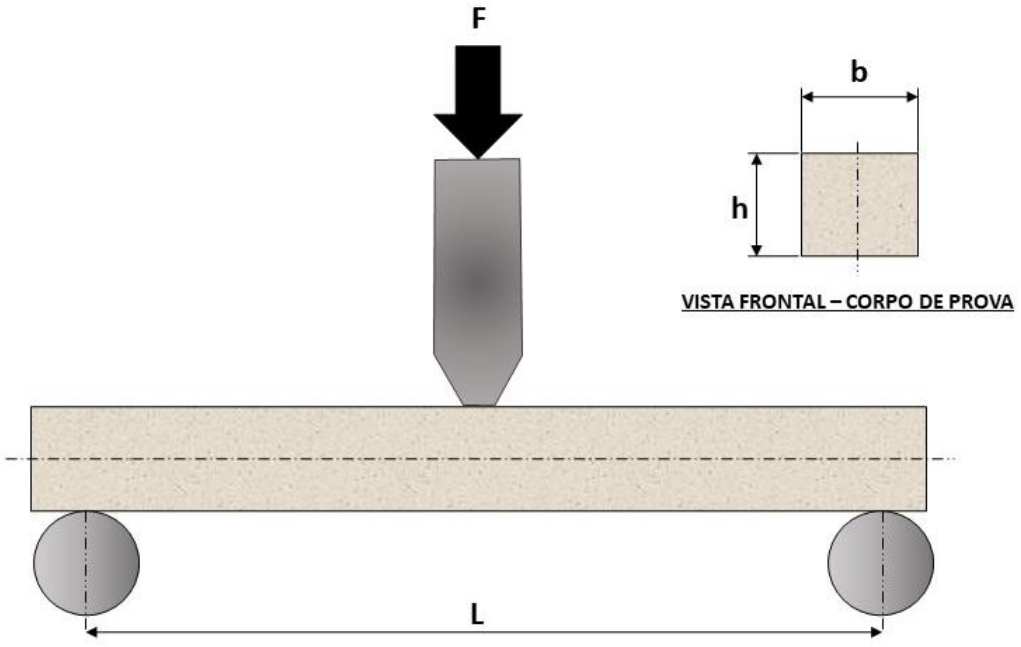
O ensaio de densidade aparente é um método utilizado para determinar a relação entre a massa e o volume de um material, incluindo seus poros abertos. Essa propriedade é essencial para caracterizar materiais cerâmicos, agregados e solos, influenciando diretamente sua resistência mecânica e comportamento em diferentes condições de uso. O procedimento pode envolver técnicas como método de deslocamento de líquido, porosimetria de mercúrio ou métodos baseados em empuxo, dependendo do tipo de material analisado. A densidade aparente é calculada pela razão entre a massa seca do material e o volume ocupado, considerando os espaços vazios internos (Mendes *et al*., 2019).

3.11 Ensaios Mecânicos

3.11.1 Ensaio de flexão

No ensaio de flexão em três pontos, uma força é aplicada de maneira progressiva sobre um corpo de prova em forma de barra, que se encontra apoiado em suas extremidades. À medida que a carga aumenta, as tensões internas se distribuem de forma elástica: a face convexa da barra fica submetida à tração, enquanto a face côncava sofre compressão, ambas orientadas ao longo do eixo do corpo de prova. Materiais frágeis como as cerâmicas apresentam maior suscetibilidade à fratura sob tensões de tração do que sob compressão logo, a região convexa, especialmente próxima à superfície, torna-se crítica. Nesses pontos, os níveis de tensão são mais elevados e, portanto, defeitos ou imperfeições superficiais tendem a atuar como iniciadores de fratura. Já as descontinuidades localizadas na metade comprimida da barra geralmente não influenciam de forma significativa no processo de ruptura (Morrell, 1997). A Figura 7 exemplifica como ocorre um ensaio de flexão.

Figura 6 - Ensaio de Flexão

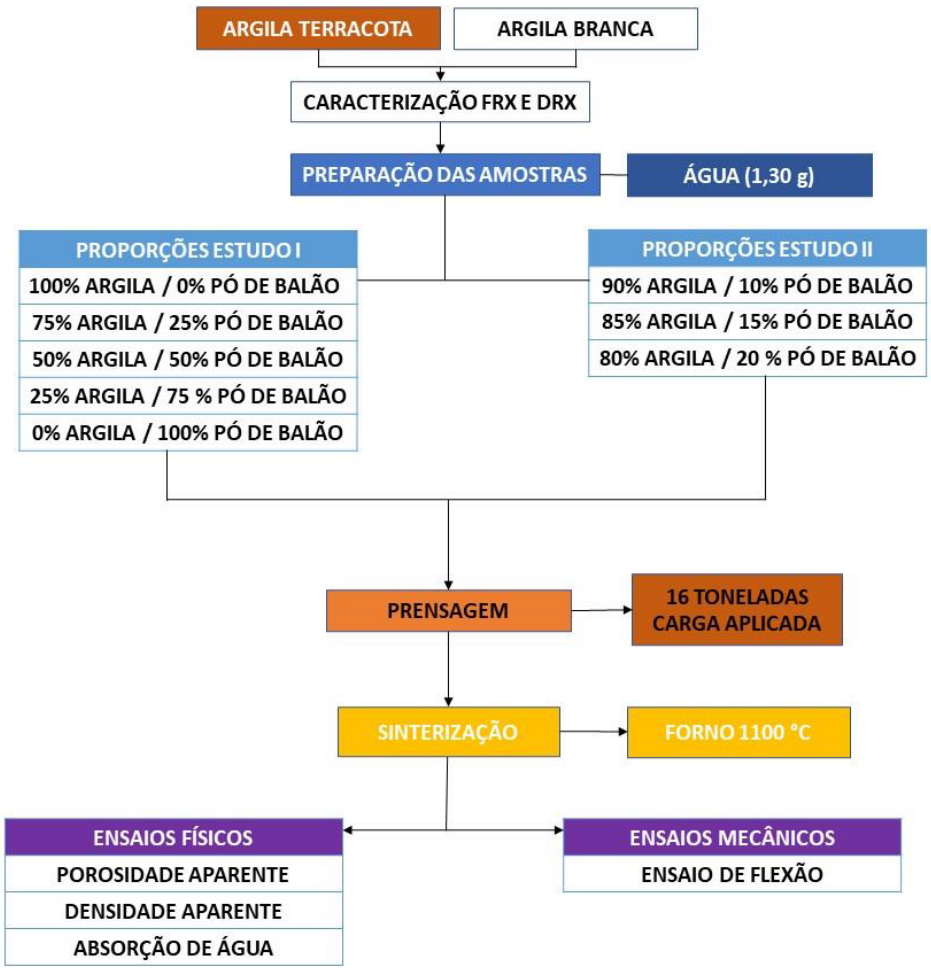


Fonte: Próprio Autor, 2026.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A rota de produção dos corpos de prova para realizar o estudo proposto foi representado pela Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma de produção e ensaios de corpos de prova



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Foram utilizados argila branca, argila terracota, ambas argilas comerciais adquiridas em casas especializadas. O pó de balão foi obtido de indústria siderúrgica e utilizou-se água para as misturas. A água foi medida em 1,30 g por corpo de prova. Os materiais foram pesados em balança analítica e acondicionados em recipientes distintos para posterior preparo. Para a conformação dos corpos de prova, utilizou-se uma prensa hidráulica modelo SL-12/20. A sinterização foi realizada em forno elétrico com elementos de carbeto de silício (GLOBAR-KANTHAL), marca GRION.

Inicialmente, foram preparados sete corpos de prova para cada proporção de argila e pó de balão, com massa total de 30 g. A cada mistura foi adicionada 1,30 g de água (aproximadamente 4,3% da massa), seguida de homogeneização manual e posterior prensagem em moldes apropriados. A figura 8 exibe a homogeneização das amostras.

Figura 8 - Preparação das amostras



Fonte: Próprio Autor, 2026.

A tabela 3, apresenta a porcentagem de argila, pó de balão e quantidade de água utilizada em cada uma das amostras.

Tabela 4 - Quantidade de materiais para preparação das amostras

Argila Branca (%)	Argila Terracota (%)	Pó de Balão (%)	Água (g)
100	100	0	1,30
90	90	10	1,30
85	85	15	1,30
80	80	20	1,30
75	75	25	1,30
50	50	50	1,30
25	25	75	1,30
0	0	100	1,30

Fonte: Próprio Autor

A prensagem dos corpos de prova foi realizada em prensa hidráulica SL-12/20, no Laboratório de Cerâmicas finas do DEMAT no CEFET MG, aplicando-se carga de 16 toneladas durante 1 minuto , para os corpos de prova de argila branca e para os corpos de prova de argila terracota. A Figura 9 exibe a prensa hidráulica utilizada e os corpos de prova pós prensagem.

Figura 9 - Prensa e corpos de prova pós prensagem



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao processo de sinterização em forno elétrico com elementos de carbeto de silício GLOBAR-KANTHAL (GRION), também no Laboratório de Cerâmicas Finas do DEMAT no CEFET MG; seguindo o ciclo térmico previamente estabelecido (rampa 5° C) para consolidação das amostras e resfriadas dentro do forno. A Figura 10 exibe o forno e alguns corpos de prova pós sinterização.

Figura 10 - Forno e corpos de prova pós sinterização



Fonte: Próprio Autor. 2026.

Após a sinterização, cada um dos corpos de prova foi pesado em uma balança de dois dígitos para realização da pesagem a seco. A determinação da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente das amostras foi realizada de acordo com a norma ASTM C373-88 (Reapproved 2006). Inicialmente, os corpos de prova foram pesados após a sinterização, em uma balança analítica de dois dígitos. Em seguida, as amostras foram imersas em água e submetidas à fervura por 2 horas utilizando um ebulidor elétrico, permanecendo posteriormente em repouso na mesma água por mais 24 horas para garantir a completa saturação dos poros abertos, como demonstrado pela Figura 11.

Figura 11 - Preparação dos corpos de prova para pesagem a úmido



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Após esse período, foi determinada a massa dos corpos de prova, obtida por meio da pesagem das amostras após a remoção do excesso de água superficial.

Posteriormente, realizou-se a pesagem das amostras, obtendo-se a massa imersa correspondente à massa medida enquanto os corpos de prova permaneciam completamente submersos em água (Conforme norma ABNT NBR 15270). Os corpos de prova foram suspensos e mergulhado em um balde com água sobre uma plataforma, sem tocar o fundo nem as paredes do recipiente. Após isso, mediu-se o peso aparente (P_{ap}) que é menor que o peso a úmido, devido ao empuxo do sistema. A Figura 12 exibe como o teste foi realizado.

Figura 12 - Esquema de Pesagem a Úmido



Fonte: Próprio Autor, 2026.

A partir destes ensaios, foram determinados os valores de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água das amostras cerâmicas analisadas com base em cálculos realizados a partir das pesagens obtidas a seco, a úmido e imersa. A realização desses cálculos permitiu avaliar a influência da adição do pó de balão nas propriedades físicas das cerâmicas, possibilitando a comparação entre os diferentes corpos de prova e a identificação de tendências relacionadas à variação da composição. Os resultados obtidos fornecem subsídios para compreender o comportamento das amostras frente à absorção de água e à formação de poros, aspectos diretamente ligados à qualidade e desempenho do material cerâmico. A porosidade aparente, foi obtida a partir da Equação 1.

$$P = \frac{PU - PS}{PU - PI} * 100 \quad (1)$$

Onde PU corresponde ao peso úmido, PS corresponde ao peso seco e PI corresponde ao peso imerso.

A densidade aparente foi calculada utilizando a Equação 2.

$$DA = \frac{PS}{PS - PI} \quad (2)$$

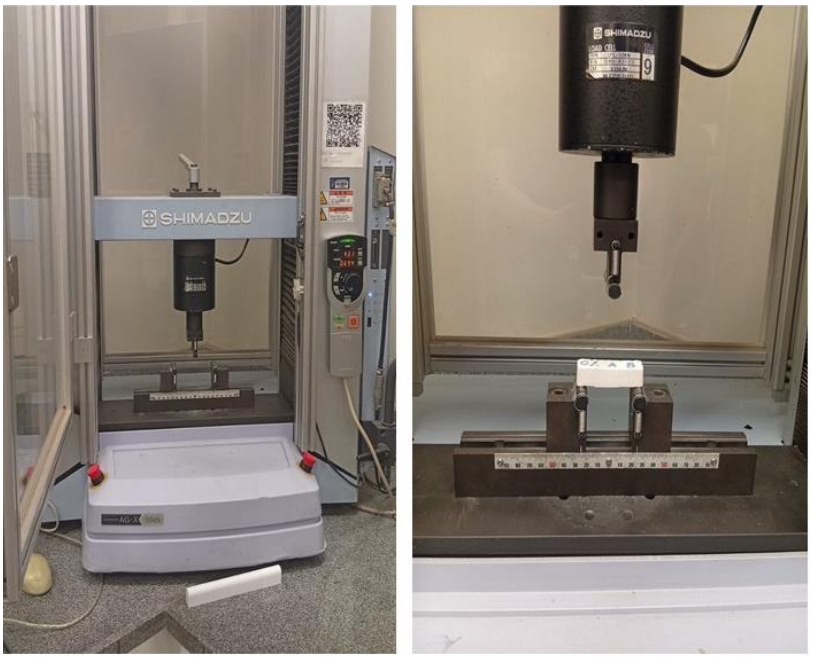
Onde PS corresponde ao Peso Seco das amostras e PI corresponde ao Peso Imerso utilizado no ensaio de Arquimedes.

A absorção de água, foi obtida a partir da Equação 3, onde PU representa o peso a úmido e PS o peso a seco.

$$AA = \frac{PU - PS}{PS} * 100 \quad (3)$$

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Polímeros do DEMAT do CEFETMG utilizando-se a máquina universal para ensaios AG-X, da Shimadzu como demonstrado pela Figura 13.

Figura 13 - Ensaio de flexão



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Os dados obtidos no ensaio de flexão foram tratados utilizando a Equação 4.

$$\sigma = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} \quad (4)$$

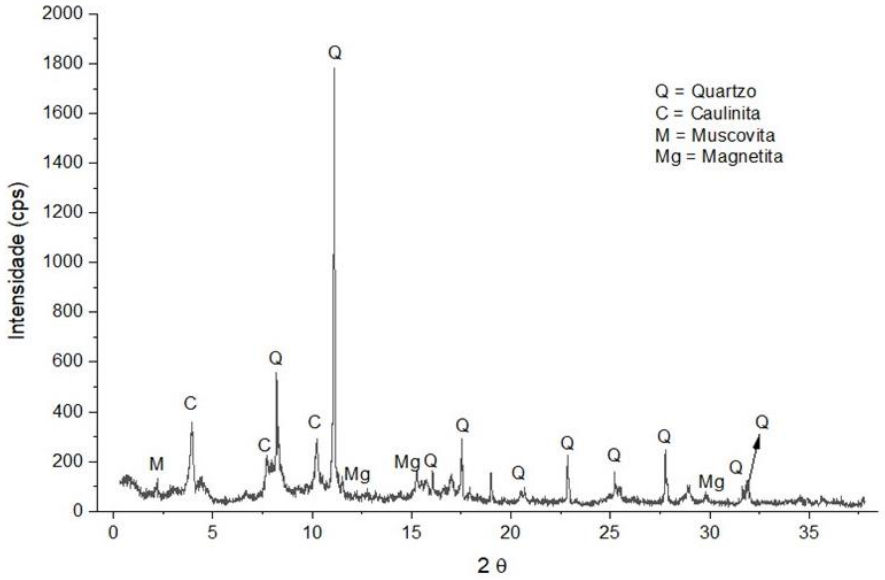
Onde F corresponde a Força; L corresponde ao Comprimento Útil; b corresponde a largura e h a espessura do corpo de prova. Para a análise estatística dos resultados de flexão, os ensaios foram conduzidos considerando cinco corpos de prova, cujos dados foram tratados de forma conjunta a fim de garantir representatividade e consistência nos parâmetros avaliados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Difração de Raio-X (DRX)

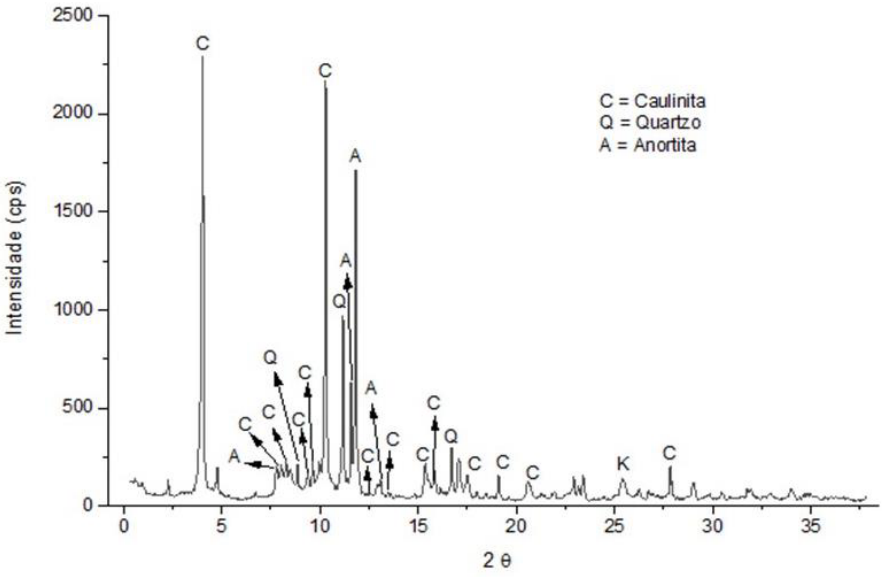
Os gráficos 14, 15 e 16 exibem respectivamente os resultados de DRX da argila terracota, da argila branca e do pó de balão respectivamente.

Figura 14 - DRX Argila Terracota



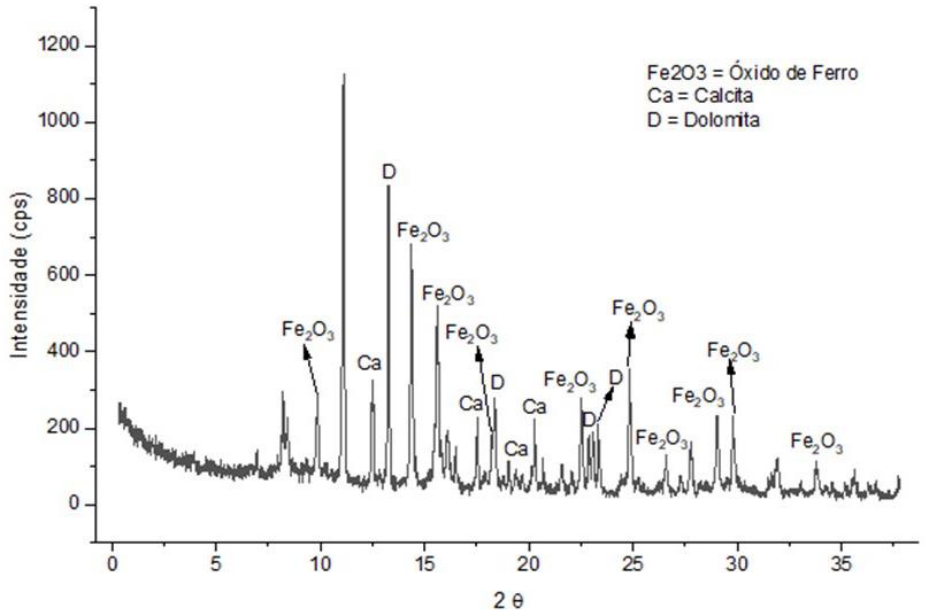
Fonte: Próprio Autor, 2026.

Figura 15 - DRX Argila Branca



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Figura 16 - DRX Pó de Balão



Fonte: Próprio Autor, 2026.

A técnica de DRX foi empregada para identificar as fases cristalinas presentes nos materiais de argila terracota , argila branca e pó de balão , como exibido nas figuras 14, 15 e 16. No difratograma da argila terracota observam-se picos característicos de quartzo (SiO_2)**,** moscovita $Kal_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$, caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e magnetita ($Fe_3O_4$), indicando uma composição típica de argilas silicoaluminosas com presença de minerais cauliníticos. A argila branca por sua vez (Figura 15) apresenta picos correspondentes caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), quartzo (SiO_2) e anortita ($CaAl_2Si_2O_8$). O pó de balão (Figura 16) apresentou picos característicos de óxido de ferro (Fe_2O_3), calcita ($CaCO_3$) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$).

Estudos conduzidos por Gu e Ling 2024 identificaram quartzo, caulinita, e pequenas quantidades de hematita como os principais constituintes de uma argila vermelha chinesa, resultado que está em concordância com os dados obtidos por difração de raios X (DRX) neste trabalho. A presença predominante de quartzo e caulinita influencia diretamente o comportamento da argila durante a queima, favorecendo os processos de vitrificação e a formação de fases ricas em hematita e magnetita em temperaturas próximas a 950 °C. Esses fenômenos contribuem para o desenvolvimento da coloração avermelhada característica dos produtos cerâmicos após a sinterização (GU; LING, 2024).

Os resultados apresentados por Morozov *et al*. 2018, mostram que a presença de calcita na argila não compromete o desempenho físico e mecânico dos materiais cerâmicos. Para que

esse mineral não cause efeitos indesejados durante o processamento e a queima, é importante que esteja bem disperso na matriz argilosa. Os autores também destacam que a calcita presente na composição inicial da argila não prejudica as propriedades dos produtos cerâmicos após a queima. Pelo contrário, sua presença contribui para uma coloração mais clara das peças (Morozov *et al*., 2018).

O quartzo presente nas amostras exerce papel relevante no desempenho tecnológico da argila cerâmica. Apesar de sua participação limitada na sinterização, esse mineral contribui para o aumento da porosidade e para a geração de microfissuras na matriz durante o resfriamento. Como consequência, maiores concentrações de quartzo estão associadas à redução do módulo de elasticidade (E) e à perda de resistência mecânica. Isso ocorre porque as tensões induzidas pelas transformações térmicas do quartzo provocam descontinuidades estruturais que podem comprometer a integridade do material cerâmico (Húlan *et al.,* 2025).

Além disso, o quartzo identificado nas matérias-primas atua como um esqueleto estrutural não plástico durante as etapas de conformação e secagem, limitando a retração linear das peças. Contudo, durante o ciclo térmico a 1100 °C, esta fase passa pela transformação polimórfica alfa; beta (e posterior reversão no resfriamento), um fenômeno acompanhado por variação volumétrica. Esse comportamento induz tensões térmicas residuais e a formação de microfissuras na matriz cerâmica, o que justifica a limitação no ganho de resistência mecânica em formulações com elevados teores de sílica livre (Carreiro *et al.,* 2016).

A presença de fases carbonáticas, como a calcita e a dolomita, introduzidas pelo Pó de Balão, desempenha um papel crítico na macroestrutura dos corpos de prova. A decomposição térmica desses minerais ocorre majoritariamente na faixa de 700 °C a 900 °C, resultando na liberação gasosa de dióxido de carbono (CO2). Esse fenômeno é o principal responsável pelo aumento expressivo da porosidade aparente e pela formação de bolhas e descontinuidades internas que culminaram nas falhas estruturais e fraturas observadas nas amostras com teores de resíduo superiores a 25% (Soares *et al*., 2014).

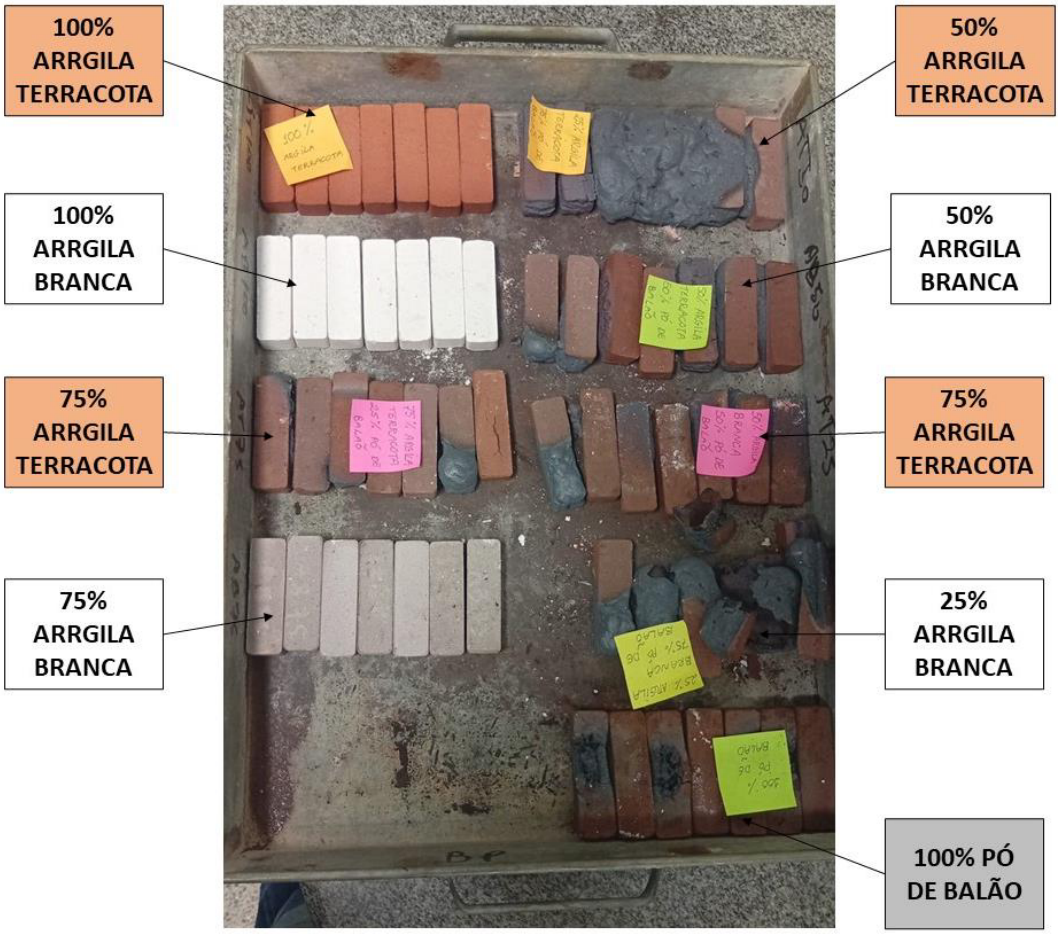
Quanto ao pó de balão, estudos indicam que a poeira proveniente de fornos a arco elétrico contém diferentes fases cristalinas, principalmente hematita e magnetita. A presença dessas fases pode originar pigmentos vermelhos (hematita) e pretos (magnetita), o que confirma a correspondência com as fases identificadas neste trabalho para o material em questão (Silva *et al*., 2019). Além disso, a presença de dolomita e calcita mostra concordância com estudos feitos por Das *et al*., 2025 que apontam que as poeiras de fornos a arco elétrico constituem uma mistura homogênea de fases cristalinas e amorfas. Entre essas fases, a hematita (Fe_2O_3) foi

identificada como a principal componente cristalina do material de alimentação, acompanhada por quartzo (SiO_2), calcita ($CaCO_3$), dolomita ($MgCO_3$) e silvita (KCl) (Das *et al*., 2025).

5.2 Sinterização dos corpos de prova

Após a prensagem uniaxial dos corpos de prova preparados com argila terracota e argila branca em diferentes proporções de pó de balão, foi realizada a etapa de sinterização. Observou-se que os corpos de prova contendo 25%, 50%, 75% e 100% de pó de balão apresentaram reação de colapso estrutural, evidenciando a dificuldade de estabilização da matriz cerâmica quando submetida a elevadas concentrações desse resíduo. Esse comportamento indica que a incorporação do pó de balão em teores elevados compromete a integridade física das amostras, limitando sua aplicação prática sem ajustes adicionais no processo de formulação ou sinterização. A Figura 17 exibe o resultado da sinterização dos corpos de prova

Figura 17 - Sinterização dos Corpos de Prova



Fonte: Próprio Autor, 2026.

A imagem 17 exibe a sinterização das amostras com 25% de substituição, 50% de substituição e 75% de substituição da argila por pó de balão, percebe-se um colapso nos corpos de prova. Esse comportamento pode ser atribuído a fenômenos descritos na literatura, relacionados à geração de gases durante o processo térmico. As principais fontes de gás em misturas cerâmicas de argila incluem a decomposição de carbonatos, as reações redox envolvendo óxidos de ferro, sulfatos e sulfetos, além das interações químicas entre a argila e os aditivos. Tais reações liberam gases como CO_2, SO_2, O_2 e outros, que, quando não dissipados adequadamente, podem provocar tensões internas e ruptura dos corpos de prova (Wons *et al*., 2020).

Esses resultados são corroborados pelas Análises de Fluorescência de Raios X (FRX) realizadas, que evidenciaram diferenças significativas na composição química das argilas e do pó de balão utilizados. A presença de alguns elementos como o Fe_2O_3 e o SO_3 explicam a maior suscetibilidade de determinadas formulações à geração de gases e, consequentemente, ao colapso estrutural durante a sinterização, como exibido pelos resultados de FRX na Tabela 4.

Tabela 5 - Resultados de FRX

Componente	Argila Branca	Argila Terracota	Pó de Balão
SiO_2	62.967 %	49,8%	9.732 %
Al_2O_3	31.198 %	28,3%	4.181 %
K_2O	2.279 %	4,1%	0.366 %
Fe_2O_3	1.753 %	14,6%	77.293 %
CaO	0.896 %		8.021 %
TiO_2	0.651 %	2,3%	
SO_3	0.187 %		
MnO	0.031 %	0,1%	0.368 %
Ga_2O_3	0.014 %		
Rb_2O	0.012 %		
SrO	0.012 %		0.039 %
MgO		0,4%	

Fonte: Próprio Autor, 2026.

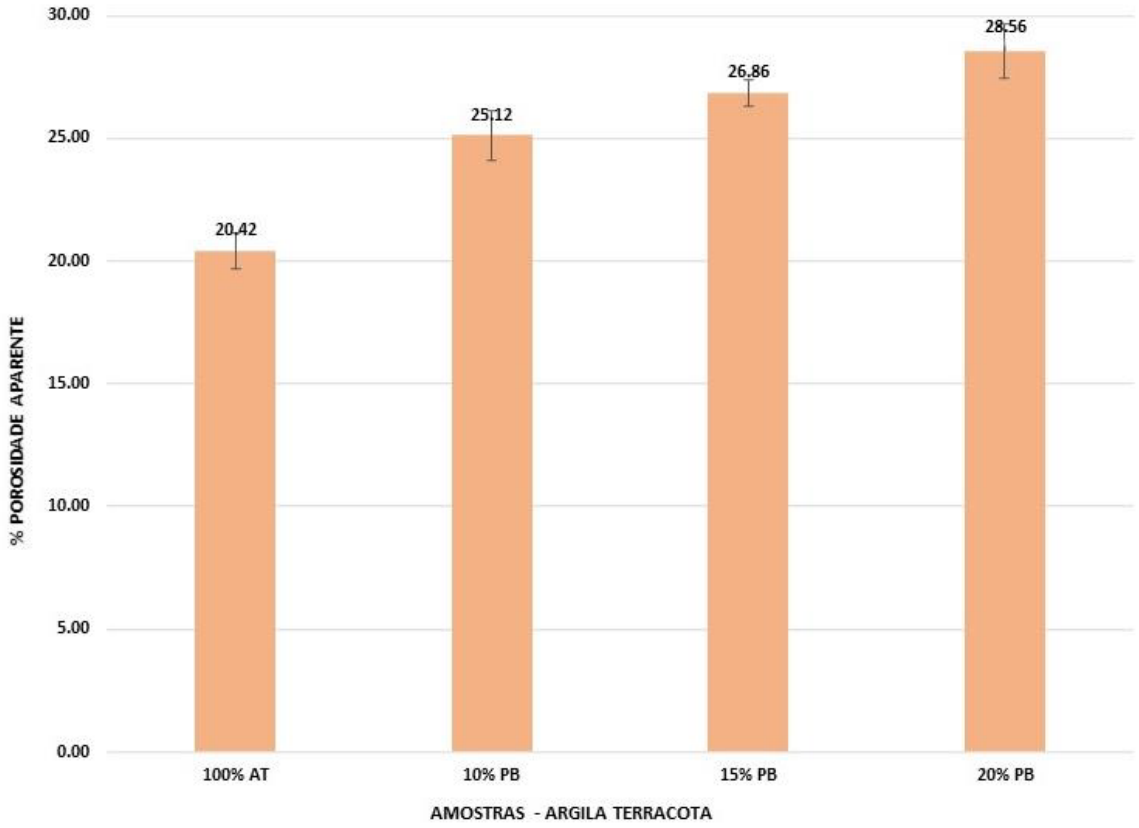
Somado à isso, a medida que a temperatura aumenta, ocorre o fechamento progressivo dos poros da matriz cerâmica, dificultando a difusão desses gases para o meio externo. Como consequência, formam-se bolhas internas que tendem a se expandir, gerando tensões estruturais e, em alguns casos, comprometendo a integridade do corpo cerâmico (Wons *et al*., 2020). A escória de alto-forno, assim como outros resíduos metalúrgicos de composição semelhante, apresenta elevada concentração de óxidos como SiO_2, Al_2O_3, CaO e Fe_2O_3, elementos esses que também podem atuar como fundentes. Estes materiais favorecem a formação de uma fase vítrea de baixo ponto de fusão (≈800–900 °C). Consequentemente, tais componentes irão atuar como agentes fluxantes, promovendo a sinterização em fase líquida a temperaturas relativamente inferiores às necessárias para a sinterização em fase sólida (Quijorna *et al*., 2014).

Portanto, isso poderia explicar o fato de que a estrutura sólida da argila não conseguiu se sustentar, colapsando e transformando-se na massa vítrea fundida e escura nas amostras que possuíam uma porcentagem de pó de balão igual ou superior a 50%. Considerando que parte dos corpos de prova referentes às proporções do estudo 1 foi perdida após o processo de sinterização, optou-se por utilizar, como referência comparativa, os corpos de prova produzidos sem adição de pó de balão (0%). Essa escolha assegura maior consistência na análise, uma vez que tais amostras permaneceram íntegras e permitem estabelecer parâmetros confiáveis para a avaliação dos demais resultados.

5.6 Resultados Porosidade aparente, densidade aparente e absorção de água

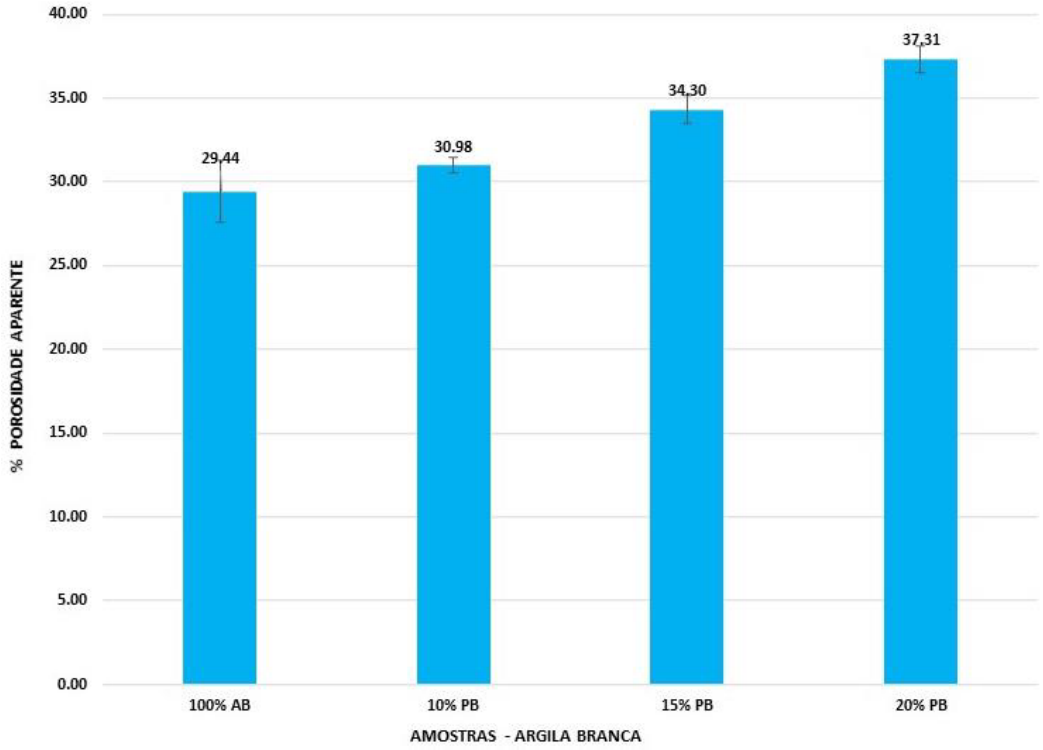
Os Resultados da Porosidade Aparente foram representados pelas Figuras 18 e 19. Observa-se que a adição do pó de balão às argilas terracota e branca promoveu um aumento significativo da porosidade aparente. Esse comportamento indica que o elemento atua como agente de abertura da matriz cerâmica, favorecendo a formação de espaços vazios. A introdução de materiais combustíveis ou reativos de granulometria fina na massa argilosa gera resíduos de porosidades após o tratamento térmico (aquecimento), promovendo o aumento do volume de poros e a consequente redução da densidade do corpo de prova (Matthew; Sanya; Mohammed, 2020).

Figura 18 - Porosidade Aparente das amostras de Argila Terracota



Fonte: Próprio Autor, 2026.

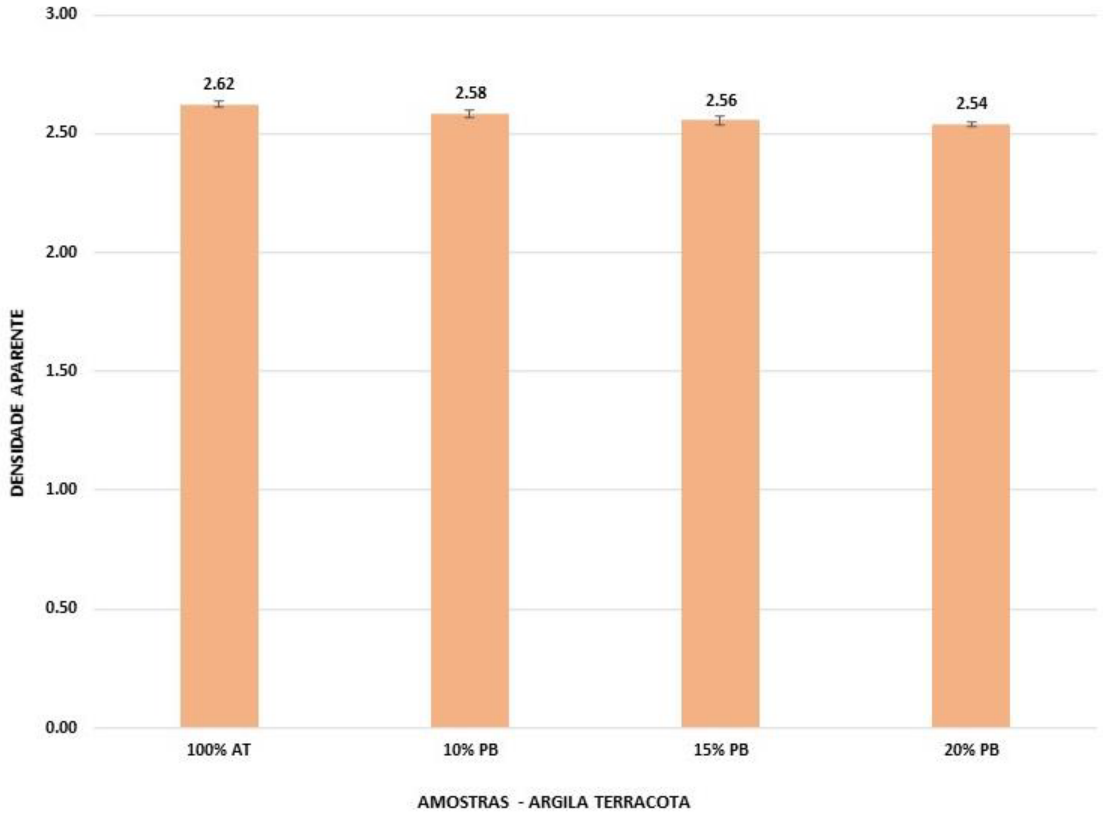
Figura 19 - Porosidade Aparente das amostras de Argila Branca



Fonte: Próprio Autor, 2026.

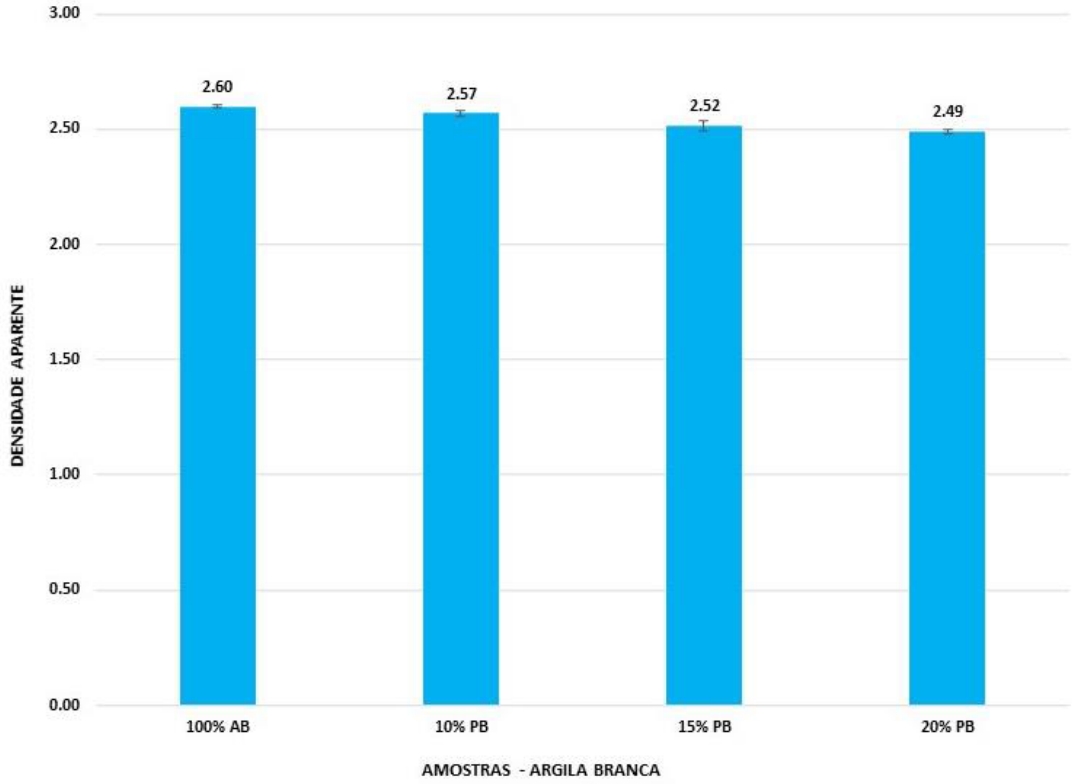
Os resultados do cálculo da densidade aparente, foram obtidos e plotados nos gráficos apresentados nas Figuras 20 e 21. Observa-se uma redução na densidade aparente, o que sugere que os corpos cerâmicos se tornam menos compactos e mais leves à medida que o teor de pó de balão é elevado. A introdução de materiais combustíveis ou reativos de granulometria fina na massa argilosa gera resíduos de porosidades após o tratamento térmico (aquecimento), promovendo o aumento do volume de poros e a consequente redução da densidade do corpo de prova (Matthew; Sanya; Mohammed, 2020). Assim como observado nos corpos de prova preparados com argila terracota, verificou-se também na argila branca uma tendência de redução da densidade aparente à medida que se aumentava o teor de pó de balão incorporado às massas cerâmicas evidenciado na Figura 21.

Figura 20 - Densidade Aparente das amostras de Argila Terracota



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Figura 21 - Densidade Aparente das amostras de Argila Branca

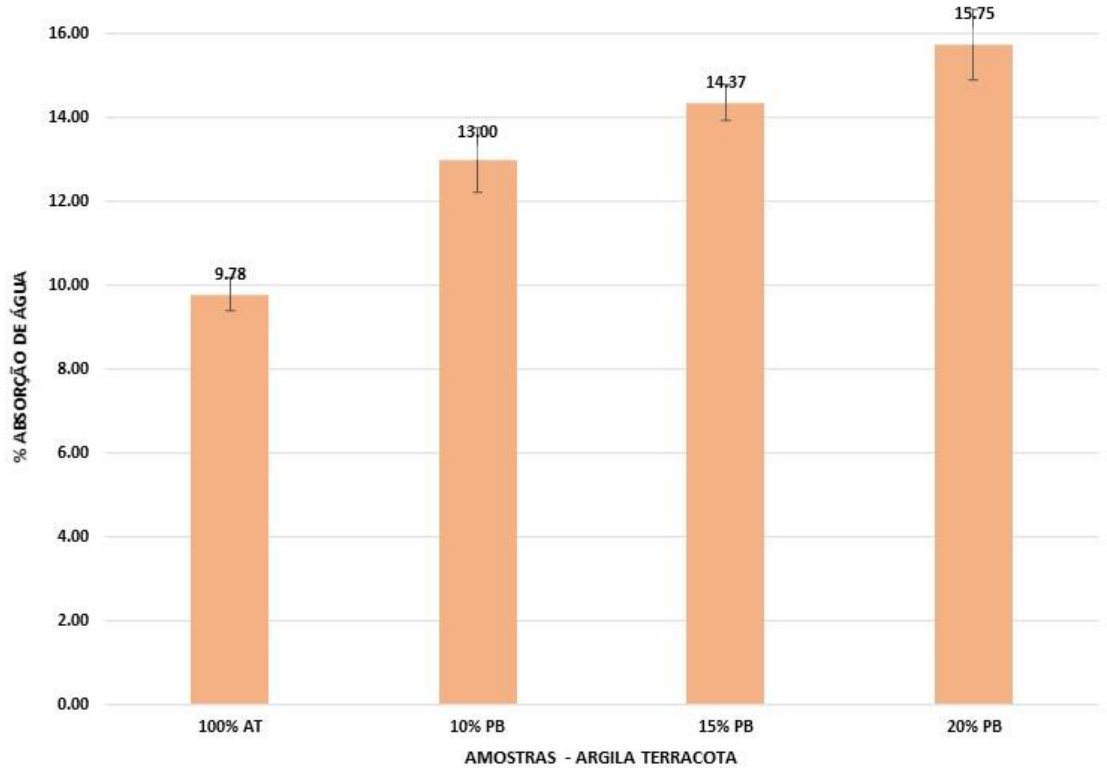


Fonte: Próprio Autor, 2026.

As Figuras 22 e 23 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água. Conforme observado nos gráficos, houve um aumento substancial nos níveis de absorção tanto nas amostras de argila terracota quanto nas de argila branca, à medida que se elevou o teor de pó de balão incorporado. Esse comportamento evidencia que a presença crescente do resíduo favorece a formação de maior porosidade e aumentando a capacidade de retenção de água.

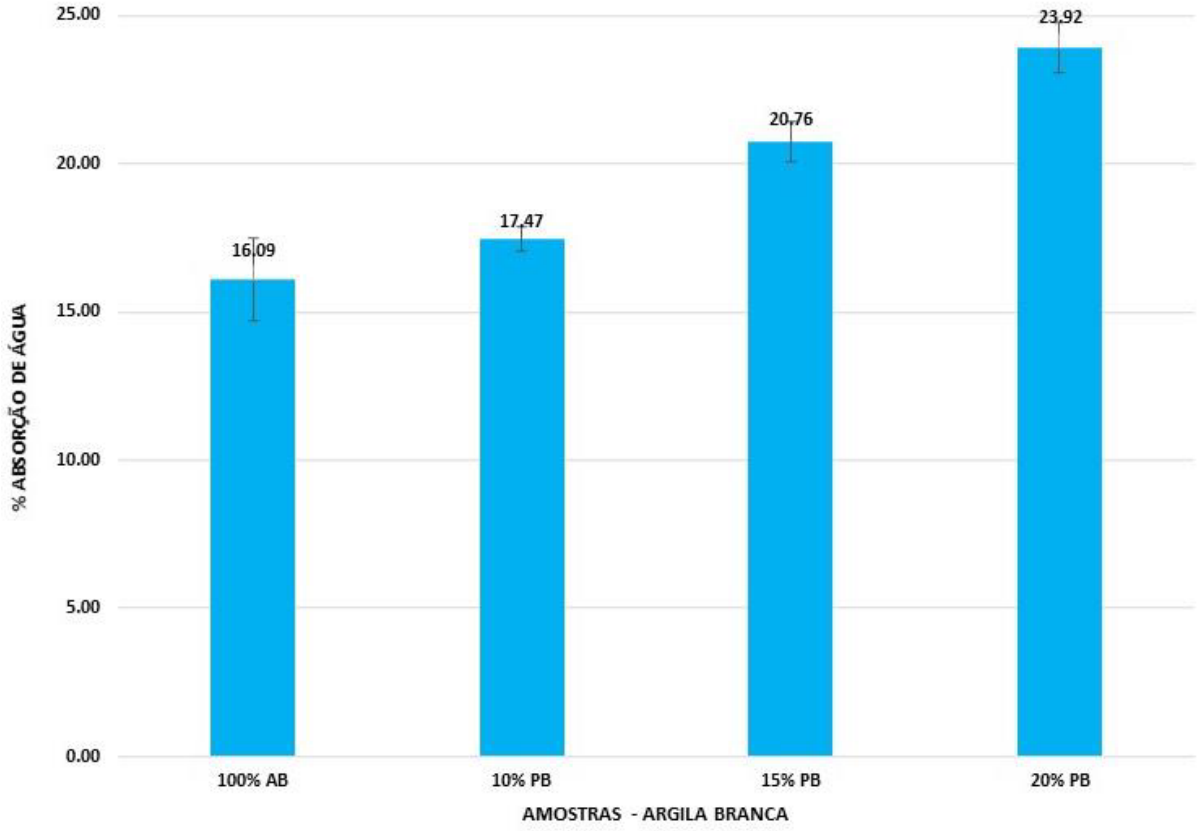
Tais fenômenos podem ser descritos ao observar que em tijolos e argamassas que incorporam pós advindos de alto-forno ou resíduos similares, ao se aumentar o teor de resíduos, o material tende a resultar em maior porosidade e absorção de água, bem como em menor densidade, especialmente em níveis elevados de substituição (Carvalho *et al.*, 2025).

Figura 22 - Absorção de Água das amostras de Argila Terracota



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Figura 23 - Absorção de Água das amostras de Argila Branca



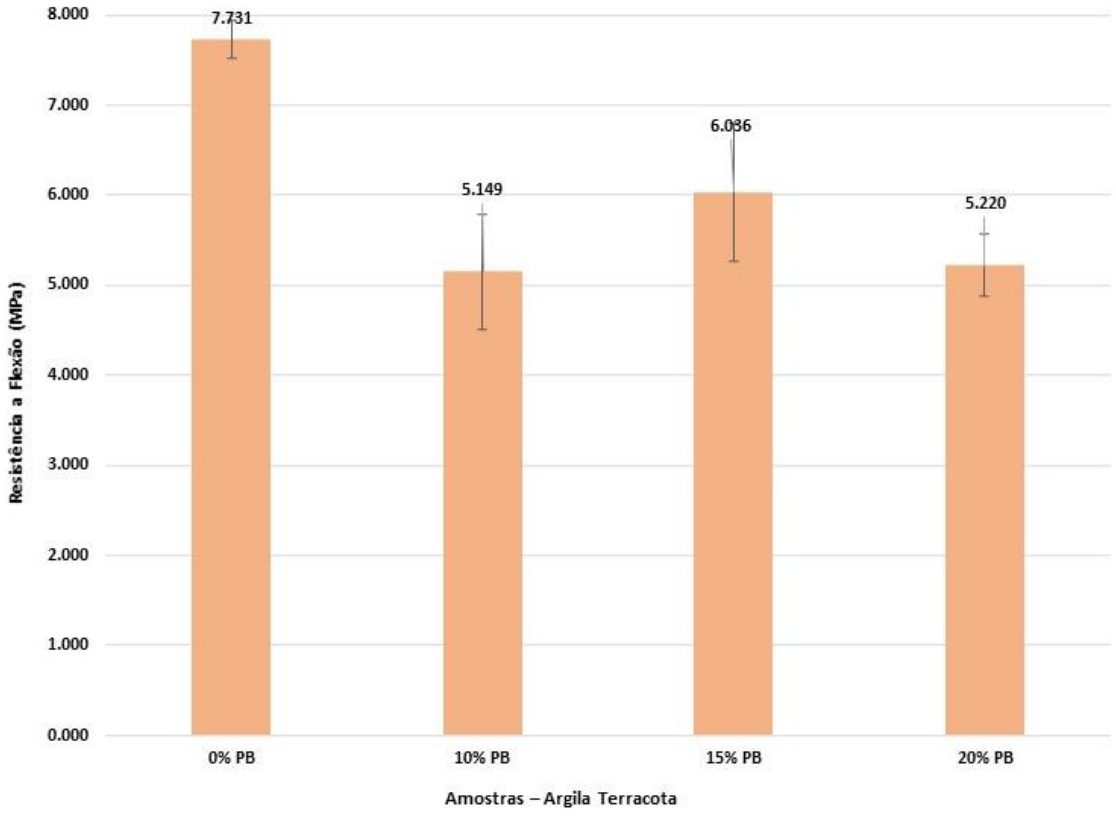
Fonte: Próprio Autor, 2026.

Os dados de FRX revelam que o Pó de Balão possui teores baixíssimos de alumínio (4,2 de Al2O3) e sílica (9,7%) em comparação com as argilas puras. A substituição gradual da argila pelo resíduo empobreceu a massa em minerais argilosos (caulinita), reduzindo a capacidade de empacotamento a verde. Quanto menor empacotamento mais liberação gasosa dos carbonatos (CaO e MgO no FRX/DRX) onde causaram o aumento da Porosidade Aparente. Como consequência geométrica direta, um maior volume de vazios resultou na queda da Densidade Aparente (peças mais leves) e abriu caminhos capilares para o aumento substancial da Absorção de Água.

5.7 Ensaio de Flexão

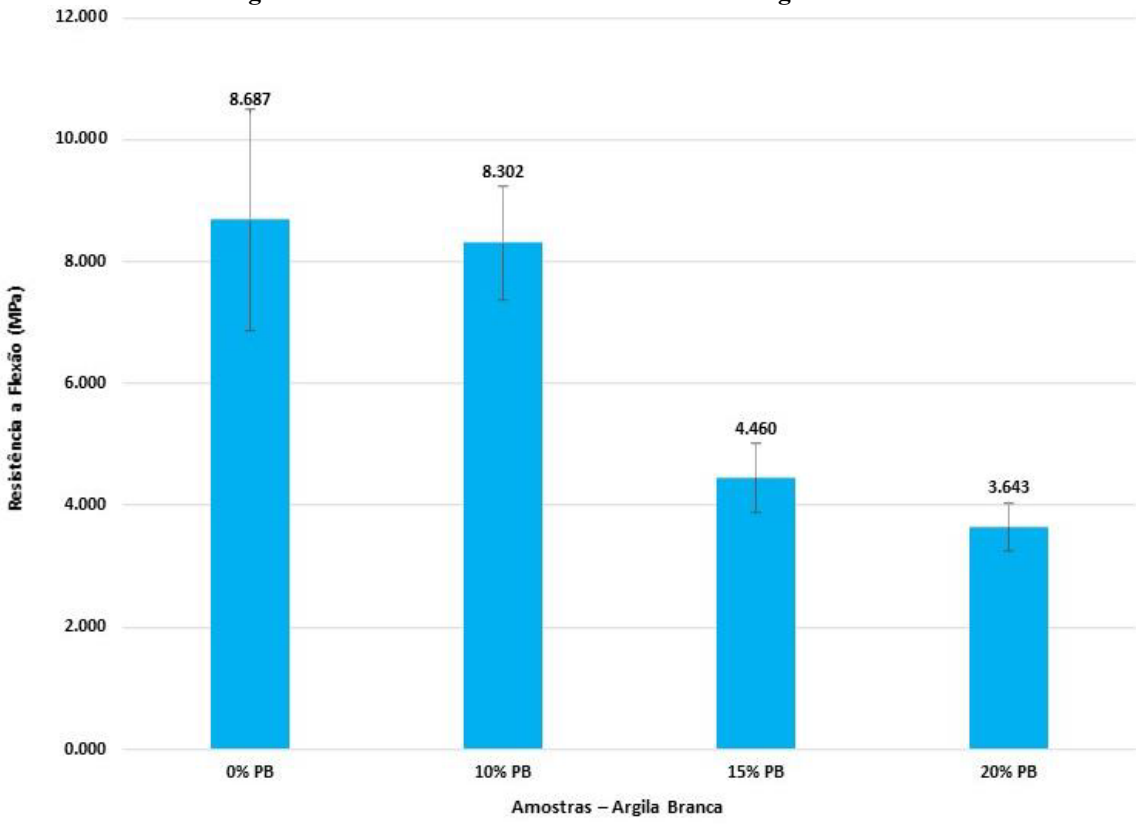
As Figuras 24 e 25 a seguir representam os ensaios de flexão realizados nas amostras. Observa-se que na Figura 24, a argila Terracota pura (0% AC) apresentou a maior resistência mecânica inicial do grupo, atingindo 7,7 MPa.

Figura 24 - Resultado do Ensaio de Flexão da Argila Terracota



Fonte: Próprio Autor, 2026.

Figura 25 - Resultado do Ensaio de Flexão da Argila Branca



Fonte: Próprio Autor, 2026.

A adição de 10% de Pó de Balão resultou em uma redução expressiva de aproximadamente 33,4%, com resistência média de 5,1 MPa. No corpo de prova com 15% de Pó de Balão, observou-se um comportamento atípico de recuperação parcial, visto que a resistência aumentou para 6,1 MPa. Contudo, essa formulação apresentou o maior desvio-padrão, sugerindo heterogeneidade na dispersão do resíduo na matriz cerâmica ou a presença de defeitos pontuais nos corpos de prova. Por fim, com 20% de Pó de Balão, a resistência voltou a decrescer, estabilizando-se em 5,2 MPa.

Em contrapartida, o comportamento da argila Branca, mostrado na Figura 25, revelou uma tendência decrescente mais linear e previsível com o aumento do teor de resíduo de Pó de Balão. O Corpo de prova de referência com 0% de Pó de Balão, apresentou o maior valor absoluto de resistência à flexão do estudo com 8,7 MPa. A adição de 10% de pó de balão provocou apenas uma redução discreta, mantendo-se por volta de 8,3 MPa e demonstrando maior estabilidade amostral, evidenciada pelo menor desvio-padrão. Entretanto, teores superiores de resíduo causaram uma degradação acentuada das propriedades mecânicas: a resistência caiu para 4,4 MPa com 15% de Pó de Balão e atingiu 3,6 MPa ao se adicionar 20% de Pó de Balão, correspondendo a uma perda superior a 58% em relação à matriz pura.

Componentes advindos da siderurgia como lamas de alto-forno, são constituídos predominantemente por óxidos de ferro, quartzo, calcita e coque, enquanto a argila apresenta composição silicoaluminosa, com predominância de minerais cauliníticos. Estudos indicam que a incorporação de 5% de lama de alto-forno promove aumento da resistência mecânica dos corpos de prova cerâmicos. Entretanto, para teores superiores a esse valor, observa-se um aumento significativo da absorção de água e da porosidade aparente, resultando na redução da resistência à flexão e à compressão das barras após a queima. Esse comportamento está associado, em parte, à composição química do rejeito, uma vez que seus óxidos permanecem praticamente inertes durante o processo de queima, enquanto o carbono presente na lama favorece a formação de poros na estrutura cerâmica.

Por outro lado, esse mesmo carbono pode ter contribuído para uma queima mais eficiente dos corpos de prova submetidos à temperatura máxima de 850 °C, atuando como fonte adicional de energia térmica. Além disso, a presença de ferro no rejeito favoreceu a coloração avermelhada observada nos espécimes, característica típica de produtos cerâmicos estruturais, como cerâmicas aplicadas a construção civil (telhas e blocos) (Dos reis A; Della sagrillo V; Diaz f, 2016).

Estudos também indicam que a lama de alto-forno é composta principalmente por óxidos de ferro e partículas finas de coque, apresentando granulometria adequada para aplicação na produção de cerâmica vermelha. A incorporação desse resíduo promove aumento da absorção de água, redução da resistência à flexão e maior retração linear das peças após a queima. Esses efeitos são atribuídos à sua composição mineralógica, uma vez que a hematita permanece praticamente inerte durante o processo térmico, enquanto os finos de coque contribuem para a formação de poros na matriz cerâmica, elevando sua porosidade e comprometendo suas propriedades mecânicas (Vieira *et al*., 2007).

A avaliação da resistência à flexão em três pontos sob a ótica da norma argentina IRA 11656 corrobora a delimitação do teor ótimo de resíduo incorporado. Enquanto a norma vizinha exige um módulo de ruptura à flexotração médio mínimo de 5,0 MPa para adoquins, as matrizes com 10% de Pó de Balão (8,3 MPa para a Argila Branca e 5,1 MPa para a Argila Terracota) cumprem integralmente o requisito de projeto.

Por outro lado, o efeito deletério do excesso de resíduo fica evidente nas amostras com 25% de substituição, cujas falhas microestruturais geradas pela descarbonatação e vitrificação precoce reduziram a resistência mecânica para patamares significativamente abaixo do exigido pela diretriz argentina, inviabilizando o uso de altas dosagens para pavimentação estrutura.

6 CONCLUSÕES

Os resultados indicam potencial para utilização do resíduo em formulações cerâmicas destinadas à produção de adoquins utilizando matrizes de argila Terracota e Branca. A partir das caracterizações químicas e mecânicas, foi possível compreender o comportamento do resíduo na matriz cerâmica e estabelecer limites práticos para a sua utilização.

As análises de processamento e sinterização revelaram que a adição do pó de balão em concentrações iguais ou superiores a 50% é inviável, uma vez que os corpos de prova apresentaram fraturas, colapso estrutural e formação de massa vítrea. Esse fenômeno decorre da geração de gases internos durante o aquecimento e da ação fundente de óxidos presentes no resíduo (como Fe_2O_3 e CaO), que promovem a vitrificação e a expansão de bolhas retidas na matriz. Ao readequar o estudo para proporções menores, variando de 10% a 20% de pó de balão, obteve-se sucesso na manutenção da integridade física das amostras após a sinterização.

Os ensaios físicos evidenciaram que o aumento do teor de pó de balão altera significativamente a estrutura das peças. O resíduo atua como um agente de abertura na matriz, gerando um aumento expressivo na porosidade aparente e na absorção de água, o que consequentemente reduz a densidade aparente dos corpos cerâmicos, tornando-os menos compactos.

No que tange às propriedades mecânicas, o ensaio de flexão confirmou que a adição do resíduo tende a degradar a resistência do material em concentrações mais elevadas. Para a argila Terracota, a matriz pura (0% de resíduo) obteve resistência de 7,7 MPa, apresentando quedas significativas e comportamentos de heterogeneidade ao se adicionar o pó de balão. Por outro lado, a argila Branca apresentou o resultado mais promissor da pesquisa: a formulação com 10% de pó de balão manteve uma resistência à flexão de 8,3 MPa, valor muito próximo ao da sua matriz pura (8,7 MPa) e com excelente estabilidade amostral. No entanto, proporções de 20% nesta mesma argila resultaram em uma perda de resistência superior a 58%.

Diante do exposto, observou-se que o reaproveitamento do pó de balão para a produção de adoquins cerâmicos é tecnicamente viável quando utilizado em baixas proporções, destacando-se a formulação de 90% de argila Branca e 10% de pó de balão como a composição ideal neste estudo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento da presente pesquisa e com vistas ao aprofundamento científico, ao refinamento tecnológico e à validação mercadológica dos adoquins cerâmicos produzidos com incorporação de Pó de Balão, sugerem-se algumas linhas de investigação. Primeiramente, recomenda-se a análise de diferentes temperaturas e ciclos de queima, avaliando o comportamento das formulações em patamares térmicos alternativos (1000 °C, 1050 °C e 1150 °C), com variação nas taxas de aquecimento e resfriamento, a fim de identificar o ponto de máxima eficiência da sinterização antes da ocorrência de superqueima e amolecimento piroplástico.

Propõe-se também a realização de ensaios físico-mecânicos complementares de pavimentação, submetendo as formulações aprovadas — especialmente aquelas com 10% de Pó de Balão e Argila Branca — a testes normativos de pavimentação intertravada, como resistência à compressão simples, resistência ao impacto, módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de atrito.

Adicionalmente, recomenda-se a execução de ensaios de durabilidade e desempenho ambiental, incluindo desgaste por abrasão, resistência ao ataque químico, ciclos de gelo-degelo e eflorescência, de modo a assegurar que os adoquins mantenham desempenho estético e estrutural frente às intempéries e à presença de óxidos solúveis. Por fim, destaca-se a importância da análise de lixiviação e solubilização, conforme as normas NBR 10005 e NBR 10006, para classificar o resíduo final consolidado e garantir que o produto seja enquadrado como não perigoso (Classe II), requisito essencial para sua futura comercialização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, E. **Manual de Pavimento Intertravado**. Disponível em: <https://abcp.org.br/manual-de-pavimento-intertravado/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ABNT NBR 9781:2013. **Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação e Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

Adoquines Jardín Vermelho Vulcânico. Disponível em: <https://www.valegandara.com/inicio/index.php/es/produtos-es/paver-jardimes/pvjardim-vv-es>. Acesso em: 1 jun. 2025.

Adoquines - La Paloma Cerámicas. Disponível em: <https://ceramicalapaloma.com/adoquines>. Acesso em: 8 jun. 2025.

ALMEIDA, K. S. DE.; SOARES, R. A L.; MATOS, J. M. E. DE.; SOUSA, C.DE.; ALMEIDA M.; ALMEIDA, J. S DE. **Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico**. Cerâmica industrial, v. 25, n. esp, 2020.

ANDRADE, I. C. DE M.; MAGALHÃES, S. R. **Aproveitamento do pó de balão para fabricação de tijolos e cerâmicas vermelhas na construção civil**. Interação - Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 20, n. 2, p. 5–17, 8 mar. 2019.

ARAÚJO, José A de. **Reciclagem de pó de forno elétrico a arco para a produção de Aglomerado Pré-Fundido (APF) para uso em processo siderúrgico**. 2014. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. DOI:10.11606/T.18.2014.tde-01092014-093447. Acesso em: 26 fev.2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C373-88 (Reapproved 2006): Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products**. West Conshohocken, PA, 2006.

AUGUSTO, A. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais**. 1 jan. 2009.

BENÍTEZ, Alejandra; BERTONE, Juan; CIVITILLO, Pablo. **Implementación del ensayo a flexión de adoquines de hormigón**. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE HORMIGÓN, 9., 2009, Buenos Aires. Buenos Aires: Asociación Argentina del Bloque de Hormigón, 2009. p. 1-10.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BONACINA, C. N.; ROMANO, M.C.; COLBERTALDO, P.; MILOCO, A.;, VALENTI, G. **Techno-economic study of chimneyless electric arc furnace plants for the coproduction of steel and of electricity, hydrogen, or methanol**. Journal of cleaner production, v. 468, n. 143048, p. 143048, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143048. Acesso em: 04 mar.2026.

BOYI, JOHN MALLAM. **An exploration of clay as a medium of expression: the role of terracotta in ancient nok art and culture.** International Journal of Social Science Research and Anthropology, 28 fev. 2025. DOI: 10.70382/tijssra.v07i6.026. Acesso em: 06 jun.2026.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANDIDO V.S.; PINHEIRO R.M.; MONTEIRO S.N.; VIEIRA C.M.F. **Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas cauliníticas, chamote e argilito**. Ceramica, v. 59, n. 350, p. 310–316, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000200017. Acesso em: 03 abr.2026.

CAJAMARCA-ZUNIGA, D.; CAMPOS, D. **Definition of the most commonly used ceramic brick for construction in Ecuador: Type and dimensions**. Materials Today: Proceedings, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.06.299. Acesso em: 02 jun. 2026.

CARREIRO, M. E. A.; SANTOS, R. C.; SILVA, V. J.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L. **Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural**. Cerâmica, v. 62, n. 362, p. 170-178, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0366-69132016623621990. Acesso em: 24 jun. 2026.

CARVALHO, M.S.; ARRUDA, V. L DE.; SIMONI, L .; OLIVEIRA, F. F DE.; FLEMING, R**. Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Coating Mortar with Partial Replacement of Sand by Blast Furnace Flue Dust**. Cerâmica, v. 71, eNLNW3014, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/NLNW3014.

CHRISTOFOLETTI, S. R.; MORENO, M. M. T. **Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP**. Ceramica, v. 63, n. 367, p. 303–310, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672096. Acesso em: 04 mai. 2026.

DAS, S.K.; SINGHAI, M.; BARISETTY, S.; JASON, K.; UMADEVI, T.; SOREN, N.; HAZRA, S.. **Characterization and flotation potential of carbonaceous particles in blast furnace dust: Insights and applications**. Process Safety and Environmental Protection, v. 195, p. 106727, mar. 2025. DOI: 10.1016/j.psep.2024.12.108. Acesso em: 22 mai. 2026.

Disponível em: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-materialscharacterization>. Acesso em: 1 jun. 2025.

DOS REIS A, S.; DELLA SAGRILLO V, P.; DIAZ F, R. V. **Analysis of the Spheres and Bars Molded with Blast Furnace Sludge Incorporation in Clayey Mass**. Research & Reviews: Journal of Material Sciences, v. 04, n. 03, 2016. DOI: https://doi.org/10.4172/2321-6212.1000150. Acesso em: 03 amr. 2026.

ELIE KAMSEU et al. **Characterisation of porcelain compositions using two china clays from Cameroon**. v. 33, n. 5, p. 851–857, 1 jul. 2007. DAS, S.K.; SINGHAI, M.; BARISETTY, S.; JASON, K.; UMADEVI, T.; SOREN, N.; HAZRA, S. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.01.025. Acesso em: 01 jun. 2026.

FERNANDEZ, C.F.; TEN, J.G.; LOMBARDERO, M.; SANCHES, E.**. Materias primas para pavimentos y revestimientos cerámicos en la región de Murcia**. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, v. 40, n. 5, p. 345-354, 30 out. 2001. DOI: 10.3989/cyv.2001.v40.i5.1057. Acesso em: 12 abr. 2026.

FERREIRA, E. P.; REIS, A. S DOS.; DELAQUA, G.C.G.; AZEVEDO, A. R. G DE.; VIEIRA, C, M, F. **Diagnóstico da indústria de cerâmica vermelha de São Roque do Canaã, ES**. Cerâmica industrial, v. 28, n. 1, p. e132801, 2023. DOI: https://doi.org/10.4322/cerind.2023.022. Acesso em: 05 mai. 2026.

FERREIRA, R. G.; AMARAL, I. B.C.; VIEIRA, F. T.; REIS, A. **Sinterização de materiais cerâmicos compostos:mistura com biopolímero e pó de lapidário do vale do mucuri-mg**. Revista Tecnológica, v. 27, n. 1, p. 95–103, 2019. DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.45237. Acesso em: 10 fev. 2026.

GOES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. C. **Amostragem.** Tratamento de Minérios, v. 5, p.23-56, 2010.

GOMEZ, R. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; PORTO, T. R. N.; LIMA, E. S DE.; SANTANA, R. A. C DE.; GOMES, K. C.; LIMA, W. M. P. B DE. **Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão**. Research, Society and Development, v. 9, n. 11, p. e78591110300, 2020.

GU, X.; LING, Y. **Characterization and properties of Chinese red clay for use as ceramic and construction materials**. Science Progress, v. 107, n. 1, 1 jan. 2024. DOI: 10.1177/00368504241232534. Acesso em: 14 abr. 2026.

HÚLAN, T.; KNAPEK, M.; KUŠNÍR, J.; STUBNA. I. **The effect of quartz content and particle size on microcracking and Young's modulus of illite-based ceramics**. Ceramics International, v. 51, n. 25, p. 43915–43923, 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.07.122. Acesso em: 15 mar. 2026.

KUMARI, N.; MOHAN, C. **Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties**. In: NASCIMENTO, Gustavo Morari Do (Ed.). Clay and Clay Minerals. London: IntechOpen, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5772/intechopen.97672. Acesso em: 24 abr. 2026.

LIN, X.; PENG, Z.; YAN, J.; LI, Z.; HWANG, J.; ZHANG, Y.; LI, G.; JIANG, T. **Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust**. Journal of Cleaner Production, v. 149, p. 1079-1100, abr. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.128. Acesso em: 12 mai. 2026.

LOVE, S. **Architecture as material culture: Building form and materiality in the PrePottery Neolithic of Anatolia and Levant**. Journal of Anthropological Archaeology, v. 32, n. 4, p. 746–758, dez. 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaa.2013.05.002. Acesso em: 02 jun. 2026.

DAN, M. B. **Materials, technologies and practice in historic heritage structures**. [s.l.] Springer, 2014. p.29–48., 2010.

MATTHEW, G. O.; SANYA, O. T.; MOHAMMED, N. B.; **Influence of Pore Nature on the Thermal Conductivity of Insulating Refractory Brick**. Chemistry and Materials Research, v. 12, n. 7, 2020. DOI: 10.7176/CMR/12-7-03. Acesso em: 04 fev. 2026.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; DRUMOND, P.H.C.; AZEVEDO, A.R.G DE. **Efeito da densidade aparente nas propriedades físicas e mecânicas de peças cerâmicas contendo rejeito de minério de ferro**. ABM Proceedings. Anais...São Paulo: Editora Blucher, 2019. DOI: 10.5151/2594-5327-33245. Acesso em: 10 fev. 2026.

MENEGON, J. DE O.; ROSSO, L. S.; DEMARCH, A.; VIEIRA, A. W.; ANGIOLETTO, E. **Estudo de variáveis do ensaio de absorção de água em porcelanatos pelo método a vácuo**. Cerâmica industrial, v. 29, p. e0629, 2024. Acesso em: 05 mai. 2026.

MIAGUSUKU, M. D. **DRX: Entenda a relação dos Raios X com os materiais!** Afinko, 5 mar. 2020. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/drx-relacaoraios-x-materiais/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MOLINARI, C.; ALAYA, Y.; PASTI, L.; GUARINI, G.; DONDI, M.; ZANELLI, C. **Assessing white clays from Tabarka (Tunisia) in the production of porcelain stoneware tiles**. Applied Clay Science, v. 231, p. 106741, 3 jan. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106741. Acesso em: 13 abr. 2026

MORRELL, R. ***Flexural strength testing of ceramics and hardmetals*. Teddington: National Physical Laboratory**, 1997. (Measurement Good Practice Guide, n. 7).

MOSTAFA, N. Y.; SHALTOUT, A. A.; ABDEL-AAL, M.S.; EL-MARGHRABY, A. **Sintering mechanism of blast furnace slag–kaolin ceramics**. Materials & Design, v. 31, n. 8, p. 3677–3682, 1 set. 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.001. Acesso em: 15 mar. 2026.

MUÑOZ, P.; Letelier V.; MUÑOZ, L.; GENCEL, O.; SUTCU, M.; VASIC M. **Assessing technological properties and environmental impact of fired bricks made by partially adding bottom ash from an industrial approach**. Construction and Building Materials, v. 396, p. 132338, 8 set. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132338. Acesso em: 12 mai. 2026.

MURRAY, Haydn H. Overview — clay mineral applications. Applied Clay Science, v. 5, n. 5-6, p. 379-395, 1991.

MURMU, A. L.; PATEL, A. **Towards sustainable bricks production: An overview**. Construction and Building Materials, v. 165, p. 112–125, mar. 2018.

PHILIPPE, J. **Potencial uso de pó de balão em briquetes e bloquetes para a siderurgia**. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 21, p. e2803– e2803, 1 jan. 2024. DOI: dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20242803. Acesso em: 04 mar. 2026.

QUIJORNA, N.; PEDRO, M DE.; ROMERO. M.; ANDRÉS, A. **Characterisation of the sintering behaviour of Waelz slag from electric arc furnace (EAF) dust recycling for use in the clay ceramics industry**. Journal of Environmental Management, v. 132, p. 278–286, jan. 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.012. Acesso em: 15 mar. 2026.

ROCHA, I. **Tijolo por Tijolo: Construindo Alvenarias no Vale do Paraíba do Sul**. PHD Thesis. Graduate Program in Architecture, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, A. G. P., ALVES JUNIOR, C. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e sinterizadas por fluxo viscoso**. Cerâmica, v.44, n.290, nov./dez. 1998. https://doi.org/10.1590/S0366-69131998000600004. Acesso em: 04 mai. 2026

SILVA, V. S.; SILVA, J.S.; COSTA, B.DOS S.; LABES, C.; OLIVEIRA, R. M. P .B. **Preparation of glaze using electric-arc furnace dust as raw material**. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 6, p. 5504–5514, 3 out. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.018. Acesso em: 10 abr. 2026

TAVARES, C. **Compressão: Saiba mais sobre este Ensaio**. **Afinko**, 18 jan. 2024a. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/compressao-saiba-mais-sobre-esteensaio/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

TAVARES, C. **O que é o ensaio de FRX? Afinko**, 15 fev. 2024. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-frx/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

TOKAREVA, A.; KAASSAMANI, S.; WALDMANN, D. **Using ceramic demolition wastes for CO2-reduced cement production**. Construction and Building Materials, v. 426, p.

135980, maio 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135980. Acesso em: 10 abr. 2026

Portal Sebrae - Sebrae. **Como montar uma fábrica de tijolos ecológicos**. Disponível em: <https://sebrae.com.br>.

PHILIPPE, J. **Potencial uso de pó de balão em briquetes e bloquetes para a siderurgia**. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 21, p. e2803–e2803, 1 jan. 2024.

SMALTED. **What is White Clay | Definition and Meaning in Pottery | Smalted**. Disponível em: <https://www.smalted.com/en/glossary/White%2520Clay>. Acesso em: 24 abr. 2026.

SUMAN, S. N.; ANWAR, R.; AWANG, N. N.; AYOB, S. **Composition of Various Percentages of Terracotta Clay as Colourant Glaze.** Environment-Behaviour Proceedings Journal, v. 8, n. SI16, p. 99–104, 25 nov. 2023. DOI: 10.21834/e-bpj.v8iSI16.5228. Acesso em: 15 abr. 2026.

SOARES, R. A. L.; NASCIMENTO, R. M. do; PASKOCIMAS, C. A.; CASTRO, R. J. S. **Efeito da adição de calcita oriunda de jazida de argila em massa de cerâmica de revestimento**. Cerâmica Industrial, v. 19, n. 3, p. 27-32, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.076. Acesso em: 24 jun. 2026.

VIEIRA, C. M. F, DIAS, C.A.C.M.; MOTHÉ, A.V.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N. et al. **Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. Cerâmica, v. 53, n. 328, p. 381–387, dez. 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132007000400008. Acesso em: 11 abr. 2026

WEIMER, Gunter. Arquitetura popular brasileira. São Paulo: Martins Fontes, 2005.

WONS, W.; RZEPA, K.; REBEN, M.; MURZYN P. **Thermal studies of fly ashes expansion. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 143, n. 4, p. 2883–2891, 2021. DOI: 10.1007/s10973-020-09566-2. Acesso em: 20 mar. 2026.