

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

GRASIELE AMORISO BENEDET

**CARACTERIZAÇÃO MINERAL E PROCESSAMENTO
TECNOLÓGICO PARA PRODUÇÃO DE CERÂMICA
ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA DO ARRANJO
PRODUTIVO LOCAL DE MORRO DA FUMAÇA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira

Co-orientador: Dr. Alexandre Zaccaron

**CRICIÚMA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B462c Benedet, Grasielle Amoriso.

Caracterização mineral e processamento tecnológico para produção de cerâmica estrutural de coloração branca do arranjo produtivo local de Morro da Fumaça / Grasielle Amoriso Benedet. - 2025.

100 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2025.

Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

Coorientação: Alexandre Zaccaron.

1. Cerâmica - Indústria. 2. Cerâmica vermelha - Tratamento térmico. 3. Colorimetria. 4. Telhas. 5. Tijolos. 6. Indicação de procedência. I. Título.

CDD 23. ed. 620.14

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Grasiele Amoriso Benedet

Caracterização mineral e processamento tecnológico para produção de cerâmica estrutural de coloração branca do Arranjo Produtivo Local de Morro da Fumaça

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

Criciúma, 28 de fevereiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MICHAEL PETERSON**
Data: 07/03/2025 14:28:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Michael Peterson
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO DAL BÓ**
Data: 28/02/2025 17:10:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Dal Bó
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Assinado por: **Manuel Joaquim Pelxoto Marques Ribeiro**
Num. de Identificação: 05403140
Data: 2025.02.28 13:51:36+00'00'

Prof. Dr. Manuel Joaquim Ribeiro
Instituto Politécnico de Viana do Castelo - IPVC

Dedico esta obra a todas as pessoas que, de alguma maneira, caminharam ao meu lado, tornando cada momento mais significativo e cada passo mais valioso nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que sempre me incentivou a buscar meus sonhos, em especial a meu filho Vinicius e meu esposo Marciel, também os amigos e familiares que se fizeram presentes nos momentos mais difíceis da jornada, não deixando de incentivar na busca do que parecia tão distante.

Também agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), por todo conhecimento compartilhado durante os dois anos de jornada, em especial ao meu orientador Fabiano Raupp-Pereira, suas contribuições valiosas moldaram não apenas este trabalho, mas também meu desenvolvimento pessoal e profissional. Estendo o agradecimento ao meu coorientador Alexandre Zaccaron, por sua orientação e apoio fundamentais durante essa trajetória, sua expertise e disponibilidade para compartilhar conhecimento revelaram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer a Cooperativa de Extração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI) pela disponibilidade das matérias primas e todo suporte dos seus técnicos, também as cerâmicas CS Silva, Cegaza e Guarezi pela colaboração, pelo compartilhamento de experiências e pela estrutura disponibilizada para a realização das queimas industriais.

Minha gratidão também se estende ao Grupo de Pesquisa Valor_{EC} por toda ajuda e parceria e ao Grupo de Materiais Cerâmicos (GMC) pela disponibilidade do laboratório. Ao Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) meu muito obrigado pela valiosa assistência prestada, que contribuiu significativamente para este trabalho.

E por fim, agradeço ao CNPq pela oportunidade dada para que eu pudesse realizar essa etapa (processo n° 381504/2023-9).

“A cor é um poder que influencia diretamente a alma.”

Aristóteles.

RESUMO

As telhas e tijolos brancos/mesclados fazem parte da produção de cerâmica vermelha do sul de Santa Catarina, se diferenciando pelas matérias primas com baixo teor de Fe_2O_3 e técnicas de tratamentos térmicos mais artesanais com atmosfera redutora e ciclos mais lentos. Esse estudo visa explicar de forma científica as experiências práticas transmitidas nas indústrias de forma empírica. Por isso, o objetivo do trabalho foi caracterizar o desenvolvimento de produtos cerâmicos de coloração branca do APL-CVMF com o intuito de estabelecer uma indicação geográfica produtiva com base nas características minerais e de processamento tecnológico utilizados na região. O processo metodológico consistiu em duas etapas, onde inicialmente foi realizado o diagnóstico colorimétrico de dez massas utilizadas para a fabricação de telhas e tijolos brancos/mesclados da região. Com base nos parâmetros químicos e térmicos que influenciam a propriedade de cor, desenvolveu-se o perfil das massas cerâmicas. A segunda etapa, promoveu o estudo de sete diferentes argilas da região, escolhidas pelo teor de ferro ($<3\%$) e perfil geológico (cavas alagadas). As argilas selecionadas foram caracterizadas quanto as suas propriedades química, mineralógica, física e de colorimetria para potencializar fontes minerais da região, para o uso em fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca. Os resultados do diagnóstico comprovam que as massas da região do APL-CVMF têm em suas formulações argilas com baixo teor de ferro, tendo valores muito próximos a 3% . A análise colorimétrica atribuiu valores de luminosidade próximos a 80 e cromaticidade a^* e b^* variaram entre 5 a 7 e 20 a 25 respectivamente, demonstrando que as massas estudadas tem uma padronização de cor voltada para coloração clara. A caracterização das fontes minerais confirma que apenas as matérias primas com teores próximos de 3% tiveram a coloração mais clara após a queima em atmosfera redutora, com valores de luminosidade entre 75 e 86 e cromaticidade a^* e b^* variaram entre 12 a 15 e 7 a 29 respectivamente. As amostras A0 e A8 ainda se mostraram semelhante a coloração do diagnóstico da primeira etapa como comprovado pelo ΔE^* ficando com valor ~ 10 . Por fim, o estudo fornece contribuições científicas para a valorização desse produto no mercado, contribuindo para a possível obtenção de uma indicação geográfica e fortalecimento da identidade da cerâmica estrutural de coloração branca.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha de cor clara, colorimetria, telhas e tijolos brancos/mesclados, atmosfera redutora.

ABSTRACT

The white/mixed roof tiles and bricks are part of the clay ceramic production in southern Santa Catarina, distinguished by raw materials with low Fe_2O_3 content and more artisanal thermal treatment techniques with a reducing atmosphere and slower cycles. This study aims to scientifically explain the practical experiences passed on empirically in the industries. Therefore, the proposal of the work was to characterize the development of white-colored ceramic products from the APL-CVMF with the intention of establishing a productive geographical indication based on the mineral and technological processing characteristics used in the region. The methodological process consisted of two stages. Initially, a colorimetric diagnosis was carried out on ten paste used in the production of white/mixed roof tiles and bricks from the region. Based on the chemical and thermal parameters that influence color properties, the ceramic mass profile was developed. The second stage involved the study of seven different clays from the region, selected for their iron content ($<3\%$) and geological profile (floodplain). The selected clays were characterized for their chemical, mineralogical, physical, and colorimetric properties to enhance mineral sources from the region for use in the production of white-colored structural ceramics. The diagnosis results confirm that the pastes from the APL-CVMF region have clays with low iron content in their formulations, with values very close to 3%. The colorimetric analysis showed luminosity values close to 80, with chromaticity a^* and b^* varying between 5 to 7 and 20 to 25, respectively, demonstrating that the studied pastes have a color standard geared toward light coloration. The characterization of the mineral sources confirms that only raw materials with iron contents close to 3% achieved a lighter color after firing in a reducing atmosphere, with luminosity values ranging from 75 to 86, and chromaticity a^* and b^* varying between 12 to 15 and 7 to 29, respectively. Samples A0 and A8 were still similar in color to the diagnosis from the first stage, as evidenced by the ΔE^* value of approximately 10. Finally, the study provides scientific support for the valorization of this product in the market, contributing to the potential acquisition of a geographical indication and strengthening the identity of white-colored structural ceramics.

Keywords: Clay ceramic por Light-colored clay ceramics, colorimetry, white/mixed roof tiles and bricks, reducing atmosphere.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da localização geográfica do Arranjo Produtivo Local (APL) de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça.	33
Figura 2 – Representação do tetraedro da ciência dos materiais aplicado como indicador de correlação entre características de composição e processamento de cerâmica estrutural de coloração branca.	34
Figura 3 – Imagens de peças de cor branca e mesclada do APL-CVMF.	35
Figura 4 – Ilustração representativa da comparação da reflexão e absorção de calor entre os telhados escuros e brancos.	36
Figura 5 – Representação das etapas características do processo de fabricação de cerâmica vermelha, destacando as etapas de extração de matéria prima e tratamento térmico.	39
Figura 6 – Representação da relação de fatores para formação da cor, envolvendo fonte de luz, objeto e mecanismo de captação.	43
Figura 7 – Demonstrativo da transformação do ferro em função da temperatura e atmosfera na etapa de queima.	44
Figura 8 - Representação do sistema CIELab utilizando a luminosidade (L^*) e a cromacidade (a^* e b^*) para medição da cor.	46
Figura 9 - Localização das indústrias de cerâmica estrutural de cor branca dentro do APL-CVMF.	47
Figura 10 – Fluxograma da Etapa I descrevendo as atividades realizadas para o diagnóstico da cerâmica estrutural de coloração branca.	48
Figura 11 – Imagens fotográficas das massas cerâmicas selecionadas para o diagnóstico cerâmico.	49
Figura 12 – Imagens dos corpos de prova após o processo de: (a) extrusão; (b) secagem e (c) queima.	51
Figura 13 – Imagens do forno garrafão usado para a realização da queima com ciclos térmicos de 940°C e 157 horas, mostrando detalhes da estrutura externa, da fornalha e carregamento do forno da esquerda para a direita.	51
Figura 14 - Curva de queima do forno garrafão com ciclos térmicos de 940°C e 157 horas.	52
Figura 15 - Fluxograma da Etapa II descrevendo as atividades realizadas para a análise das fontes minerais.	53
Figura 16 – Localização no mapa geológico das áreas de argila selecionadas para o estudo dentro do APL-CVMF.	55

Figura 17 - Representação esquemática do perfil geológico das argilas A0, AP e A1 dentro do depósito flúvio-lagunares.....	55
Figura 18 - Representação esquemática do perfil geológico das argilas A8 e A9 dentro do depósito aluvionares.....	56
Figura 19 - Corpos de prova das argilas estudadas após o processo de: (a) extrusão; (b) secagem e (c) queima.	57
Figura 20 - Forno contínuo industrial usado para queima com atmosfera oxidante com ciclos térmicos de 939°C e 24 h, mostrando detalhes da estrutura interna, fornalha carregamento de pó de serra.	58
Figura 21 - Curva de queima em forno industrial com atmosfera oxidante realizado nesse estudo, com ciclos térmicos de 939°C e 24h.	59
Figura 22 – Composição química distribuída no diagrama ternário SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -TiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +MgO+CaO+Na ₂ O+K ₂ O, das massas estudadas em comparação com as matérias-primas utilizadas pelos fabricantes de azulejos italianos.	63
Figura 23 – Representação das amostras C1 a C10 distribuídas em diagrama ternário Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -CaO mostrando diferenças de cores da cerâmica vermelha após queimados.	64
Figura 24 – Difratoograma de raios X das massas cerâmicas de referência para o estudo de diagnóstico.	65
Figura 25 – Análise colorimétrica das massas composicionais (C1-C10) estudadas do APL-CVMF.....	67
Figura 26 - Correlação entre o cromóforo Fe ₂ O ₃ e a luminosidade (L*) das massas estudadas (C1-C10).....	68
Figura 27 - Correlação entre o cromóforo Fe ₂ O ₃ e a cromacidade (a* e b*) das massas composicionais de referência (C1-C10).....	69
Figura 28 - Composição química distribuída no diagrama ternário SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -TiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +MgO+CaO+Na ₂ O+K ₂ O, das fontes minerais estudadas em comparação com as matérias-primas utilizadas pelos fabricantes de azulejos italianos.	72
Figura 29- Representação das amostras A0, AP, A1, A2, A5, A8 e A9 (fontes minerais estudadas) distribuídas em diagrama ternário Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -CaO mostrando diferenças de cores da cerâmica vermelha após queimados.....	73
Figura 30- Imagens fotográficas das amostras de argila (A0, A1 e AP) com sinais de efluorescência.	75
Figura 31 - Difratoograma de raios X das argilas esudadas.....	76
Figura 32 – Correlação entre o Índice de plasticidade e Limite líquido das argilas estudadas dentro dos limites do APL-CVMF.	78

Figura 33 - Análise da ATD/TG das argilas estudadas dentro da região do APL-CVMF.	79
Figura 34 - Análise colorimétrica das argilas estudadas da região do APL-CVMF.	81
Figura 35 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a luminosidade (L^*) das argilas estudadas.	82
Figura 36 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a cromacidade (a^* e b^*) das argilas estudadas.	82
Figura 37 – Análise visual da influência do tipo de forno com base na comparação de imagens das amostras A0 (atmosfera redutora) e A0V (atmosfera oxidante).	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química das amostras estudadas, ilustrando o teor de Fe_2O_3 de cada uma delas.....	54
Tabela 2- Composição química das massas cerâmicas, obtidos por espectrometria de fluorescência de raio-X.....	61
Tabela 3- Teores de umidade de extrusão (U), resíduo bruto (RB), limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP) das massas estudadas.	66
Tabela 4 - Composição química das fontes minerais, obtidos por espectrometria de fluorescência de raios X.....	70
Tabela 5 - Valores de sais solúveis presentes nas argilas estudadas	74
Tabela 6 – Quantificação das fases mineralógicas das sete argilas caracterizadas.....	76
Tabela 7 - Teores de umidade de extrusão (U) e resíduo bruto (RB) das argilas estudadas	77
Tabela 8 - Dados da diferença de cor ΔE^* das argilas em relação ao perfil de referência da região do APL-CVMF.....	83
Tabela 9 - Colorimetria das peças A0 (atmosfera redutora) e A0V (atmosfera oxidante).	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCeram	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a* e b*	cromacidade das cores
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
APL	Arranjo Produtivo Local
APL-CVMF	Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça
ATD/TG	Análise Térmica Diferencial/ Termogravimétrica
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
CMG	Grupo de Materiais Cerâmicos
COOPEMI	Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga
DRX	Difratometria de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
IPVC	Instituto Politécnico de Viana do Castelo
L*	Luminosidade
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NOx	Número de oxidação
P.F	Perda ao fogo
SINDICER	Sindicato da Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça
SC	Santa Catarina
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense
ΔE	Diferença de cor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA.....	26
2	OBJETIVOS	29
2.1	OBJETIVO GERAL	29
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
3	REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1	A INDÚSTRIA CERÂMICA	31
3.2	ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS	31
3.2.1	APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça	32
3.3	CIÊNCIA DOS MATERIAIS NA CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA	34
3.3.1	Produtos cerâmicos com propriedade específica de cor branca	35
3.3.2	Matérias primas	37
3.3.3	Processo de fabricação de cerâmica estrutural	38
3.3.3.1	Tratamento térmico	40
3.3.4	Propriedades dos produtos cerâmicos	41
3.3.5	Propriedade estética (Cor)	42
3.4	TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE COR.....	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1	DIAGNÓSTICO CERÂMICA ESTRUTURAL (ETAPA I)	47
4.1.1	Materiais da Etapa I	49
4.1.2	Métodos da Etapa I	50
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES MINERAIS (ETAPA II).....	53
4.2.1	Materiais da Etapa II	54
4.2.2	Métodos da Etapa II	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	DIAGNÓSTICO CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA	61
5.1.1	Análise química	61
5.1.2	Análise mineralógica	65
5.1.3	Análise propriedades físicas	66
5.1.4	Análise colorimétrica	67
5.2	ANÁLISE DAS FONTES MINERAIS ALTERNATIVAS PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA	69
5.2.1	Análise química	70
5.2.2	Análise sais solúveis	74

5.2.3	Análise mineralógica.....	75
5.2.4	Análise propriedades físicas.....	77
5.2.5	Análise ATD/TG	79
5.2.6	Análise colorimétrica.....	80
5.2.6.1	Análise colorimétrica em função do tipo de forno.....	84
6	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A produção de cerâmica vermelha no Brasil apresenta uma interdependência com o setor de construção civil e, conseqüentemente, com o cenário econômico do país por meio do mercado imobiliário e disponibilidade de crédito (Cabral *et al.*, 2012). Durante períodos de crescimento econômico, a demanda por habitação e obras públicas aumenta significativamente, impulsionando a construção de novos imóveis, projetos de infraestrutura e influenciando na demanda da cerâmica vermelha (Nazario *et al.*, 2018). O crescimento econômico não apenas estimula a atividade na construção civil, mas também gera empregos e melhora a renda das comunidades locais, proporcionando às pessoas a capacidade de investir em construção e reforma de imóveis (Nazario *et al.*, 2018).

Os Arranjos Produtivos Locais (APLs) são uma concentração geográfica de empresas, predominantemente de micro, pequeno e médio porte, que atuam em um mesmo setor produtivo e estabelecem vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizado entre si e com outras instituições locais, como governos, associações empresariais, instituições de ensino e pesquisa (Quandt, 2012).

Um exemplo dessa iniciativa é o Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF) criado em 2012 para organizar e fortalecer a estrutura do setor, promovendo o seu desenvolvimento sustentável e econômico na região sul de Santa Catarina (SINDICER, 2022).

Essa região se destaca pela produção tradicional de cerâmica vermelha como tijolos, blocos e telhas, mas também pela fabricação peculiar de produtos de coloração clara. A denominação 'telhas e tijolos brancos/mesclados' tornou-se uma identidade cultural e produtiva da região, refletindo tanto as características dos materiais locais quanto a tradição da fabricação artesanal. Essa nomenclatura é amplamente reconhecida e valorizada, representando a singularidade da produção de cerâmica regional e sua relevância para a construção civil. Essa distinção é atribuída principalmente às propriedades específicas da matéria prima utilizada na região caracterizada por um baixo teor de ferro (Peterson *et al.*, 2015).

Algumas técnicas tradicionais de produção resistem à adoção de novas tecnologias, devido ao uso de práticas artesanais e às consequentes vantagens de diferenciação de seus produtos (Bitencourt; Jesus, 2018).

Além disso, o conhecimento destas técnicas fundamenta-se em experiências práticas vividas ao longo dos anos e transmitidas de uma

geração para outra de forma empírica. Isso leva à carência de dados científicos representando uma lacuna crítica que compromete a evolução e competitividade do setor (Werneck, 2006). A falta de informação sobre a relação entre as propriedades específicas dos materiais cerâmicos, processos de produção e fatores que influenciam a qualidade dos produtos, limita significativamente a capacidade da indústria de inovar (Matencio, 2020). Ainda conforme o autor, a inovação tecnológica é essencial para impulsionar a eficiência dos métodos de fabricação, reduzir custos e atender às demandas crescentes por produtos de alta qualidade. Por outro lado, alguns estudos sobre cerâmica vermelha tradicional exemplificam a influência do percentual de ferro na coloração contribuindo para o entendimento das propriedades estética cromáticas desses materiais (Dondi; Raimondo; Zanelli, 2014). A presença de ferro pode resultar em uma ampla gama de tonalidades, desde tons mais claros (como creme, rosado, etc) até colorações mais escuras (como vermelho escuro, marrom, etc), dependendo da concentração e das condições aplicadas no processo de fabricação. A fundamentação da influência do ferro na cor da cerâmica não apenas aprimora a capacidade de controle de qualidade, mas também fornece uma base decisiva para a formação de resultados estéticos desejados (Valanciene; Siauciunas; Baltusnikaite, 2010).

Outro fator que pode alterar a coloração está associado as condições do processo de queima, como a atmosfera, sendo determinante para a definição das características cromáticas dos produtos cerâmicos. Estas condições processuais contribuem significativamente para o desenvolvimento de práticas de fabricação mais precisas e personalizadas (Martirena Hernández *et al.*, 2020).

Assim, o objetivo desse trabalho é caracterizar em função do comportamento colorimétrico o desenvolvimento de produtos cerâmicos do Arranjo Produtivo Local Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF) com propriedades específica de coloração branca, com o intuito de estabelecer uma indicação geográfica produtiva com base nas características minerais e de processamento tecnológico utilizados na região.

1.1 JUSTIFICATIVA

O sul de Santa Catarina é responsável por boa parte da produção de cerâmica vermelha do estado, sendo um importante polo cerâmico do país, principalmente devido a abundância e qualidade de matérias primas da região. O polo catarinense produz telhas, tijolos vazados, tijolos

maciços e peças especiais, produtos que apresentam grande qualidade técnica em função das propriedades inerentes dos materiais e tecnologias aplicadas. Essa região também se destaca na produção específica de peças cerâmicas de cor branca.

Ao entender as diferenças entre as particularidades das matérias primas e das tecnologias usadas, as indústrias podem ajustar variáveis para otimizar as propriedades desejadas nos materiais cerâmicos, adaptando-as a aplicações específicas como àquelas com requisitos mecânicos, térmicos e físicos. Entre os atributos físicos tem-se a cor que é uma propriedade estética que influencia na percepção visual e no estilo arquitetônico. No caso específico da cerâmica estrutural de coloração branca, essa combinação proporciona um acabamento estético único, além de ser estrategicamente selecionada para refletir a luz solar, contribuindo para o conforto térmico e a eficiência energética. Também auxilia na durabilidade e na facilidade de manutenção que são considerações importantes, apresentando vantagens em resistir ao desgaste ao longo do tempo. Essa escolha estética também pode refletir uma abordagem consciente do meio ambiente, alinhada a práticas sustentáveis na construção.

Os produtos com propriedades específicas de coloração branca tem essa característica distinta devido à relação das matérias primas utilizadas apresentarem baixo teor de ferro, uma característica marcada da região do APL-CVMF, com a técnica artesanal de processamento térmico de atmosfera redutora, que vem impulsionando o setor e levando a região a uma possível indicação geográfica.

Desta forma, estando a propriedade estética singular destes produtos cerâmicos de coloração branca associada à escassez de recursos naturais e ao uso de recursos tecnológicos tradicionais, torna-se importantíssimo buscar alternativas produtivas que garantam a manutenção das especificidades destes produtos cerâmicos de Morro da Fumaça.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o comportamento colorimétrico de produtos cerâmicos com propriedades específica de coloração branca do Arranjo Produtivo Local Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF), com o intuito de estabelecer uma indicação geográfica produtiva com base nas características minerais e de processamento tecnológico utilizados na região.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Diagnosticar empresas cerâmicas localizadas na região do APL-CVMF, como referência de parâmetros de composição química, mineralógica e tonalidade para a obtenção de produtos cerâmicos de coloração branca;
- b) Caracterizar e selecionar quimicamente as matérias primas da região do APL-CVMF para o aprimoramento de fontes minerais alternativas no desenvolvimento de produtos cerâmicos de coloração branca;
- c) Estudar a influência dos parâmetros do processo de queima sobre a tonalidade dos produtos cerâmicos de coloração branca da região do APL-CVMF;
- d) Apoiar a Indicação Geográfica de produtos de cerâmica estrutural de coloração branca por meio de correlações das características das matérias primas e dos processamentos desenvolvidos na região do APL-CVMF.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A INDÚSTRIA CERÂMICA

A cerâmica vem sendo utilizada há milhares de anos em diversas culturas e regiões para diferentes fins. As primeiras cerâmicas eram tijolos feitos de barro e secos ao sol para endurecer. Pesquisadores confirmam que a cerâmica é, de fato, a mais antiga das indústrias, originando-se no momento em que os seres humanos começaram a empregar barro endurecido pelo fogo (Napoli, 2015).

No Brasil, há relatos de que as primeiras cerâmicas têm surgimento na Ilha Marajó, no Pará, onde os indígenas desenvolveram técnicas artesanais como raspagem, incisão, excisão e pintura. Essas práticas contribuíram para a consolidação de uma rica cultura de trabalho com argila no país (ABCeram, 2023).

Ao longo dos anos, a modelagem manual da argila para a produção de artefatos evoluiu, dando lugar ao uso de equipamentos mais tecnológicos, como prensas para a fabricação de revestimentos, e extrusoras/prensas para a produção de blocos vazados e telhas, que levou a uma produção mais rápida e eficiência, além de uniformidade das peças (ANFACER, 2023).

A cerâmica no Brasil tem demonstrado progresso ao longo dos anos, emergindo como um setor de significativa importância para a economia do país. Segundo dados levantados pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) a indústria da cerâmica vermelha registra um faturamento anual superior a 18 bilhões de reais, representando 4,8% do setor da construção civil no Brasil. Este segmento é composto por aproximadamente 5600 empresas no país, que empregam diretamente 293 mil trabalhadores e geram 900 mil empregos indiretos. Além disso, a produção brasileira de tijolos/telhas atinge mais de 8,0 bilhões de peças por mês, levando o consumo de argila destinado à fabricação desses materiais a 10,3 milhões de toneladas mensais (ANICER, 2023).

3.2 ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS

O Arranjo Produtivo Local (APL) de uma maneira geral é uma ferramenta política para intervenção territorial em três níveis: políticas em escala micro, meso e macro espacial; relação entre os conceitos de cadeia produtiva, polo produtivo e arranjos produtivos locais; e papel do APL como política de desenvolvimento local (Alderete; Bacic, 2018).

Os APLs foram construídos para promover o desenvolvimento e fortalecimento socioeconômico tendo a integração entre empresas, lideranças governamentais, instituições acadêmicas, entre outros que concentram num conjunto de atividades econômicas e estão interligadas (APL-SE, 2008).

Devido a sua abrangência principalmente em tamanho, o Brasil acabou tendo uma economia diversificada, o que levou a uma série de APLs, como: Agronegócio; Agricultura familiar; Produtos florestais; Frutas tropicais; Agrossilvicultura; Mineração; Manufatura e Serviços (Vieira Filho; Fornazier, 2016).

A denominação "Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral" é usada para se referir os arranjos produtivos locais baseados na extração mineral, os quais são formados por um grupo de empresas, instituições e demais *stakeholders* de uma determinada região, com o objetivo de promover o desenvolvimento local por meio da exploração de recursos minerais (Gonçalves; Cândido, 2013).

Os arranjos produtivos locais baseados na extração mineral que tratam da "cerâmica vermelha" são uma parte importante da economia brasileira, tendo o incentivo da Rede Brasileira de Informação de Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral (RedeAPLmineral), e sendo apoiado pelo Ministério de Minas e Energia. Esses arranjos envolvem a produção de elementos cerâmicos a base de argila, e possuem o envolvimento de toda cadeia desde a mineração da matéria-prima (Gonçalves; Cândido, 2015).

A indústria de cerâmica vermelha vem se destacando entre os APLs estabelecidos no Brasil, sobretudo pela aplicação da estratégia de circularidade mineral, tendo em vista ações de sustentabilidade associadas à valorização de resíduos e outros minerais pouco explorados na massa cerâmica (Cabral; Azevedo, 2017).

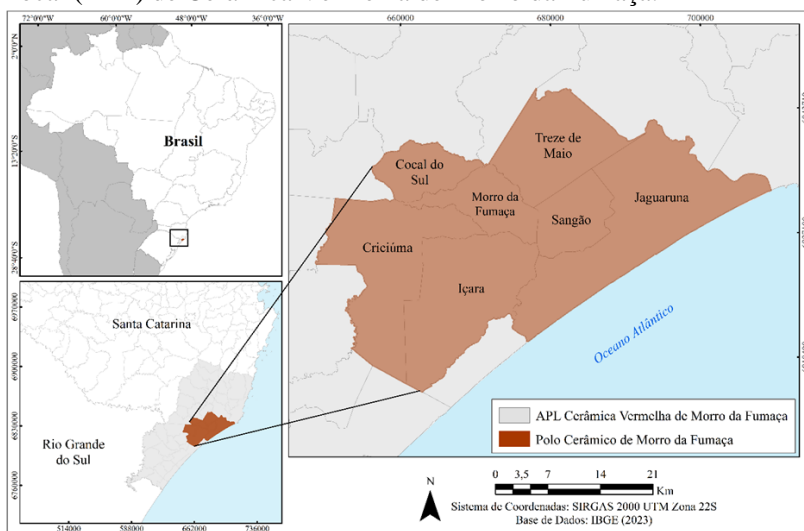
3.2.1 APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça

O setor de cerâmica vermelha é muito relevante no estado de Santa Catarina, concentrando-se em três regiões produtivas, sendo a principal concebida pelo polo no município de Morro da Fumaça, onde dados do Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha (SINDICER) e da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI) mostram que a região possui cerca de 120 empresas. Esta atividade industrial gera cerca de sete mil empregos e têm uma produção mensal de 100 milhões de peças, sendo 20 % de telhas e 80 % de tijolos. Devido à grande importância desse setor pra região o APL-CVMF veio

para auxiliar na organização da estrutura do setor e na integração com instituições de apoio e governanças da região (Cruz, 2023).

O APL-CVMF (Figura 1) ganhou notoriedade nacional pelas melhores práticas minerais, obtidas por anos de evolução focados no gerenciamento ambiental das áreas de mineração, onde atingiu-se uma ampliação significativa nas frentes de lavra (Pagnan *et al.*, 2023) e pela circularidade mineral, com o aproveitamento de resíduos da agroindústria na fabricação cerâmica (Guarezi *et al.*, 2023).

Figura 1 – Representação da localização geográfica do Arranjo Produtivo Local (APL) de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça.



Fonte: Autor, 2023

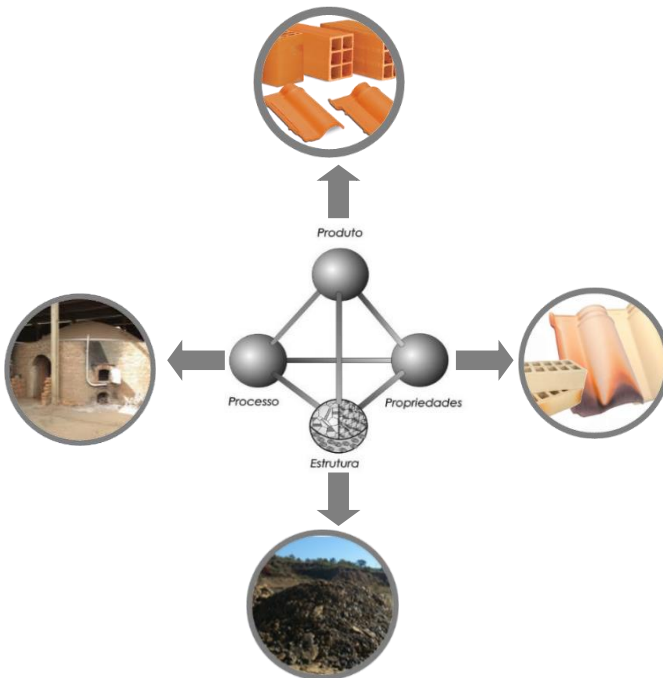
O setor cerâmico da região também se destaca pela produção característica de cerâmica estrutural de coloração branca, como telhas e tijolos. Essa peculiaridade está voltada as propriedades da matéria prima, como baixo teor de ferro e métodos de tratamento térmico diferenciados, como a queima redutora, onde se limita a entrada de oxigênio. A interação das características das matérias primas e do processamento aplicados pelo setor cerâmico na região, fez com que esta cultura produtiva de produtos brancos e mesclados se desenvolvesse.

3.3 CIÊNCIA DOS MATERIAIS NA CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA

A ciência dos materiais permite a inovação e a melhoria de materiais através da compreensão e manipulação de sua composição e processamento (Simêncio, 2016).

A Figura 2 mostra o tetraedro das ciências dos materiais aplicado para a cerâmica estrutural de coloração branca, correlacionando, para tal, critérios de composição/estrutura do material, como menor percentual de ferro; de processamento, pelo uso de processos de queima artesanal, com uso de ciclos lentos e atmosfera redutora (Albuquerque do Nascimento, 2020).

Figura 2 – Representação do tetraedro da ciência dos materiais aplicado como indicador de correlação entre características de composição e processamento de cerâmica estrutural de coloração branca.



Fonte: Autor, 2024

A abordagem do tetraedro mostra como esses fatores são interdependentes, um processo de constante equilíbrio e ajuste entre a composição química, a estrutura interna do material, as propriedades desejadas e os métodos de processamento que devem ser ajustados para alcançar o resultado final almejado (Simêncio, 2016).

3.3.1 Produtos cerâmicos com propriedade específica de cor branca

A cerâmica vermelha é reconhecida principalmente pela fabricação de tijolos, telhas, tubos, lajes, entre outros materiais de coloração avermelhada. No entanto, na região sul de Santa Catarina, destaca-se uma singularidade na produção desses materiais, especialmente telhas e tijolos aparentes, devido à sua característica distinta de coloração branca, popularmente denominado por telha/tijolo branco e mesclado (Figura 3).

Figura 3 – Imagens de peças de cor branca e mesclada do APL-CVMF.



Fonte: Autor, 2023

Produtos cerâmicos são essenciais na construção civil, e as peças de coloração branca natural se destacam não só pela sua função estética, mas pelo seu desempenho funcional no que se refere a eficiência energética e conforto térmico. Pois devido a sua tonalidade, essas telhas e tijolos tem a capacidade de refletir melhor a luz solar, o que contribui para a redução da absorção de calor e mantem as temperaturas internas mais amenas como representado na Figura 4 (Wang; Huang; Li, 2020), que mostra a diferença de reflexão e absorção de luz em um telhado escuro/claro. Esse benefício proporciona um ambiente mais confortável

para as pessoas, além de economia nos custos de resfriamento, especialmente em climas mais quentes (Sproul *et al.*, 2014).

Figura 4 – Ilustração representativa da comparação da reflexão e absorção de calor entre os telhados escuros e brancos.



Fonte: Adaptado de Meier, 2023

A contribuição com o conforto térmico, soma-se com uma melhora na busca por soluções construtivas mais sustentáveis e economicamente viáveis. Ao colaborar para a eficiência energética das habitações, estes produtos ajudam nas crescentes demandas por práticas construtivas que respeitam o meio ambiente e oferecem benefícios econômicos a longo prazo (Bavaresco *et al.*, 2021).

Além disso, esses materiais apresentam durabilidade e resistência características da cerâmica, garantindo uma cobertura robusta e de longa vida útil. Sua versatilidade de design permite a adaptação a uma variedade de estilos arquitetônicos, enquanto a capacidade de refletir a luz solar

contribui para a sustentabilidade ambiental, destacando-se como uma escolha eficaz em diferentes condições climáticas (Sproul *et al.*, 2014).

Todas essas propriedades, aliadas às matérias primas de qualidade e ao processamento térmico peculiar, destacam os produtos de cor branca como elementos singulares na construção civil, dos quais podem potencialmente justificar a concessão de uma Indicação Geográfica (SINDICER, 2022).

A identidade única proporcionada pelas condições climáticas, técnicas de produção e tradições regionais pode conferir a esses itens uma característica exclusiva, que somadas a autenticidade vinculada a região do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça fortalece a reputação e a competitividade dos produtos no mercado (SINDICER, 2022). Essa combinação de fatores ressalta a qualidade da cerâmica estrutural de coloração branca e o potencial de reconhecimento geográfico, solidificando esses produtos como verdadeiras expressões da excelência e tradição na construção civil (Matencio, 2020).

3.3.2 Matérias primas

As argilas, tradicionalmente utilizadas como matéria prima na fabricação de cerâmica vermelha, exercem uma importante influência na qualidade do produto final por meio de diversas propriedades efetivas. Aspectos como resistência mecânica, absorção de água, dimensionalidade e cor são diretamente afetados pelas características intrínsecas dessas argilas (Hein *et al.*, 2004).

No contexto do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF), destaca-se a abundância desse recurso, embora se deva salientar que diferentes áreas dentro do APL-CVMF podem apresentar argilas com propriedades distintas. A compreensão e gestão dessas características é uma demanda importante para garantir a excelência nos resultados finais da produção cerâmica.

A plasticidade é uma propriedade fundamental das argilas, as quais constituem a principal matéria prima da cerâmica vermelha. As argilas são compostas por caulinita e outros argilominerais, com proporções variadas de illita e esmectita, além de conterem quantidades não definidas de quartzo, feldspato e matéria orgânica. Na composição da massa cerâmica esses minerais são fundamentais a fim de se proporcionar plasticidade, facilitando a conformação, conferindo resistência mecânica a verde e contribuindo para a refratariedade do material (Riella, 2010).

A fração não argilosa (em sua grande parte areia) contida na matéria prima, influencia praticamente todo o processo industrial e

determina a qualidade do produto final. Elevados teores desta fração, verificada normalmente pelo teor de resíduo bruto, podem auxiliar na velocidade de extrusão e também na secagem, porém pode impactar negativamente no processo de queima, resistência mecânica e desgastes dos equipamentos. Ao contrário, quanto menor o resíduo, maiores os problemas com regulação de boquilha e aparecimento de trincas na maior parte das vezes durante a secagem. Teores aceitáveis de trabalho para uma boa trabalhabilidade na extrusão e qualidade de produtos cerâmicos acabados ficam entre 10 a 15%. Entretanto, as indústrias podem adaptar os processos a outros teores de minerais não plásticos (Oliveira, 2013).

O óxido de ferro III (Fe_2O_3) é um componente comumente encontrado em muitas matérias primas utilizadas na fabricação de cerâmica, incluindo argilas, e tem uma característica distinta no que se refere a propriedades químicas, composição e natureza mineralógica (Camenar *et al.*, 2018). Sua presença é um dos principais fatores que influenciam no desenvolvimento da cor. A cor vermelha vem da formação de soluções sólidas entre Al_2O_3 e Fe_2O_3 , a cor mais amarelada vem da entrada de Fe_2O_3 na estrutura da mulita sob condições oxidantes (Housemann; Koenig, 1971). Já a cor branca pode ser obtida pelo processamento cerâmico em atmosfera redutora, mantendo-se o ferro em estado ferroso, combinando os íons ferrosos com o SiO_2 para formar cristais de silicato ferroso, que são brancos (Housemann; Koenig, 1971).

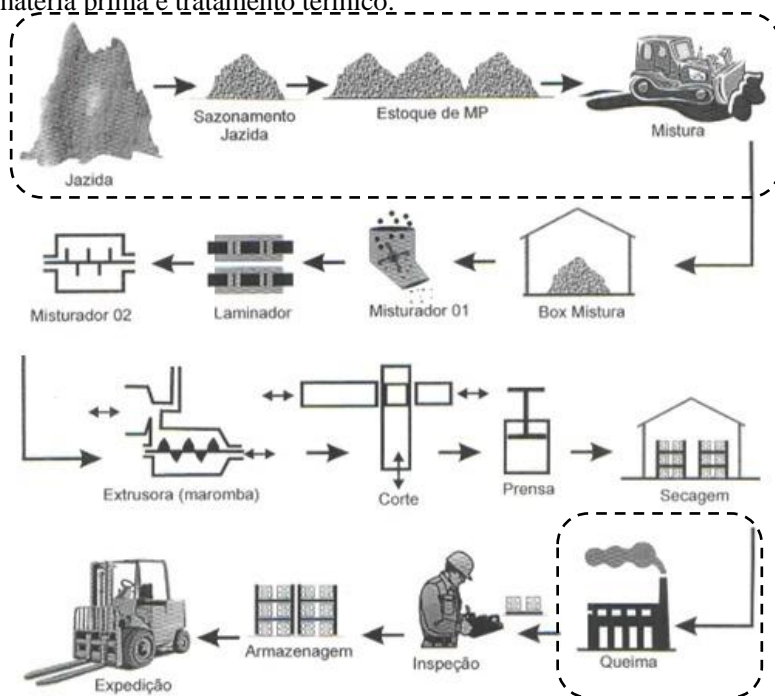
3.3.3 Processo de fabricação de cerâmica estrutural

O processo produtivo da cerâmica estrutural de coloração branca é similar ao processo do produto de cerâmica vermelha tradicional, porém com algumas ressalvas na parte de escolha de matéria prima e tratamento térmico, conforme Figura 5. O processo é dividido basicamente na extração e preparação da argila, na conformação da peça cerâmica, no tratamento térmico e expedição (Oliveira, 2013).

O processo inicia com a extração da matéria prima. No caso da cerâmica estrutural de coloração branca, argilas de cavas alagadas com maior teor de plasticidade são majoritariamente mineradas. Subsequentemente, a argila é encaminhada ao setor de beneficiamento, preparação e mistura, no qual diferentes tipos de matérias primas são combinados para formar a massa desejada, no caso das telhas e tijolos brancos, com baixos teores de ferro afim de evitar a formação de óxidos que tenha uma tonalidade avermelhada. Em seguida, essa massa é introduzida no processo, passando pelo estágio de extrusão para a formação do produto, as telhas, ainda passam pelo processo adicional de

pressagem para moldagem. Na sequência, a peça resultante é submetida à secagem, eliminando a umidade da massa, a qual era necessária para a etapa de conformação (Oliveira, 2013).

Figura 5 – Representação das etapas características do processo de fabricação de cerâmica vermelha, destacando as etapas de extração de matéria prima e tratamento térmico.



Fonte: Mafra, 1999

A etapa de queima, onde as propriedades do produto acabado são consolidadas, de cerâmica branca, ocorre normalmente de forma artesanal com ciclos longos de aproximadamente até quinze dias, abrangendo as etapas de aquecimento, sinterização e resfriamento. Durante o período de sinterização, que se estende de 36 até 80h, é implementado um efeito de atmosfera redutora no forno, resultando na diminuição do oxigênio. Esse processo específico é importante para evitar a formação de óxidos que levam a formação de tonalidade avermelhada do produto final. Ressalta-se ainda que muitas cerâmicas reaproveitam o calor da etapa de queima

para ser usada na etapa de secagem e obter economia energética nessa parte do processo.

3.3.3.1 Tratamento térmico

O tratamento térmico é uma parte fundamental do processo de fabricação da cerâmica vermelha, sendo importante na determinação das propriedades finais, incluindo a cor do produto (Nigay; Cutard; Nzihou, 2017).

A finalidade da queima consiste em prover calor para desencadear reações e transformações físico-químicas nos componentes da massa cerâmica. Além da temperatura aplicada, outro elemento fundamental é o tempo de exposição da cerâmica a cada faixa de temperatura, sendo influenciado também pela velocidade de aquecimento, resfriamento, atmosfera no ambiente, tipo de forno e combustível empregado (Muller; Soares; Pinto, 1990).

Quanto à cerâmica estrutural de coloração branca, o processo assume características particulares devido à sua tonalidade específica após a queima, o que destaca a importância da atmosfera do forno e da temperatura (Motta; Zanardo; Junior, 2001).

A concentração de oxigênio na atmosfera interna do forno é muito importante no processo de queima. Pois se a atmosfera for redutora, cerca de 2-4% de CO (monóxido de carbono), atuará como agente redutor, reagindo com óxidos existentes na massa cerâmica, fazendo com que o Fe_2O_3 , reduza à FeO , do estado Fe^{3+} que geralmente estão em estados de oxidação mais elevado tendem a ganhar elétrons, sendo reduzidos a estados de oxidação mais baixos como Fe^{2+} , proporcionando uma coloração mais claras (Liebermann, 2008).

Os combustíveis mais adequados para a queima redutora incluem o gás natural ou o propano. No entanto, materiais como madeira, serragem, carvão e petróleo também demonstram eficácia como combustíveis (Finkelburg, 2022). Ao restringir o fornecimento de ar no forno, o combustível em chamas busca outra fonte de oxigênio nos óxidos presentes nos materiais cerâmicos presentes nas cargas do forno. Esse processo resulta em alterações das peças cerâmicas quando da presença de óxido de ferro, influenciando diretamente na propriedade estética de cor (Finkelburg, 2022).

A geometria dos fornos utilizados também influencia, principalmente no que se refere a chaminé, que pode determinar o controle do ambiente de queima (Sales *et al.*, 2014). A gestão adequada do sistema de exaustão é necessária para garantir uma melhor eficiência

térmica, remoção de gases indesejados e controle da atmosfera durante o processo de queima. A quantidade de oxigênio disponível afeta as reações químicas durante a queima, sendo importante na obtenção da cor branca desejada. Também é necessário controlar a ventilação através da chaminé, pois ela influencia a quantidade de oxigênio presente no interior do forno, impactando diretamente as condições de queima e as características finais da cerâmica (De Brito, 2022).

A temperatura e o tempo de resfriamento também são importantes na formação da cor branca na cerâmica estrutural. O controle preciso dessas variáveis é essencial para evitar a formação de fases com interações complexas entre os óxidos cromóforos presentes. Além disso, resfriamentos rápidos podem levar à formação de estruturas cristalinas específicas, enquanto resfriamentos lentos permitem uma reorganização mais controlada dos componentes cerâmicos (Elyseu, 2014).

3.3.4 Propriedades dos produtos cerâmicos

A indústria de cerâmica vermelha produz uma variedade diversificada de produtos no setor da construção civil e em diversas aplicações industriais. Seus produtos são conhecidos por suas propriedades distintas que oferecem durabilidade, resistência mecânica e térmica além de estética (Sabino, 2016).

Algumas dessas propriedades são vinculadas as normas da NBR 15270 (ABNT, 2023) e NBR 15310 (ABNT, 2009) para o controle de qualidade dos produtos cerâmicos acabados, tanto para tijolos quanto para telhas.

A absorção de água é uma característica técnica classificatória importante dos produtos cerâmicos, influenciando diretamente sua durabilidade, resistência mecânica e aplicabilidade em diversas situações. Pois a propriedade de porosidade, frequentemente expressa com a porcentagem de água absorvida em relação ao peso ou volume, indica condições específicas de uso do material (Dias; Toffoli; Agopyan, 2004). Produtos cerâmicos com alta absorção de água tendem a ser mais porosos, o que pode comprometer sua durabilidade e resistência, resultando em fissuras e desgaste precoce. Além disso, em climas sujeitos a ciclos de congelamento e descongelamento, a absorção de água pode impactar negativamente a estabilidade estrutural (Saleiro; Holanda, 2012).

A resistência mecânica é uma propriedade crítica para assegurar a capacidade do material em suportar diversas forças e cargas, influenciando diretamente a integridade estrutural e a eficácia em aplicações específicas. Em elementos de construção, como tijolos e

blocos, a resistência mecânica é essencial para garantir a estabilidade e durabilidade ao longo do tempo, suportando cargas compressivas sem falhas (Hoppe Filho *et al.*, 2021).

O controle geométrico na produção de cerâmica vermelha é uma prática que abrange diversos aspectos para garantir a qualidade e a conformidade das peças cerâmicas. Um dos pontos centrais desse controle é a precisão dimensional, onde as dimensões, como comprimento, largura e espessura, são minuciosamente verificadas para assegurar que atendam às especificações do projeto e se estão dentro das normas da ABNT (Rizzatti; Roman; Nakanishi, 2011). A retração do produto que é caracterizada por variação dimensional nas etapas de conformação e tratamento térmico, influencia em ações de controle na estabilização dimensional de produtos cerâmicos (Braga; Santos; Sales, 2016).

Todas essas propriedades encontram uma ligação direta com o comportamento das matérias-primas escolhidas, assim como com o meio tecnológico empregado (Dondi, 2006).

3.3.5 Propriedade estética (Cor)

A cor, sob a perspectiva da análise física, é um fenômeno que resulta da absorção e reflexão de determinados comprimentos de onda da luz incidente sobre um objeto (Berns; Reiman, 2002).

A percepção da cor do ponto de vista psicológico se manifesta apenas após um difícil processo no qual o cérebro interpreta os estímulos que recebe. Dessa forma, a cada cor associa-se um espectro distinto (Billmeyer Jr; Saltzman, 1981).

A formação do que é denominado como cor envolverá três elementos essenciais: uma fonte de luz, um objeto e um mecanismo para captar e interpretar a luz (esse mecanismo pode ser o olho humano em conjunto com o cérebro do observador, ou um dispositivo de detecção), como ilustrado na Figura 6. O objeto é aquele que possui a cor que se deseja avaliar; a fonte de luz é o tipo de luz que incide sobre o objeto e com a qual ele interage, produzindo a cor; e o mecanismo de observação é quem recebe a radiação refletida pelo objeto (Billmeyer Jr; Saltzman, 1981).

Como uma propriedade estética, a cor desempenha um importante papel na cerâmica estrutural de coloração branca, influenciando tanto sua percepção visual quanto suas características práticas (Zhang; Kim, 2009).

As principais variáveis determinantes na coloração de produtos são óxidos metálicos, temperatura e atmosfera do forno. A composição específica dos materiais cerâmicos, incluindo a presença de óxidos

metálicos como o ferro, é determinante na obtenção da cor desejada durante a etapa de queima. A existência de óxido de ferro classifica as argilas em duas categorias: aquelas de queima clara, com níveis de Fe_2O_3 abaixo de 3%, e as de queima avermelhada, com teores superiores a 3% (Dondi; Raimondo; Zanelli, 2014) . A temperatura de queima também é um fator crítico, pois diferentes faixas de temperatura podem provocar reações distintas nos materiais, resultando em variações de cor (Wiśniewska; Pichór; Kłosek-Wawrzyn, 2021). Por último, tem-se a atmosfera dentro do forno que exerce uma influência considerável em função da oxidação ou redução de certos elementos, que afeta a cor final (Rathossi; Pontikes, 2010).

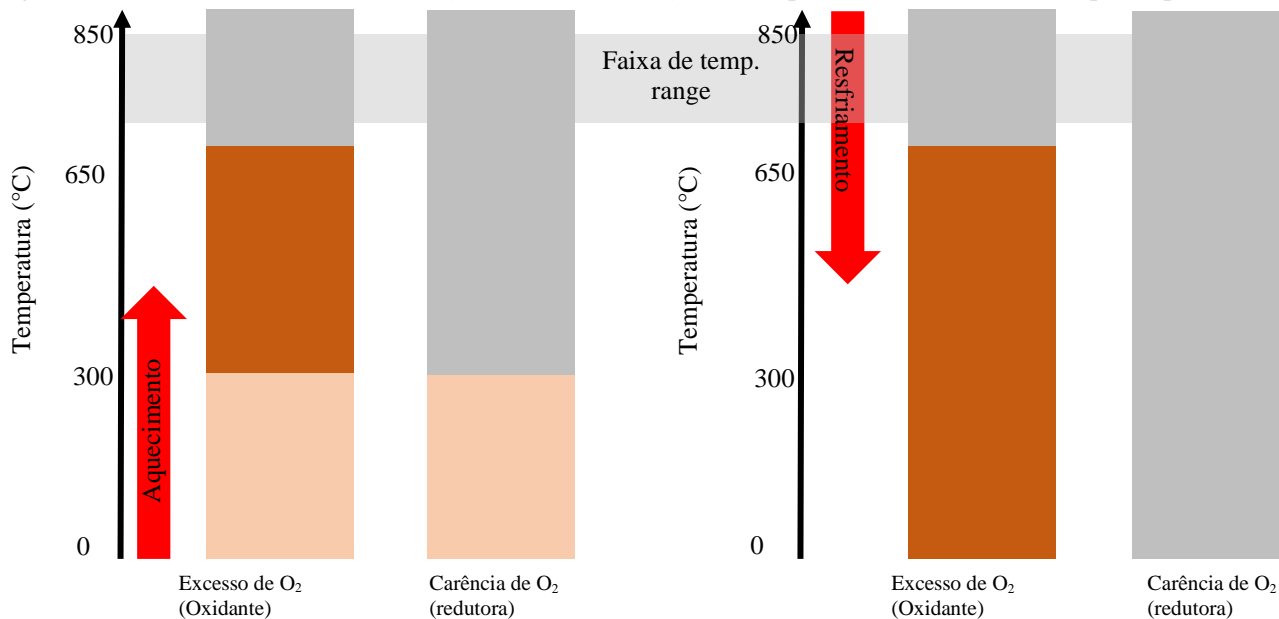
Figura 6 – Representação da relação de fatores para formação da cor, envolvendo fonte de luz, objeto e mecanismo de captação.



Fonte: Adaptado de Billmeyer Jr; Saltzman, 1981

O ferro (Fe) ocupa a posição de quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, constituindo aproximadamente 5% de sua massa total (Carroll, 1958). Pode ser encontrado em grandes jazidas, na forma de minerais com teores extremamente variáveis mesmo como elemento traço. O elemento ferro possui a configuração eletrônica $[\text{Ar}] 4s^2 3d^6$ e apresenta dois estados de oxidação mais comuns: 2+ e 3+. Esses estados de oxidação correspondem às configurações eletrônicas $[\text{Ar}] 3d^6$ e $[\text{Ar}] 3d^5$, conforme os estados de oxidação apresentados anteriormente.

Figura 7 – Demonstrativo da transformação do ferro em função da temperatura e atmosfera na etapa de queima.

Fonte: Adaptado de Martirena Hernández *et al.*, 2020

A Figura 7, exemplifica as transformações das fases do ferro em função da presença das atmosferas com oxigênio e sem oxigênio nas etapas de aquecimento e resfriamento dentro do forno e como essas transformações influenciam na cor.

É possível observar que a desidroxilação da argila (remoção dos grupos OH^-) ocorre em temperaturas entre $350\text{-}650^\circ\text{C}$, logo após o aquecimento, levando à desordem na estrutura da argila e à ativação da mesma. Em grande parte das aplicações industriais, a temperatura de sinterização varia de $750\text{-}800^\circ\text{C}$. Durante esse processo, ocorrem transformações nos argilominerais, assim como em outras fases acompanhantes, como as contendo ferro, enquanto o quartzo permanece inalterado (Martirena Hernández *et al.*, 2020).

A transformação dos óxidos de ferro em atmosferas redutoras é bastante complexa e há possibilidades de várias reações, que geralmente ocorrem simultaneamente, ou seja, hematita (Fe_2O_3) para magnetita (Fe_3O_4) para wüstita (FeO) (Martirena Hernández *et al.*, 2020). Em argilas aquecidas na faixa de temperaturas de $550\text{-}850^\circ\text{C}$, a hematita se forma na presença de oxigênio na faixa de temperatura de $300\text{-}650^\circ\text{C}$, levando a cor mais avermelhada (Oliveira; Fabris; Pereira, 2013). Já em atmosfera com baixo teor de oxigênio a hematita é reduzida para a formação da magnetita, que pode ser estável em temperaturas próximas a 300°C . Durante o resfriamento, a magnetita pode converter de volta para hematita se houver oxigênio disponível e o material calcinado terá uma cor avermelhada. Se o oxigênio não estiver disponível, a magnetita permanecerá como a principal fase estável levando a coloração mais clara (Santana *et al.*, 2001).

3.4 TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE COR

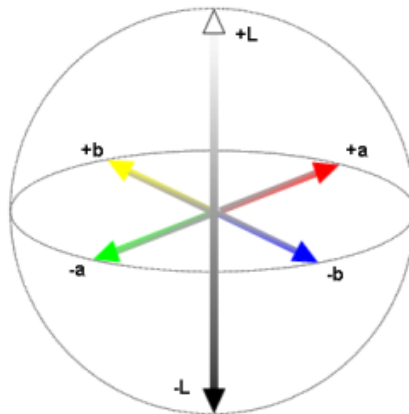
A colorimetria é uma das principais técnicas utilizada para medir a cor da cerâmica, envolve o uso de um espectrofotômetro para medir a refletância ou transmitância da luz de uma superfície cerâmica e depois calcular as coordenadas colorimétricas da amostra.

O espaço de cores CIELab é um espaço de cores 3D que permite medição e comparação precisas de todas as cores perceptíveis usando três valores de cores: L^* para luminosidade e a^* e b^* para as quatro cores exclusivas da visão humana: vermelho, verde, azul, e amarelo (Inocente *et al.*, 2017), conforme ilustrado na Figura 8. Foi desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Eclairage* - CIE) em 1976 como um padrão para comunicação de cores

e é amplamente utilizado em vários setores para controlar cores e definir padrões de tolerância de cores (Machado *et al.*, 1997).

O valor L^* representa a luminosidade do preto ao branco em uma escala de 0 a 100, enquanto os valores a^* e b^* representam a cromaticidade da cor. A diferença entre duas cores no espaço CIELAB pode ser calculada usando o valor ΔE^* , onde um valor pequeno implica que as cores estão próximas umas das outras (Inocente *et al.*, 2017).

Figura 8 - Representação do sistema CIELab utilizando a luminosidade (L^*) e a cromacidade (a^* e b^*) para medição da cor.



Fonte: Korifi *et al.*, 2013

A determinação das tolerâncias cromáticas instrumentais é estabelecida considerando os limites de tolerância da visão humana, os quais são expressos em termos de ΔE^* (Tozzi, 1992). Para simplificar a avaliação dessas diferenças (tolerâncias), são mantidos constantes alguns critérios, tais como: a fonte de iluminação, o ângulo de incidência e o ângulo de observação.

Os limites para ΔE^* podem ser descritos da seguinte forma: valores menores que 1 indicam cores praticamente indistinguíveis, como ocorre na cerâmica de revestimentos (Damiani *et al.*, 2001), valores entre 1 e 3 apontam diferenças sutis, geralmente não percebidas por observadores não treinados; os valores entre 3 e 5 representam diferenças perceptíveis, onde cores começam a ser vistas como distintas e por fim, os valores acima de 5 apresentam diferenças claras e facilmente percebidas pelo olho humano.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

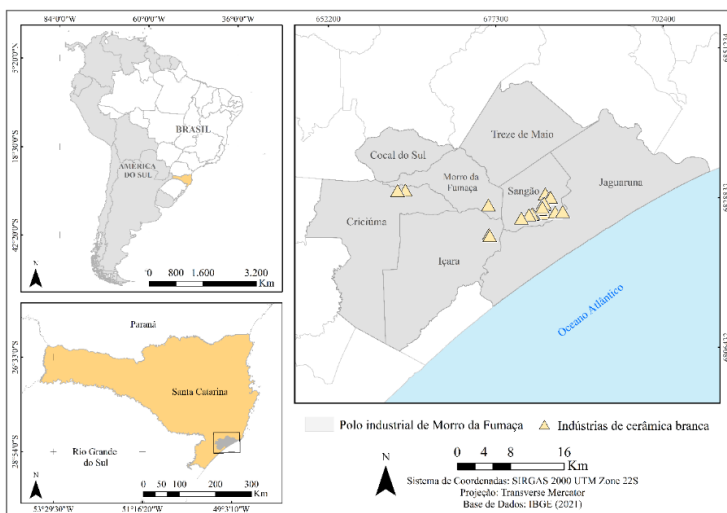
As atividades experimentais foram realizadas em duas etapas distintas. Na Etapa I, realizou-se um diagnóstico da produção de cerâmica estrutural de telhas e tijolos brancos e mesclados na região do APL-CVMF de forma a perceber os parâmetros químicos e térmicos que influenciam a propriedade de cor.

Na Etapa II, caracterizou-se algumas argilas da região do APL em função dos teores de Fe_2O_3 , aliando a influência do processamento térmico, potencializando assim novas fontes minerais da região para o uso em fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca.

4.1 DIAGNÓSTICO CERÂMICA ESTRUTURAL (ETAPA I)

O diagnóstico setorial começou com a utilização de informações geográficas referentes às indústrias de cerâmica estrutural de coloração branca (Figura 9), localizadas na região do Arranjo Produtivo Local Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL – CVMF).

Figura 9 - Localização das indústrias de cerâmica estrutural de cor branca dentro do APL-CVMF.

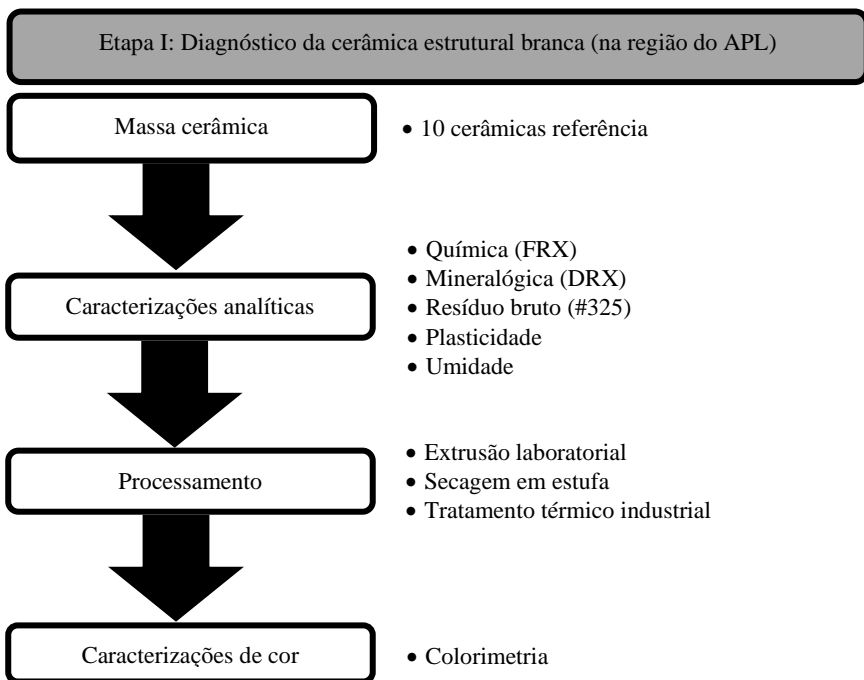


Fonte: Autor, 2023

Foram identificadas vinte empresas, com o suporte da base de dados disponibilizada pelo Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (SINDICER). Essas empresas estão envolvidas na fabricação de diversos produtos, tais como tijolos/blocos, telhas, lajes e peças especiais de cor branca/mesclada.

Como base para a realização da Etapa I do diagnóstico (Figura 10), foram selecionadas entre as vinte empresas, dez cerâmicas como referência na produção de produtos de coloração branca. Os critérios para escolha se deram da seguinte forma: i) tipologia de produtos (telhas, tijolos/blocos ou ambos), ii) representatividade (em função de produtividade) e iii) acessibilidade, que ocorreu pela parceria com o APL-CVMF e, principalmente, pela facilidade de acesso às informações, promovida pela colaboração mútua e pelo uso das instalações próprias das cerâmicas.

Figura 10 – Fluxograma da Etapa I descrevendo as atividades realizadas para o diagnóstico da cerâmica estrutural de coloração branca.



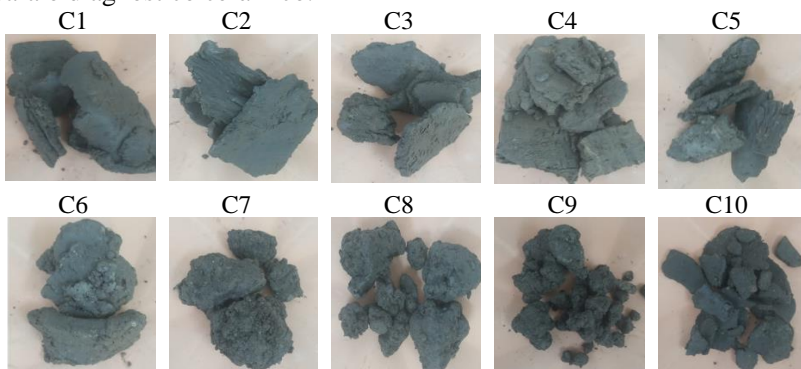
A metodologia empregada no diagnóstico incluiu também visitas técnicas e entrevistas com gestores e operadores para a correlação de informações relacionadas à experiência empírica dentro das indústrias com fundamentos científicos.

Além disso, todas as empresas selecionadas enquadram-se entre porte médio a grande, por isso apresentam estruturas mais atualizadas em comparação com aquelas de menor porte, proporcionando uma análise mais abrangente e representativa do cenário do setor.

4.1.1 Materiais da Etapa I

Foram coletadas, antes do processo de extrusão, amostras das massas cerâmicas (composições/misturas de matérias-primas) de cada uma das dez indústrias selecionadas, uma vez que, nesta etapa do processo a massa já está bastante homogeneizada devido ao processo de preparação, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 – Imagens fotográficas das massas cerâmicas selecionadas para o diagnóstico cerâmico.



Fonte: Autor, 2023

As massas cerâmicas estudadas (composições: C1 a C10) apresentam uma cor bastante característica *in natura*, pela origem geológica das argilas da região do APL-CVMF estarem em um sistema de lagunas caracterizados por sedimentos finos que frequentemente são ricos em partículas muito pequenas, conferindo propriedades plásticas e moldáveis no processo fabril. A cor cinza-escuro é um indicativo da deposição em ambientes anóxicos, sem oxigênio dissolvido, onde a matéria orgânica se acumula e pode ser preservada (Horn Filho *et al.*, 2014).

4.1.2 Métodos da Etapa I

As dez massas foram analisadas com intuito de caracterizar algumas das propriedades principais obtidas para fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca, como os teores de elementos cromóforos que configuram a cor nas peças cerâmicas. As dez massas foram investigadas quimicamente por espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX) utilizando o equipamento Espectrômetro Epsilon 3^{XLE} Panalytical, com pastilha fundida.

Os óxidos dos elementos químicos, em sua forma mais estável estão presentes nas fases cristalinas, que foram identificadas por difração de raios X (DRX), em um difratômetro (Siemens, D-5000), radiação incidente Cu K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), aceleração de 40 kV e 30 mA, intervalo 2θ de 2 a 72°, velocidade de 2°/min. e a quantificação das fases cristalinas identificadas na amostra pelo Método de Rietveld (Rietveld, 1969).

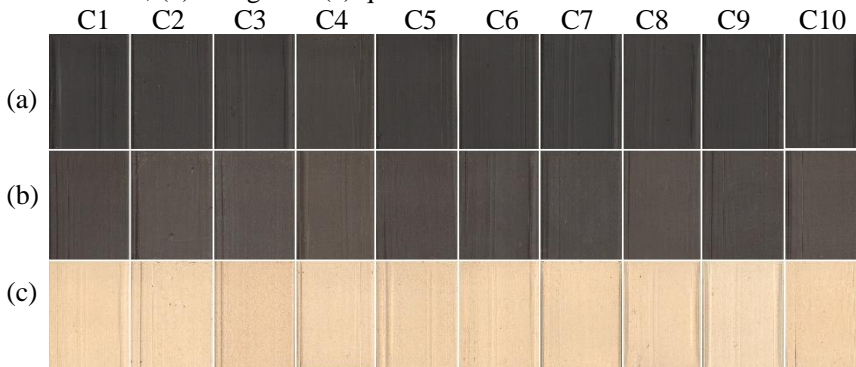
Para obtenção das propriedades físicas pré-extrusão, foram realizados ensaios de umidade, conforme NBR 16097:2012 (ABNT, 2012), o ensaio de resíduo bruto (malha #325 Mesh), conforme a literatura (Zaccaron *et al.*, 2014), e por fim, a plasticidade de Atterberg (Atterberg, 1911) nas massas, com uma amostra de cada.

Para o processo de conformação dos corpos-de-prova, as massas foram inicialmente preparadas, passadas por laminador (Laboratorial, Bertan, com abertura de 3mm), e posteriormente extrudadas (extrusora a vácuo Servitech, modelo CT-083), com pressão do vácuo de 600mm Hg. Foram conformados 10 corpos-de-prova de 4x1x6 cm³ (Figura 12a). Após extrudadas, as amostras passaram por secagem lenta em estufa laboratorial (estufa DeLeo nº 2211) a uma temperatura de 60° ± 5°C em um período de 24h para remoção da umidade (Figura 12b).

Posteriormente, as peças de todas as massas estudadas foram submetidas a um processo de queima em um forno garrafão industrial (Figura 13) sob mesma condição, onde o ciclo de queima que foi monitorado por meio de termopares e plotados no gráfico da Figura 14, teve duração de 157 horas, atingindo uma temperatura máxima de 940°C (Figura 12c).

Importante salientar que a queima foi efetuada em uma empresa entre as dez selecionadas pelo controle mais eficiente da temperatura, entretanto, o conhecimento “empírico” se retrata à todas as demais, refletindo práticas baseadas na experiência e intuição, ao invés da adoção de técnicas ou equipamentos que assegurem o controle das condições de queima.

Figura 12 – Imagens dos corpos de prova após o processo de: (a) extrusão; (b) secagem e (c) queima.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 13 – Imagens do forno garrafão usado para a realização da queima com ciclos térmicos de 940°C e 157 horas, mostrando detalhes da estrutura externa, da fornalha e carregamento do forno da esquerda para a direita.



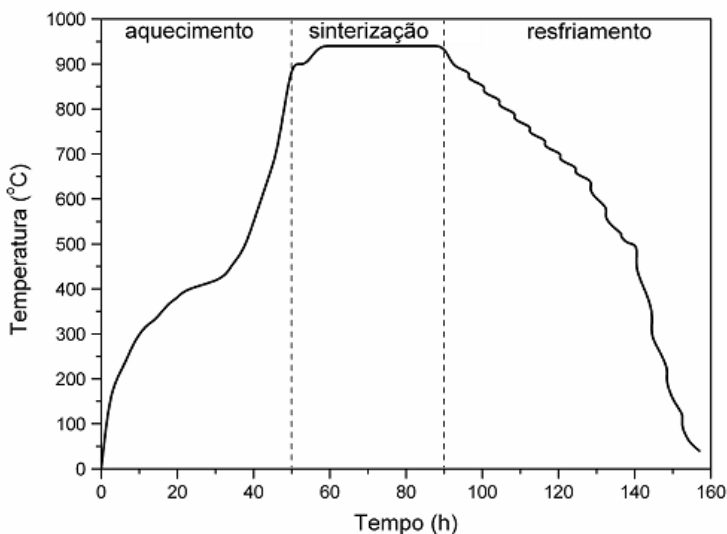
Fonte: Autor, 2024

A curva de queima industrial para peças brancas/mescladas (Figura 14) mostra que o processo ocorre por ação do calor, onde tem-se 7 a 8 fornalhas distribuídas de forma simétrica ao redor do forno. O combustível usado é a lenha e a sua distribuição nas fornalhas é feita de forma manual, conforme a temperatura e o tempo do ciclo térmico até a etapa de sinterização.

A etapa de aquecimento é o primeiro estágio, onde até a temperatura de 200°C, ocorre a eliminação da água higroscópica, água fisicamente adsorvida na superfície dos materiais ou retida em seus poros, devido às forças de atração entre as moléculas de água e o material. Também se verifica que entre 350 a 650°C ocorre a combustão das substâncias orgânicas e entre 450 e 650°C a eliminação da água de

constituição que está quimicamente ligada à estrutura molecular ou cristalina dos minerais utilizados. A partir de 700°C acontece a decomposição dos carbonatos (Oliveira, 2013) e em 900°C começa a sinterização, na qual inicialmente se limita a entrada de oxigênio no forno (Martirena Hernández *et al.*, 2020). Posteriormente realiza o abastecimento manualmente de lenha a cada duas horas num período de 36 horas, onde ocorre o processo do “arrojo” (patamar de queima) em que a temperatura varia entre 900 a 940°C. É neste momento do ciclo térmico que há um tratamento diferenciado dentro do forno para a obtenção de um material de coloração branca, a partir da diminuição de oxigênio, onde o oxigênio necessário para o processo de queima seja obtido naqueles óxidos passivos de redução constituintes da massa cerâmica, como os de ferro, resultando assim em produtos de coloração branca (Feitosa; Dutra; Campos, 2015). Por fim, o resfriamento ocorre a partir de 940°C com a parada da alimentação das fornalhas com lenha e uma diminuição gradual da temperatura até 700°C onde ocorre o reaproveitamento do calor do forno para os secadores, minimizando o tempo de resfriamento em quatro dias (Oliveira, 2013).

Figura 14 - Curva de queima do forno garrafão com ciclos térmicos de 940°C e 157 horas.

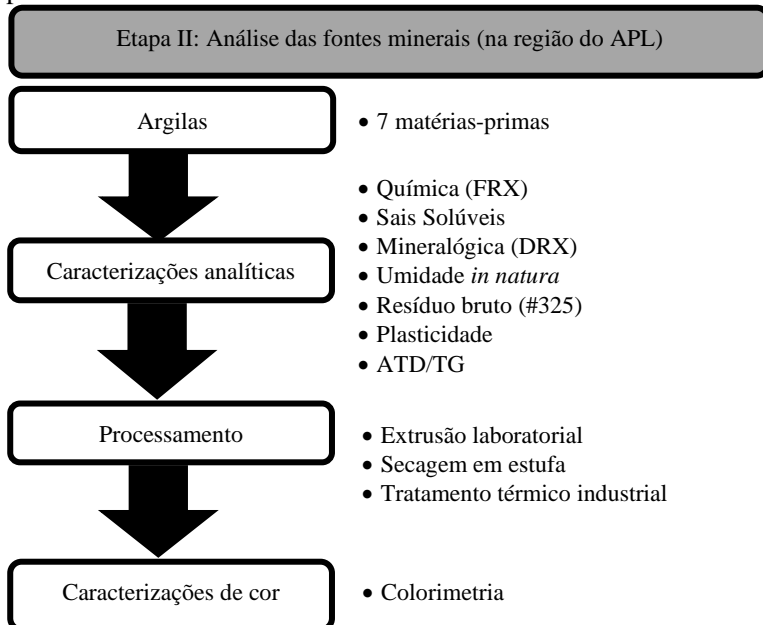


Após a queima, as peças das dez massas foram selecionadas e submetidas a análise colorimétrica (coordenadas L^* , a^* , b^* , Espectrofotômetro Spectro-guide - BYK - Gardner/0). Sendo utilizado: Sistema de coordenadas retangulares $L^*a^*b^*$ definido pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage* – Comissão Internacional de Iluminação). Iluminante: D65. Observador-padrão: foco sobre a retina. ($A/10^\circ$). Desta forma, obteve-se o perfil das características composicionais e processuais das massas usadas na fabricação de cerâmica estrutural de cor branca no APL - CVMF, onde os valores médios obtidos servirão como um padrão para comparação na etapa seguinte.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES MINERAIS (ETAPA II)

A Etapa II do estudo explorou a investigação de matérias primas da região com potencial para a fabricação de telhas e tijolos de coloração branca. O fluxograma da Figura 15 apresenta as atividades realizadas.

Figura 15 - Fluxograma da Etapa II descrevendo as atividades realizadas para a análise das fontes minerais.



Fonte: Autor, 2023

4.2.1 Materiais da Etapa II

Dentro das áreas de mineração da região do APL-CVMF possui uma grande abundância de argilas subutilizadas por falta de entendimento científico (Saviatto et al., 2023). Em paralelo a isso, sabe-se que a classificação quanto à cor final de materiais cerâmicos está diretamente ligada a presença de Fe_2O_3 , em um teor limitado a 3%, como critério para obtenção de produtos cerâmicos de colorações claras (Dondi; Raimondo; Zanelli, 2014). Portanto, para a realização desta etapa, foram selecionadas algumas matérias primas dentro das jazidas mineráveis do APL-CVMF para caracterização da coloração quanto: i) em função do teor de ferro e ii) pela origem geológica.

Dentre as doze argilas disponíveis nas áreas APL-CVMF, como mostra a Tabela 1, foram selecionadas quatro matérias primas com teores de Fe_2O_3 próximos de 3%, dentre elas, uma argila padrão utilizada para fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca (A0) e outras três (A2, A5 e A8). Para além dessas, outras três matérias primas (AP, A1 e A9) foram selecionadas pela origem geológica (ver Figura 16), também com os teores de ferro destacados com sombreado em cinza na Tabela 1. Todas elas foram incorporadas ao estudo para possibilitar uma análise comparativa com o diagnóstico da Etapa I.

Tabela 1 – Análise química das amostras estudadas, ilustrando o teor de Fe_2O_3 de cada uma delas.

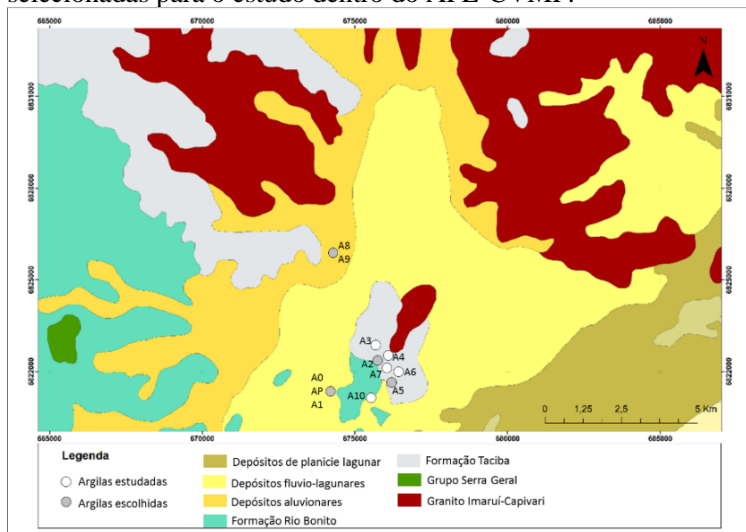
Argilas	A0	AP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Fe_2O_3	3,06	5,07	8,49	3,31	3,35	6,21	1,89	10,10	26,01	1,70	4,99	6,08

Em negrito as argilas com teor na ordem de 3% de Fe_2O_3 e sombreado em cinza, aquelas argilas selecionadas pelo perfil geológico.

Fonte: Autor, 2023

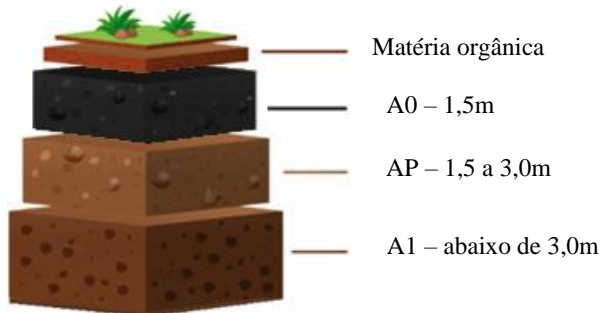
As argilas AP e A1 pertencem à mesma localização geológica que a A0, conforme detalhado na Figura 17, sendo uma área originária de cava alagada (várzea). Estas argilas apresentam alta plasticidade, propriedade importante para a fabricação de tijolos e telhas. Como estas matérias primas estão situadas em um ambiente de várzea, são classificadas como argilas transportadas, pertencentes aos Depósitos Flúvio Lagunares que são caracterizados por uma combinação de areias e lamas lagunares com cascalhos e areias de sedimentação fluvial (Wildener *et al.*, 2014).

Figura 16 – Localização no mapa geológico das áreas de argila selecionadas para o estudo dentro do APL-CVMF.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 17 - Representação esquemática do perfil geológico das argilas A0, AP e A1 dentro do depósito flúvio-lagunares.

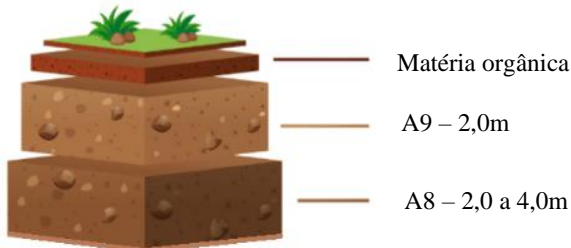


Fonte: Autor, 2023.

A argila A8 e A9 (Figura 18) estão localizados no mesmo perfil, sendo ambos materiais subutilizados provenientes de cavas alagadas (várzea), que tem uma textura característica distinta devido à presença de quartzo livre em sua composição mineralógica. Em função disso, aliada à sua localização geográfica em depósitos aluvionares, caracteriza essa argila como um sedimento clástico, como areia, cascalho e lama. Esses

materiais se formaram ao longo do tempo em depósitos superficiais das encostas dos morros adjacentes, acumulados por processo gravitacional e pela ação das chuvas, que transportaram e depositaram os sedimentos na área ao longo de muitos anos (Wildener *et al.*, 2014).

Figura 18 - Representação esquemática do perfil geológico das argilas A8 e A9 dentro do depósito aluvionares.



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, as argilas A2 e A5 escolhidas pela concentração de ferro, pertencem ao Membro Rio do Sul, o qual se caracteriza na região pela ocorrência de folhelhos e siltitos geralmente cinza escuros a pretos e por arenitos finos a médios (Wildener *et al.*, 2014). Essas argilas em taludes sendo comumente denominada de “argila de morro”, podendo ser aplicada no processo cerâmico como argila arenosa.

4.2.2 Métodos da Etapa II

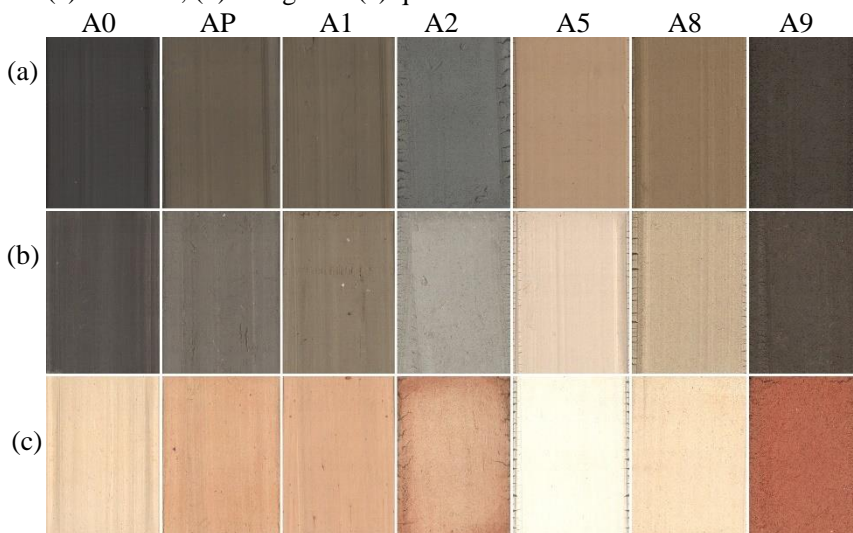
Foram feitas análises químicas, mineralógicas e físicas (umidade *in natura*, resíduo bruto e plasticidade) conforme descritos em 4.1.2, - Etapa I nas sete argilas estudadas, além de sais solúveis determinados pela concentração iônica dos cátions (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}), devido ao surgimento de eflorescência em algumas das argilas.

As análises térmicas (ATD/TG) foram realizadas nas 7 argilas para compreender os fenômenos que ocorrem durante o processo de queima. Estas análises foram realizadas em um analisador térmico simultâneo (Netzsch, modelo STA 409 EP) no intervalo de temperatura compreendido entre 25-1100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Como o foco principal foi a propriedade estética de cor, estabeleceu-se uma boa homegeinização das matérias primas, a partir das argilas *in natura* e de um processo de laminação (Laboratorial, Bertan,

com abertura de 3mm). Posteriormente, estas sete argilas foram então extrudadas (extrusora a vácuo Servitech, modelo CT-083), com pressão do vácuo de 600mm Hg. Para cada uma das argilas foram conformados 10 corpos-de-prova de $4 \times 1 \times 6 \text{ cm}^3$ (Figura 19a). Após a extrusão, as amostras foram secas lentamente em estufa laboratorial (estufa DeLeo nº 2211) a uma temperatura de $60^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ durante um período de 24h (Figura 19b). O tratamento térmico de queima foi realizado em forno industrial com temperatura de 940°C (rever curva da Figura 15), seguindo o procedimento descrito na seção 4.1.2 da Etapa I, onde todas as argilas foram queimadas numa mesma condição. A Figura 19c mostra de forma visual a coloração das argilas durante do processo de fabricação, especialmente na etapa de queima em função do teor de ferro e do ambiente geológico.

Figura 19 - Corpos de prova das argilas estudadas após o processo de: (a) extrusão; (b) secagem e (c) queima.



Fonte: Autor, 2024.

Por fim, todos os corpos-de-prova das sete argilas obtidos na etapa de queima passaram por análises colorimétricas para avaliação de cor de acordo com o procedimento descrito em 4.1.2 da Etapa I. Além dos parâmetros L^* , a^* e b^* , nessa etapa buscou-se avaliar a variável ΔE^* , que quantifica a diferença de cor entre a amostra analisada e um padrão de referência, conforme a equação 1. Neste caso em específico se usou como

base a média dos espectros obtidos na Etapa I, considerando o diagnóstico das massas cerâmicas da região do APL-CVMF.

$$\Delta E * = [(\Delta L *)^2 + (\Delta a *)^2 + (\Delta b *)^2]^{1/2} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

$\Delta E *$ = tolerância cromática;

$(\Delta L *) = (L_i - L_f)$;

$(\Delta a *) = (a_i - a_f)$;

$(\Delta b *) = (b_i - b_f)$;

Para avaliar o efeito do processo de queima na cor do produto final, a argila A0 foi usada como padrão – uma vez que esta matéria prima é a base da região para a fabricação de telhas e tijolos brancos e mesclados, corpos de prova foram queimados em um forno contínuo (Figura 20) de cerâmica vermelha tradicional (atmosfera oxidante) com temperatura máxima de 939°C e ciclo de queima de 24h, conforme Figura 21 e comparados com a queima em forno garrafão (atmosfera redutora) já explicado anteriormente na Etapa I.

Figura 20 - Forno contínuo industrial usado para queima com atmosfera oxidante com ciclos térmicos de 939°C e 24 h, mostrando detalhes da estrutura interna, fornalha carregamento de pó de serra.

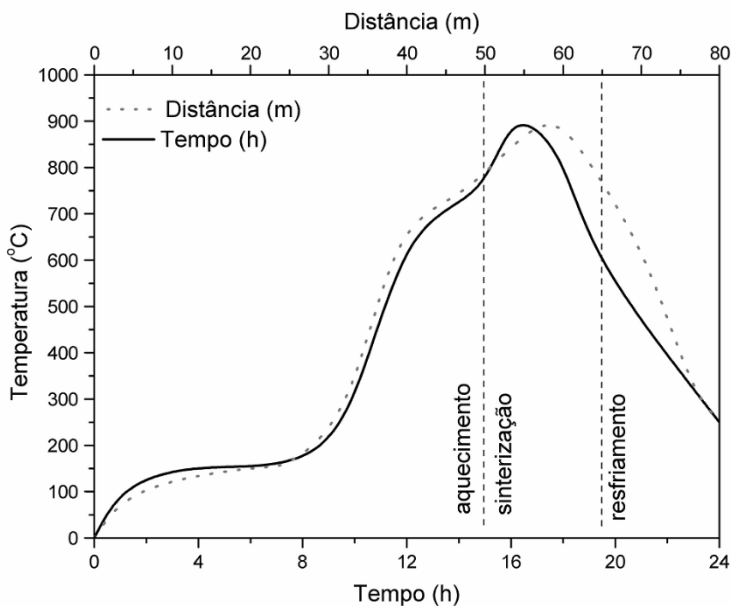


Fonte: Autor, 2024

Desta forma, tornou-se possível comparar o tratamento térmico tradicional com o tratamento aplicado à cerâmica estrutural de coloração branca (queima redutora). Para este estudo comparativo foram aplicados a análise de cor por meio de ensaios de colorimetria.

A Figura 21 mostra o ciclo de queima em um forno contínuo de 80 metros de comprimento, onde o calor é gerado com o pó de serra como fonte de combustível colocado nas fornalhas laterais de forma automática. Em geral, neste tipo de forno, a curva de queima é definida relacionando a temperatura com a distância ao longo do forno. No entanto, para possibilitar uma comparação mais efetiva com o forno de atmosfera redutora utilizado na queima de telhas e tijolos brancos ou mesclados, optou-se por analisar a relação entre a temperatura e o tempo de queima em horas.

Figura 21 - Curva de queima em forno industrial com atmosfera oxidante realizado nesse estudo, com ciclos térmicos de 939°C e 24h.



Fonte: Autor, 2024

Na etapa de aquecimento também se tem a eliminação de água na temperatura de 200°C. Também se verifica que entre 350 a 650°C ocorre a combustão das substâncias orgânicas e entre 450 e 650°C a eliminação

da água de constituição que está quimicamente ligada à estrutura molecular ou cristalina dos minerais utilizados. A partir de 700°C acontece a decomposição dos carbonatos (Oliveira, 2013). A principal diferença está na etapa de sinterização que ocorreu de forma rápida (em torno de 3 horas) e com a presença de oxigênio. Por fim, aconteceu o resfriamento em 650°C onde se teve o reaproveitamento do calor do forno para os secadores para finalização do processo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DIAGNÓSTICO CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA

Os resultados obtidos na primeira etapa - diagnóstico cerâmica estrutural de coloração branca, representam o levantamento das propriedades e características das massas utilizadas na região do APL-CVMF e servirão como uma referência técnica para o perfil das massas cerâmicas.

5.1.1 Análise química

Os óxidos encontrados nas massas de referências estudadas são apresentados na Tabela 2;

Tabela 2- Composição química das massas cerâmicas, obtidos por espectrometria de fluorescência de raio-X.

Massas	% Óxidos											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	P.F.
C1	73,40	14,10	0,65	0,16	2,36	1,38	0,13	0,22	0,01	0,08	<0,05	7,49
C2	76,21	12,25	0,59	0,14	2,05	1,35	0,12	0,11	0,01	0,09	<0,05	7,05
C3	69,65	15,72	0,81	0,16	3,27	1,34	0,12	0,31	0,01	0,07	<0,05	8,51
C4	71,63	15,66	0,64	0,07	2,53	1,25	0,09	0,24	<0,01	0,08	<0,05	7,80
C5	71,32	15,72	0,49	0,06	2,43	1,26	0,11	0,16	0,01	0,07	<0,05	8,35
C6	70,19	16,34	0,88	0,09	2,45	1,26	0,13	0,26	0,01	0,07	<0,05	8,28
C7	71,84	14,44	0,77	0,10	2,38	1,26	0,15	0,19	0,01	0,07	<0,05	8,77
C8	70,25	15,75	0,63	0,17	2,41	1,33	0,13	0,21	0,01	0,07	<0,05	9,00
C9	70,28	16,07	0,42	0,05	2,30	1,40	0,11	0,17	0,01	0,08	<0,05	9,08
C10	73,17	14,27	0,54	0,08	2,51	1,37	0,11	0,17	0,01	0,08	<0,05	7,67
Média	71,8	15,0	0,6	0,1	2,5	1,3	0,1	0,2	0,0	0,1	<0,05	8,2
Limite Superior	76,2	16,3	0,9	0,2	3,3	1,4	0,2	0,3	0,0	0,1	<0,05	9,1
Limite Inferior	69,7	12,3	0,4	0,1	2,1	1,3	0,1	0,1	0,0	0,1	<0,05	8,5

P.F.: Perda ao fogo

Fonte: Autor, 2023

É possível observar na caracterização química das dez massas analisadas composições típicas de argilominerais utilizados na fabricação

de cerâmica para fabricação de telhas e tijolos, com teores dos compostos químicos formados pelo somatório de alumino-silicatos variando 85,37% a 87,44% (Macedo *et al.*, 2008).

Considerando a classificação aplicada as massas de cores claras com base em valores de até 3% de ferro (Dondi; Raimondo; Zanelli, 2014), os resultados ilustram valores de Fe_2O_3 dentro desse teor, tendo apenas C3 com um conteúdo na ordem dos 3,27%.

Aos demais óxidos que apresentaram teores <1%, seus teores estão bastante próximos entre si evidenciando similaridade nas características químicas das massas, o que está associado pela geologia das argilas empregadas nos processos.

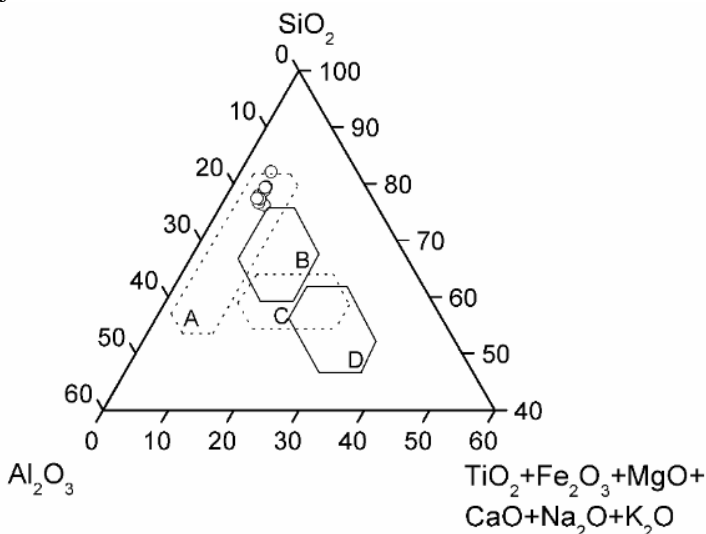
A perda ao fogo (P.F) que corresponde principalmente perda de água de constituição do argilomineral, decomposição da matéria orgânica e de carbonatos apresentaram uma variação de 7,05% a 9,00%, valores típicos de cerâmica estrutural (Rodrigues *et al.*, 2019). Além disso, a matéria orgânica presente nas massas quando exposta em forno de redução pode ajudar a eliminar o oxigênio de certos compostos metálicos, ao impedir a formação de óxidos que conferem cores mais vermelhas como o óxido de ferro (Damiani *et al.*, 2001).

Uma outra forma de apresentar a análise química é considerando a influência dos óxidos na coloração das massas. O primeiro diagrama ternário (Figura 22) constituídos em parâmetros químicos, detalha a sílica, alumínio e cromóforos mais fundentes, comparando dados com as argilas utilizadas em revestimentos cerâmicos, que pode se tornar um indicativo de tendência para a cerâmica estrutural de coloração branca (Dondi; Fabbri; Sistu, 1995; Fiori *et al.*, 1989). Já o segundo diagrama (Figura 23) compara as massas em função do triaxial cálcio-ferro-alumínio, que são componentes importantes para a coloração (Maged *et al.*, 2023). Embora o gráfico tenha sido gerado com base em dados de queima tradicional (realizada em atmosfera oxidante), ele foi utilizado para analisar as massas cerâmicas dessa primeira etapa, permitindo entender como a presença e a proporção desses óxidos influenciam a coloração das amostras.

Considerando a Figura 22 observa-se que as dez massas de cerâmica estrutural de coloração branca (C1 a C10) são distribuídas dentro do campo de ladrilhos grés de cor branca. Este resultado evidencia a eficácia das matérias-primas oriundas do APL-CVMF na formulação das massas cerâmicas estudadas, visto que apresentam baixo teor de cromóforos e uma alta proporção de SiO_2 e Al_2O_3 . A alumina pode favorecer uma coloração mais próxima as tonalidades do branco (Strazzera; Dondi; Marsigli, 1997) e destaca como a análise química

influência nas propriedades estéticas e funcionais dos produtos. Vale ressaltar que, nos revestimentos cerâmicos, a coloração é fundamental, pois impacta tanto na estética quanto na percepção do produto, e o mesmo pode-se aplicar à produção de telhas e tijolos de coloração branca, devido a necessidade da tonalidade que se deseja obter. Assim, a comparação entre esses dois processos é pertinente, pois as argilas do APL-CVMF utilizadas nas formulações das massas cerâmicas se destacam pela sua alta qualidade e uniformidade da cor no produto final.

Figura 22 – Composição química distribuída no diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 - $\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, das massas estudadas em comparação com as matérias-primas utilizadas pelos fabricantes de azulejos italianos.



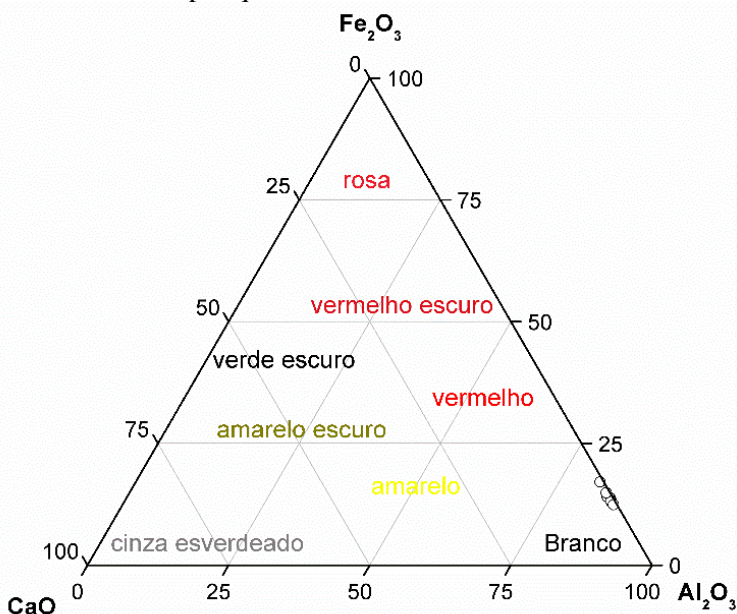
Os campos referem-se a argilas para ladrilhos de gres (A = corpos brancos, B = corpos vermelhos) e ladrilhos porosos (C = cottoforte, D = majórca).

Fonte: Adaptado de Fiori et al., 1989 e Dondi; Fabbri; Sistu, 1995

Avaliando a Figura 23 em função da cor, observa-se no diagrama ternário que todas as massas estão muito próximas entre si e da coloração branca. Isso ocorre devido a dois fatores, a origem geológica das matérias primas, que são todas muito próximas entre si (ocasionando uma baixa variação de suas propriedades), e ao elevado percentual de alumínio (Al_2O_3) presente nas massas, que favorece a coloração branca. O óxido de cálcio (CaO) também pode influenciar a cor, mas em combinações com

altas concentrações alumínio, a coloração resultante ainda tenderia a tons mais claros. O óxido de ferro (Fe_2O_3) que seria um dos principais limitadores da coloração branca devido as suas propriedades de escurecimento, tem pouca influência nesse caso, pois está em baixas concentrações (Maged *et al.*, 2023).

Figura 23 – Representação das amostras C1 a C10 distribuídas em diagrama ternário Fe_2O_3 - Al_2O_3 - CaO mostrando diferenças de cores da cerâmica vermelha após queimados.



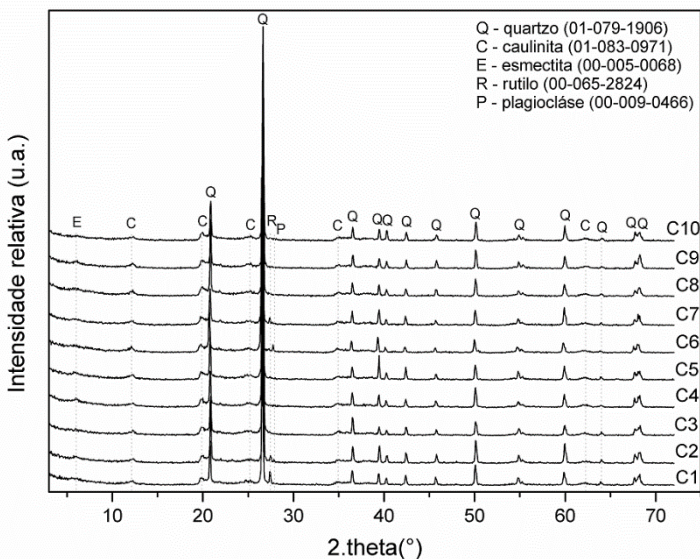
Fonte: Adaptado de Piltz, 1964

Por fim, ressalta-se que a construção de diagramas como estes servem para indicar, em um sistema tradicional de queima (oxidante), um perfil de referência das massas cerâmicas estudadas em função dos principais óxidos que influenciam na coloração lembrando que uma atmosfera redutora, tende a não intensificar a coloração, pois a redução dos óxidos cromóforos pode resultar em tonalidades mais claras quando comparadas com atmosfera redutora.

5.1.2 Análise mineralógica

Os óxidos dos elementos químicos mostrados na Tabela 2, em sua forma mais estável, estão presentes nas fases cristalinas identificadas no difratograma de raios X da Figura 24 para as massas estudadas.

Figura 24 – Difratograma de raios X das massas cerâmicas de referência para o estudo de diagnóstico.



Fonte: Autor, 2023.

Em todas as amostras, observa-se a presença de quartzo (SiO_2 , cartão JCPDS nº 01-079-1906) e do argilomineral caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, cartão JCPDS nº 01-083-0971) e em alguns casos a esmectita ($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$, cartão JCPDS nº 00-005-0068) que são basicamente encontrados nos argilominerais utilizados para cerâmica vermelha na região de estudo (Benedet *et al.*, 2024; Rebelo *et al.*, 2024; Zaccaron *et al.*, 2020). Além desses, a amostra C6 apresentou feldspato plagioclásio ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$, cartão JCPDS nº 00-009-0465). O que se assemelha em todas as amostras, é a presença de rutilo (TiO_2 , cartão JCPDS nº 00-065-2824), que não é comumente encontrado nos produtos de cerâmica vermelha tradicional. Esse mineral tende a contribuir para a coloração clara obtida após a queima, este

comportamento pode ser atribuído à alta estabilidade térmica e à capacidade do TiO_2 de refletir a luz visível (Baltar *et al.*, 2008). Em contrapartida, as cerâmicas vermelhas tradicionais, podem conter a hematita (Fe_2O_3), o que leva a contribuir no desenvolvimento da coloração avermelhada (Saviatto *et al.*, 2023).

5.1.3 Análise propriedades físicas

As propriedades físicas como umidade, resíduo bruto e plasticidade estão interligadas, influenciando principalmente na etapa de extrusão e nas propriedades finais do produto cerâmico. Na Tabela 3, observa-se os dados obtidos das propriedades físicas das massas.

Tabela 3- Teores de umidade de extrusão (U), resíduo bruto (RB), limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP) das massas estudadas.

Massa	%		Plasticidade		
	U	RB	LL	LP	IP
C1	16,75	15,78	44,21	26,12	18,09
C2	17,35	22,56	34,36	19,13	15,23
C3	20,80	22,76	58,72	24,09	34,63
C4	21,52	16,93	48,64	27,9	20,74
C5	17,32	20,55	47,85	18,85	29,00
C6	18,25	18,17	51,2	24,67	26,53
C7	18,36	18,32	43,89	30,83	13,06
C8	21,25	11,99	37,42	29,64	7,78
C9	22,21	10,975	52,99	23,01	29,98
C10	20,03	18,42	40,08	21,23	18,85

Fonte: Autor, 2024

As umidades de extrusão das massas apresentadas na Tabela 3 variou de 16,75% a 22,21%, resultando em um range de 5,46%. A umidade pode interferir na cor se não tiver uma secagem efetiva, levando ao aparecimento de acúmulo de vapor ou “fumaça de água” que pode afetar a integridade e a cor da cerâmica após a queima (Borgert, 1999).

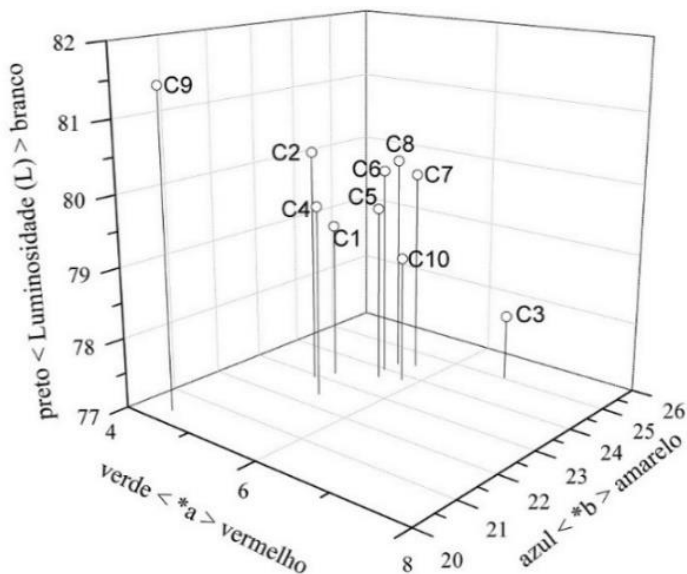
Os valores de resíduo bruto (RB, Tabela 3) da maioria das massas (variação de 10,97% a 22,76%) não estão próximos ao range recomendado por Oliveira (2013) de 10% a 15%, no entanto mesmo algumas indústrias trabalhando com resíduos fora do ideal, ainda conseguem produtos de boa qualidade ao interferirem em outras etapas do processo.

Já para os dados de plasticidade, os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) variaram de 34,36 a 58,72%, e de 18,85 a 30,83%, respectivamente, enquanto o índice de plasticidade (IP) situou-se entre 7,78 e 34,63%. Com base em dados da literatura (Macedo et al., 2008) verifica-se que a maioria dos valores obtidos estão dentro dos valores típicos para cerâmica vermelha, 30 a 60% para o LL, 15 a 30% para o LP e 10 a 30% para o IP. Essa propriedade influencia na retração e resistência mecânica após secagem (Oliveira, 2013) e na cor, já que argilas de alta plasticidade, principalmente caulínicas, podem resultar em materiais de queima branca ou quase branca (Wilson, 1998).

5.1.4 Análise colorimétrica

Na Figura 25 tem-se ilustrado os resultados da análise colorimétrica das dez amostras das massas estudadas.

Figura 25 – Análise colorimétrica das massas composicionais (C1-C10) estudadas do APL-CVMF.



Fonte: Autor, 2024

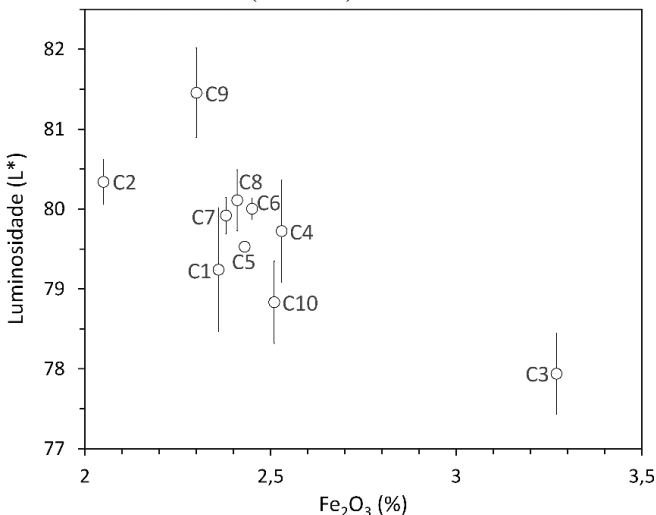
Observa-se que a luminosidade (L^*) das amostras variou entre 77 e 81, indicando predominância das cores claras, além de uma maior concentração próximo a 80, o que evidencia a tendência de as massas cerâmicas utilizadas na fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca terem tons muito próximos do branco.

Os valores de a^* (verde/vermelho) têm uma maior variação entre 5 a 7, demonstrando uma leve tendência para o vermelho, porém, em teores bastante baixos.

Os valores de b^* (azul/amarelo) variaram entre 20 e 25, apontando uma prevalência de tons amarelados para essa coordenada. De maneira geral, as massas estudadas tem uma padronização de cor, atribuída a origem geológica das matérias primas estarem localizadas na mesma região e pelo processamento térmico artesanal ser muito parecido apesar de suas variações processuais.

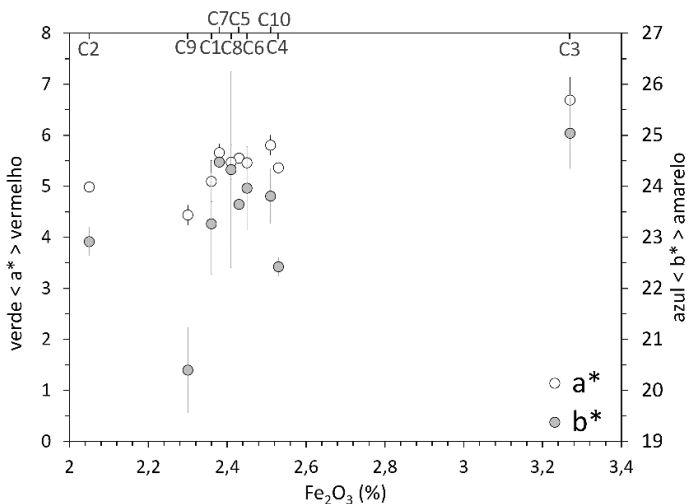
As quantidades de cromóforos, como íons de metais de transição Fe^{2+} e Fe^{3+} presentes em massas cerâmicas influenciam na absorção ou reflexão de luz em determinadas faixas do espectro visível, influenciando a cor do material. A correlação entre os cromóforos presentes nas massas e os parâmetros de colorimetria são ilustrados nas imagens da Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a luminosidade (L^*) das massas estudadas (C1-C10).



A Figura 26 mostra a relação entre o Fe_2O_3 com a luminosidade, indicando que quanto menor a quantidade desse óxido mais alto será o valor L^* , influenciando em uma coloração mais clara e que esta geralmente associada a uma menor concentração de cromóforos. A massa C2, apesar de ter uma menor quantidade de ferro, não apresenta o maior valor de L^* , em comparação com a massa C9, que possui o maior valor de luminosidade. Isso pode estar relacionado à presença de outros óxidos nas massas, como a alumina (Al_2O_3). A massa C9 contém uma quantidade maior de Al_2O_3 (16,07%) em comparação ao C2 (12,25%), que pode afetar a cor criando maior opacidade ou refletância.

Figura 27 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a cromacidade (a^* e b^*) das massas composicionais de referência (C1-C10).



Fonte: Autor, 2025

A Figura 27 por sua vez, ilustra os valores dos espectros a^* e b^* que auxiliam a identificar a tonalidade da cor, assim uma maior concentração de ferro revela uma tendência a cor vermelha para a^* e uma predominância da cor amarela para b^* para todas as massas.

5.2 ANÁLISE DAS FONTES MINERAIS ALTERNATIVAS PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA ESTRUTURAL DE COLORAÇÃO BRANCA

Os resultados da segunda etapa do estudo correspondem a análise de fontes minerais alternativas para o potencial uso na fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca.

5.2.1 Análise química

Os óxidos encontrados nas fontes minerais estudadas são apresentados na Tabela 4. A seleção dessas argilas foi baseada em sua localização geológica dentro do APL-CVMF, bem como no percentual de cromóforos presentes.

Tabela 4 - Composição química das fontes minerais, obtidos por espectrometria de fluorescência de raios X.

Material	% Óxidos											P.F.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	
A0	67,21	18,16	0,48	0,08	3,06	1,64	0,19	0,32	<0,01	0,11	<0,05	8,72
AP	68,23	16,11	0,75	0,05	5,07	1,62	0,19	0,35	0,01	0,09	<0,05	7,50
A1	65,50	14,97	1,09	0,09	8,49	1,40	0,28	0,54	0,01	0,12	<0,05	7,50
A2	73,90	13,72	1,92	0,09	3,31	0,75	0,05	0,23	<0,01	0,07	<0,05	5,93
A5	71,89	17,24	1,72	0,04	1,89	0,65	0,04	0,37	<0,01	0,06	<0,05	6,07
A8	74,66	15,95	1,89	0,10	1,70	0,53	0,05	0,11	0,01	0,06	<0,05	4,92
A9	79,42	8,87	0,26	0,05	4,99	0,72	0,04	<0,02	<0,01	0,07	<0,05	5,60
Média	71,54	15,00	1,16	0,07	4,07	1,04	0,12	0,32	0,01	0,08	<0,05	6,61
Limite Superior	79,42	18,16	1,92	0,04	8,49	1,64	0,28	0,54	0,01	0,12	<0,05	8,72
Limite Inferior	65,50	8,87	0,26	0,10	1,70	0,53	0,04	<0,02	0,01	0,06	<0,05	4,92

P.F.: Perda ao fogo

Fonte: Autor, 2023

A argila base utilizada para a fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca (A0) está contida na mesma localização geológica das argilas A1 e AP. Observa-se pela análise química que o óxido de ferro apresenta uma maior variação entre os três materiais, sendo a argila base (A0) 3,06% tendendo a coloração mais clara, e as outras duas (AP e A1) com valores maiores, 5,07% e 8,49% respectivamente. Isso pode acontecer por uma série de fatores, como camadas de solo, condições hidrológicas ou influência da matéria orgânica, sendo o primeiro mais predominante neste caso, onde a argila com maior concentração de ferro

está na maior profundidade do solo, tendendo a coloração mais escura (Silva Neto *et al.*, 2008). Ainda sobre os cromóforos, observa-se uma tendência em aumento no titânio de 1,40% para 1,64% com a diminuição do ferro que pode auxiliar na tonalidade mais clara.

Essas três matérias primas apresentam praticamente a mesma variação de alumino-silicatos, com o SiO_2 entre 65% e 68% e Al_2O_3 entre 15% e 18%, seguindo a tendência de diminuir o percentual em relação a profundidade da jazida. A ocorrência de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) e alcalinos terrosos (MgO e CaO) que influenciam na fundência, como os outros óxidos, foram muito próximas, evidenciando a homogeneidade região geológica para esses óxidos.

Salienta-se que as argilas A8 e A9 também são de mesma região geológica e de várzea, porém são completamente diferentes entre si, além de não seguirem a mesma tendência com o ferro em relação a profundidade, sendo a menor profundidade (A9) 4,99% de Fe_2O_3 , enquanto a de maior profundidade (A8) tem apenas 1,70% desse óxido, isso pode ter ocorrido em função dos bolsões existentes que tem grande variação entre si.

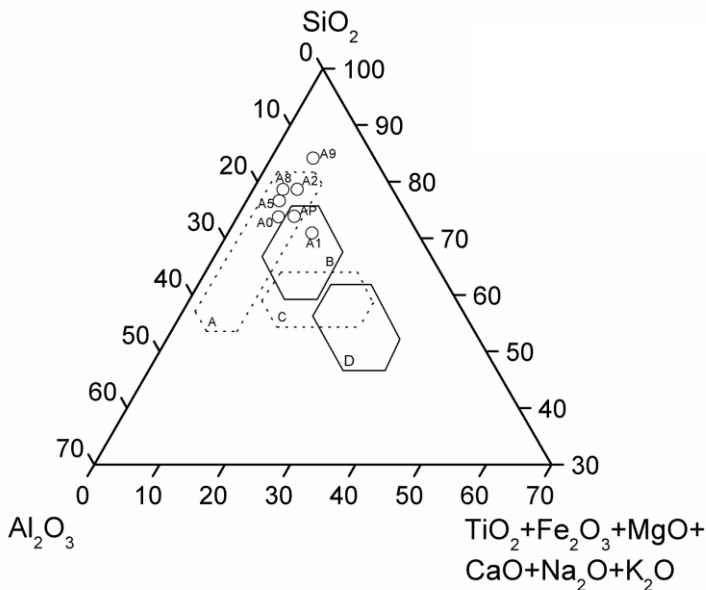
Já as argilas A2 e A5 que são comumente chamadas argila de morro, foram analisadas principalmente pelo teor de Fe_2O_3 , juntamente com as amostras A0 e A8, sendo as argilas que obtiveram uma tonalidade mais clara após conformada/seca. Além disso o maior percentual de Al_2O_3 na argila A5 (17,24%) também pode contribuir para a formação de fases cristalinas brancas, como a mulita, que pode clarear a coloração da cerâmica após a queima (Medeiros *et al.*, 2016).

A ocorrência de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) também foi mais predominante nas argilas A5 e A8, o que ajuda no processo de clareamento, já que ao atuar como fundente na sinterização facilita a formação de uma matriz vítrea que pode resultar em uma aparência mais clara (Eppler, 2002). Os alcalinos terrosos (MgO e CaO) e os outros óxidos restantes, ficaram com valores menores, não evidenciando influencia na cor (Pracidelli, 2008).

A perda ao fogo de todas as argilas pode ser correlacionada com a perda de água de constituição do argilomineral, decomposição da matéria orgânica e de carbonatos ficou entre 4,92% a 8,72%, valores típicos de cerâmica vermelha (Savazzini-Reis; Della-Sagrillo; Díaz, 2016). É preciso salientar que elevados teores de matéria orgânica tendem a auxiliar na redução da atmosfera no forno, ocasionando os fenômenos necessários para a não oxidação do ferro, que tende a potencializar a cor vermelha (Damiani *et al.*, 2001).

A Figura 28 que mostra o diagrama da correlação entre os principais óxidos que apresentam mais correlação com cor e os parâmetros utilizados em matérias-primas de fabricantes de azulejos italianos, o que indica que a maioria das argilas está dentro do parâmetro A - corpos de cor clara (Dondi; Fabbri; Sistu, 1995; Fiori *et al.*, 1989).

Figura 28 - Composição química distribuída no diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 - $\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, das fontes minerais estudadas em comparação com as matérias-primas utilizadas pelos fabricantes de azulejos italianos.



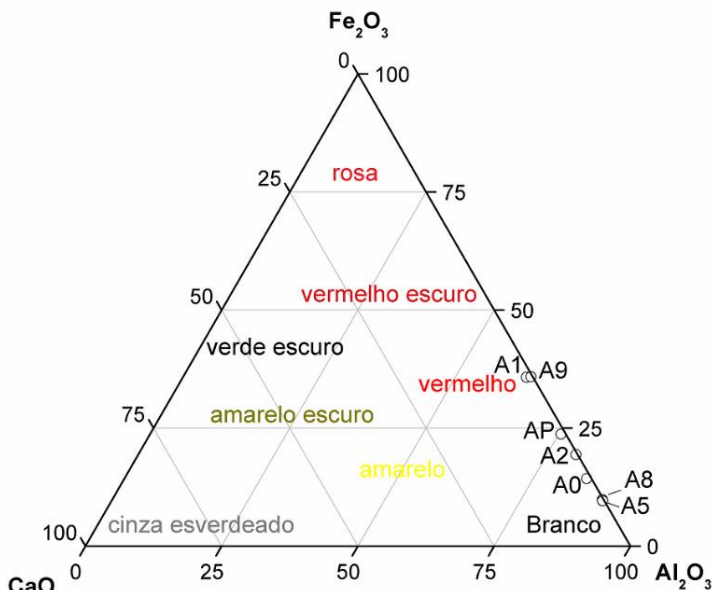
Os campos referem-se a argilas para ladrilhos de grés (A = corpos brancos, B = corpos vermelhos) e ladrilhos porosos (C = cottoforte, D = majórca).

Fonte: Adaptado de Dondi; Fabbri; Sistu, 1995; Fiori *et al.*, 1989

A Figura 29 ilustra como a presença de ferro, alumínio e cálcio influencia a coloração dos materiais cerâmicos, destacando variações que vão desde o branco ao amarelo e ao vermelho. Observa-se que as argilas analisadas estão distribuídas principalmente nas regiões entre Al_2O_3 - Fe_2O_3 , devido ao baixo teor de CaO nas argilas. A0 que é a base das massas de referência, ficou basicamente na mesma região que as formulações estudadas na Etapa I. Já as argilas A8 e A5, devido ao baixo percentual de Fe_2O_3 ficaram mais próximo ao vértice da Al_2O_3 , e ilustram

naturalmente cores claras. As argilas AP e A2 por sua vez, apresentaram teores intermediários de Fe_2O_3 (na ordem de 5,07% e 3,31% respectivamente), e no balanço de massa ficaram mais na zona que leva ao vermelho (Maged *et al.*, 2023).

Figura 29- Representação das amostras A0, AP, A1, A2, A5, A8 e A9 (fontes minerais estudadas) distribuídas em diagrama ternário Fe_2O_3 - Al_2O_3 -CaO mostrando diferenças de cores da cerâmica vermelha após queimados



Fonte: Adaptado de Piltz, 1964

É preciso salientar, que a argila A9, apesar de sua classificação marginalmente apontada no parâmetro de corpos brancos (Figura 28), apresentou tendência ao vermelho se observado no diagrama da Figura 29. Esse arranjo pode ser atribuído ao elevado teor de SiO_2 (79,42%, ver Tabela 4) que está majoritariamente em forma de quartzo, que pode ter mascarado as características dos cromóforos, que influencia a tonalidade final dos materiais.

Por fim, a argila A1 que está localizada no parâmetro B (Figura 28, corpos vermelhos), ficou na mesma zona que A9 no diagrama ternário Fe_2O_3 - Al_2O_3 -CaO (Figura 29). Esse resultado é consistente com sua

composição química, por ter a maior soma de cromóforos e matérias fundentes, totalizando 11,89%. Essa diferença de comportamento reforça a necessidade de reformular os indicadores utilizados (que são baseados em argilas para a fabricação), considerando as particularidades das argilas da região do APL-CVMF.

Além disso, o diagrama sugere que a interação entre cálcio e alumina também pode influenciar nas variações de tonalidade. Embora o cálcio não seja predominante nas amostras analisadas, ele tende a deslocar as cores para tons amarelados ou esverdeados em concentrações mais altas (Maged *et al.*, 2023).

5.2.2 Análise sais solúveis

Observou-se na Tabela 5 uma alta variação no percentual de sais solúveis (1,8% a 16,9%), onde as argilas A0, AP e A1 que estão juntas na mesma região geológica (cavas alagadas) apresentam o fenômeno de eflorescência (

Figura 30), mesmo que apenas A0 e A1 apresentaram os maiores valores de sais, em função do sódio e cálcio que estão associados à formação de cristais salinos na superfície. Esses dados indicam que a quantidade de sais solúveis sozinho não é um fator determinante para a ocorrência desse fenômeno nas amostras (Menezes *et al.*, 2006).

Tabela 5 - Valores de sais solúveis presentes nas argilas estudadas

Material	Sais solúveis				Total
	Na ⁺¹	K ⁺¹	Mg ⁺²	Ca ⁺²	
A0	0,035	0,003	0,026	0,104	0,169
AP	0,007	0,003	0,001	0,007	0,018
A1	0,040	0,022	0,008	0,017	0,087
A2	0,010	<0,001	0,021	0,045	0,077
A5	0,031	0,009	0,009	0,031	0,080
A8	0,013	0,011	<0,001	<0,001	0,026
A9	0,014	0,003	0,001	0,005	0,023

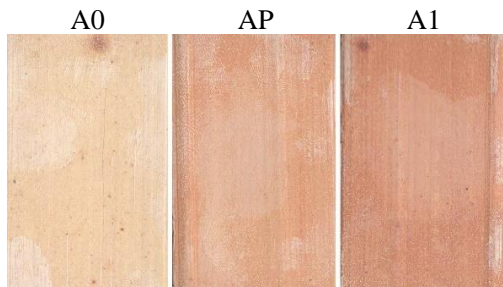
Fonte: Autor, 2023

A Figura 30 ilustra a aparição de eflorescência nas argilas A0, AP e A1, isso pode ter ocorrido pois as peças foram secas de maneira natural com uma umidade ambiente elevada, que ajuda no aumento da solubilidade dos sais, facilitando sua migração para a superfície através da ação capilar.

Em condições úmidas, as taxas de evaporação são mais lentas, o que proporciona aos sais dissolvidos um tempo maior para se acumularem

na superfície do material (Umama *et al.*, 2024). Isso mostra que é necessário um melhor controle na etapa de secagem, utilizando estufas e secadores além de técnicas adequadas para minimizar a umidade.

Figura 30- Imagens fotográficas das amostras de argila (A0, A1 e AP) com sinais de eflorescência.



Fonte: Autor, 2024

5.2.3 Análise mineralógica

Pela Tabela 6 observa-se os valores quantitativos de minerais encontrados nas argilas estudadas. Tem-se a presença de quartzo em todas as amostras, principalmente na argila A9 (67%), que justifica o mascaramento das características dos cromóforos (como oxihidróxidos de ferro). O quartzo, considerado como inerte até determinadas temperaturas de queima, não contribui para a coloração, mas influencia a fusão e pode impactar a tonalidade final ao minimizar o efeito visual de outros minerais. Isso reforça a discrepância observada no diagrama da Figura 28.

Dentre os argilominerais se destaca a presença da caulinita que tem os maiores percentuais nas argilas A0, AP e A1, que pode vir a influenciar principalmente na plasticidade (Vieira; Pinheiro, 2011).

Os oxihidróxidos de ferro, principais possíveis responsáveis pela coloração avermelhada, são mais abundantes na argila A1 (9%), o que pode ocasionar tonalidade vermelha após a queima mesmo em atmosferas redutoras. Por outro lado, argilas como A0, A5 e A8 possuem baixos teores desses minerais (2-3 %), o que justifica suas cores mais claras, especialmente em combinação com a proporção de quartzo.

O rutilo, mesmo que em baixos teores (1-2%) nas argilas, quando juntos com baixos teores de ferro, podem influenciar na tonalidade, além de impactar outras propriedades, como o brilho e a opacidade (Feltrin *et al.*, 2013).

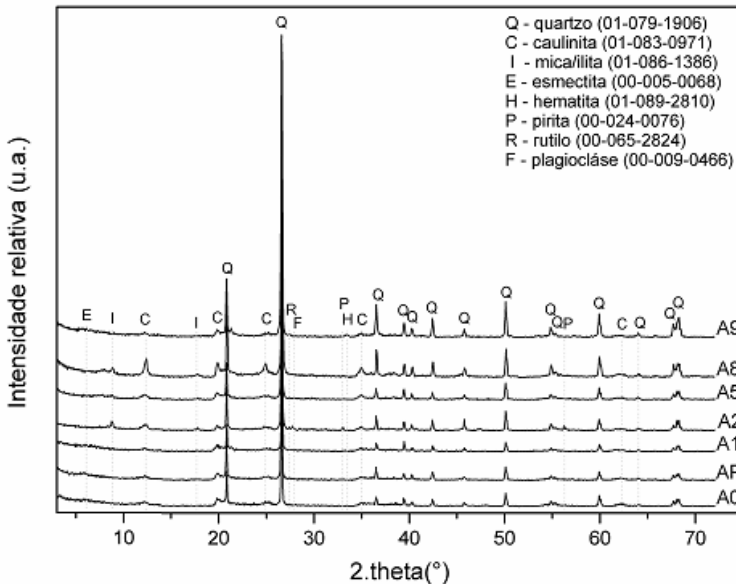
Tabela 6 – Quantificação das fases mineralógicas das sete argilas caracterizadas.

Minerais (%)	Argilas						
	A0	AP	A1	A2	A5	A8	A9
Ilita	6	9	-	26	15	16	3
Caulinita	40	32	37	16	29	24	17
Esmectita	4	4	3	-	2	1	5
oxihidróxidos de ferro	3	6	9	4	2	2	2
Plagioclásio	-	-	-	1	-	1	-
Quartzo	43	46	47	51	51	55	67
Rutilo	2	2	1	1	1	1	1
Acessórios	2	1	3	2	1	1	1

Fonte: Autor, 2023

A quantificação mostrada na Tabela 6 é muito próxima ao que foi apresentado na Figura 31, que mostra os óxidos em sua forma mais estável, presentes nas fases cristalinas identificadas no difratograma de raios X.

Figura 31 - Difratograma de raios X das argilas esudadas.



Fonte: Autor, 2023

Onde observa-se a presença de quartzo (SiO_2 , cartão JCPDS nº 01-079-1906) e dos argilominerais caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, cartão JCPDS nº 01-083-0971), esmectita ($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$, cartão JCPDS nº 00-005-0068) e illita ($(\text{K,H}_3\text{O})(\text{Al, Mg, Fe})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$ JCPDS nº 01-086-1386) que são basicamente encontrados nos argilominerais utilizados para cerâmica vermelha na região de estudo (Benedet et al., 2024; Rebelo et al., 2024; Zaccaron et al., 2020). Além desses, algumas amostras apresentaram feldspato plagioclásio ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$, cartão JCPDS nº 00-009-0465), pirita (FeS_2 cartão JCPDS nº 00-024-0076). Também se tem a presença dos cromóforos: rutilo (TiO_2 , cartão JCPDS nº 00-065-2824) e hematita (Fe_2O_3 , cartão JCPDS nº 01-089-2810) que ajudam a influenciar na coloração dos materiais (Saviatto et al., 2023).

5.2.4 Análise propriedades físicas

É possível observar as umidades *in natura* das argilas na Tabela 7, elas tiveram um alto valor ficando entre 18,69% a 32,15%. A umidade *in natura* está associada ao processo de mineração e principalmente a origem dos materiais. As argilas A0, AP, A1, A8 e A9 são de cavas alagas, por isso tiveram os percentuais mais altos, já as argilas A2 e A5 são de morro, e tiveram os menores teores. A umidade *in natura* influencia principalmente na etapa de extrusão Oliveira (2013), mas de forma individual não provoca alteração na coloração final dos materiais.

Tabela 7 - Teores de umidade de extrusão (U) e resíduo bruto (RB) das argilas estudadas

Material	%	
	U	RB
A0	25,08	4,98
AP	27,15	4,82
A1	32,15	2,62
A2	18,69	40,82
A5	20,90	14,85
A8	24,56	43,23
A9	26,20	54,83

Fonte: Autor, 2024

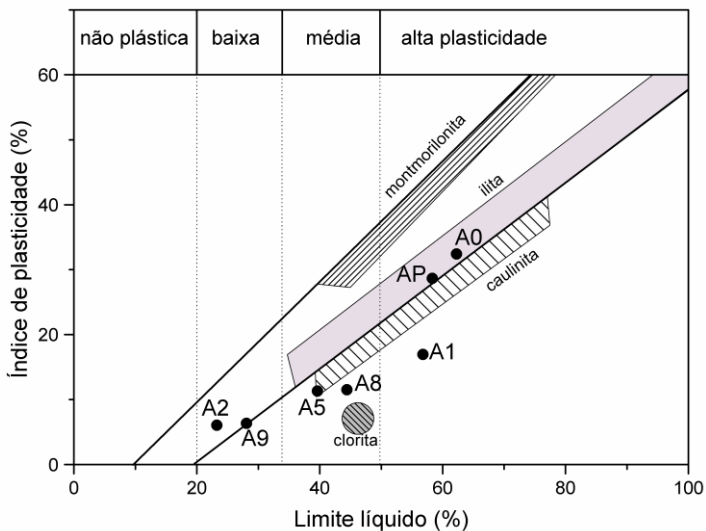
Os valores de resíduo bruto obtidos das argilas (Tabela 7) tiveram uma grande variação, de 2,62% a 54,83%. O resíduo bruto está muito associando aos valores de quartzo, isso é bastante visível na Tabela 6,

onde quanto maior o percentual do elemento, maior o valor do resíduo bruto obtido (Raimundo *et al.*, 2001).

Analisando as amostras com os menores teores de resíduo bruto, percebe-se que as argilas A1 e AP tem uma maior fusão e reatividade durante a queima, o que pode intensificar as cores, devido ao maior teor de ferro. Enquanto a A0 mantém tonalidades mais claras, devido ao alto teor de caulinita e menor presença de ferro.

Por outro lado, as amostras com maiores teores de resíduo bruto têm os menores percentuais de argilominerais e isso pode influenciar em índices de plasticidade menores, dificultando a moldagem da peça cerâmica (Zaccaron *et al.*, 2024).

Figura 32 – Correlação entre o Índice de plasticidade e Limite líquido das argilas estudadas dentro dos limites do APL-CVMF.



Fonte: Autor, 2024

É possível verificar na Figura 32 que as argilas A0, A1 e AP estão no índice de alta plasticidade, influenciado pelo alto valor de argilominerais caulínicas presentes nas amostras, podendo incrementar as plasticidades de formulações de telhas e tijolos servem (Wilson, 1998).

As demais amostras (A2, A9, A5 e A8) apresentam baixa e média plasticidade, respectivamente, devido às altas quantidades de quartzo, um mineral duro e inerte que não contribui para a coesão do material (Raimundo *et al.*, 2001). Isso indica que essas argilas podem ser utilizadas como complemento em formulações cerâmicas, auxiliando

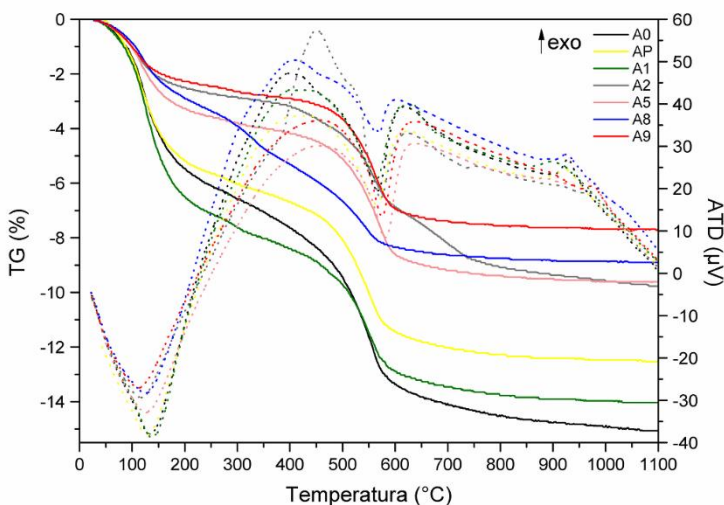
principalmente na etapa de secagem, pois ajudam a minimizar as retrações durante esse processo.

5.2.5 Análise ATD/TG

A análise térmica das argilas estudadas (Figura 33) ilustra uma perda inicial de massa devido à água adsorvida, que ocorreu em até 150~200°C, enquanto entre 200 e 400°C foi observada uma perda de massa devido à desidroxilação de hidróxidos e/ou decomposição de matéria orgânica, exibindo nesse intervalo um pico endotérmico e um segundo exotérmico, caracterizando esses dois eventos respectivamente (Dehou *et al.*, 2012). Nota-se uma perda mais acentuada para A0, AP e A1, devido sua natureza argilosa.

Para A2, é possível observar um pico exotérmico mais notório em ~450 °C, que pode estar associado a provavelmente a matéria orgânica. Posteriormente, até ~600 °C há a perda de massa associada a desidroxilação dos argilominerais, em especial a caulinita, reforçado por um pico endotérmico nessa faixa de temperatura (Wang *et al.*, 2022).

Figura 33 - Análise da ATD/TG das argilas estudadas dentro da região do APL-CVMF.



Fonte: Autor, 2024

É possível salientar que as argilas A2, A5, A8 e A9 estabilizam a massa apresentando uma menor perda a A0, AP e A1. Isso pode estar ligado a menor presença de minerais hidratados, como por exemplo quartzo, que apresenta baixa ou nula perda de peso (Comin *et al.*, 2024) e também a matéria orgânica presente nas argilas. Finalmente, no intervalo de 900 e 1000 °C, um pico exotérmico ocorreu devido à formação de espinélio, também denominada mulita I (Magliano; Pandolfelli, 2010).

Um fator importante está ligado com a sinterização da matéria orgânica, que acontece a partir de 400 °C (Damiani *et al.*, 2001). Teores elevados de matéria orgânica durante a sinterização ocasionam a combustão incompleta no interior do forno, gerando monóxido de carbono, que é determinante na obtenção das tonalidades claras buscadas pelo setor.

Na análise térmica, observa-se que A0, que é usualmente utilizada pelos fabricantes de telhas/tijolos brancos teve maior perda de massa, o que pode estar associado a elevados teores de matéria orgânica, seguidos de AP e A1, que são da mesma região geológica. (Damiani *et al.*, 2001).

5.2.6 Análise colorimétrica

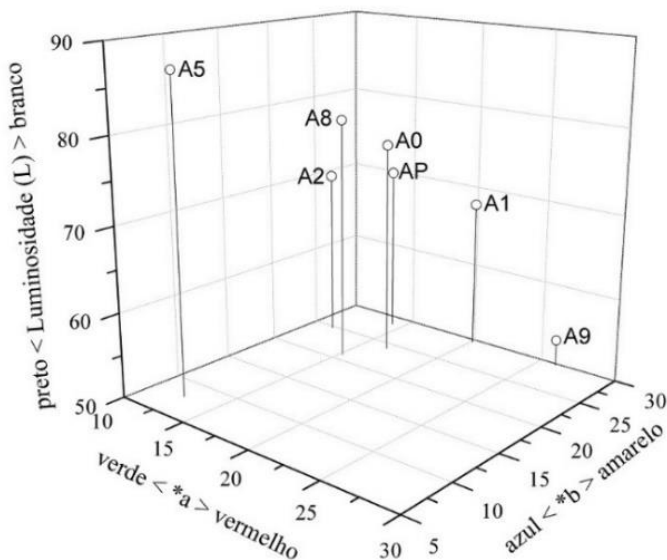
Na Figura 34 tem-se ilustrado os resultados da análise colorimétrica das sete amostras de argilas estudadas.

É possível observar que a luminosidade das argilas variou entre 53 a 86, indicando uma grande variação, sendo que os valores mais próximos da argila padrão (A0) foram as amostras A5 e A8 com valores de 86,97 e 79,25 respectivamente. Esse valor maior se deu em função do menor percentual de ferro apresentado na análise química (Tabela 4), obtendo-se coloração mais clara, comprovando a literatura (Dondi; Raimondo; Zanelli, 2014).

Os valores de a^* (verde/vermelho) tem uma variação entre 11 a 26, demonstrando uma maior tendência para o vermelho, principalmente as argilas A1 e A9 que tem os maiores percentuais de ferro (8,49% e 4,99% respectivamente).

Os valores de b^* (azul/amarelo) variaram entre 20 e 29, entre 6 das 7 amostras apontando uma prevalência de tons amarelados para essa coordenada. A exceção foi a argila A5 que o valor de b^* ficou em 7,83. Analisando todos os parâmetros de colorimetria da amostra A5 percebe-se uma coloração mais branca do que normalmente tem-se em produtos cerâmicos de coloração branco/mesclado.

Figura 34 - Análise colorimétrica das argilas estudadas da região do APL-CVMF.



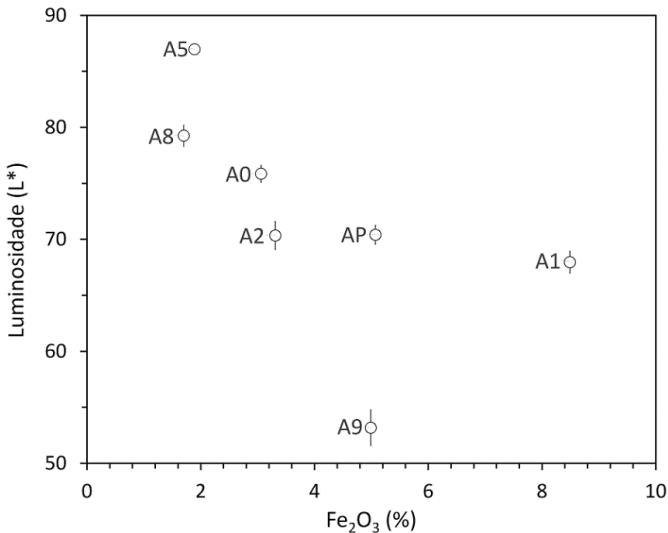
Fonte: Autor, 2024

As imagens das Figura 35 e Figura 36 exemplificam a correlação entre os cromóforos presentes nas argilas e os parâmetros de colorimetria.

A Figura 35 mostra a relação entre o ferro com a luminosidade, indicando que quanto maior a quantidade desse óxido menor será o valor $*L$, influenciando em uma coloração mais escura e que geralmente associada a uma maior concentração de cromóforos que absorvem luz. Uma correlação semelhante pode ser observada no diagnóstico da cerâmica estrutural de coloração branca apresentado na Figura 26, com características próximas às das argilas A0, A5 e A8, que apresentam os menores percentuais de ferro.

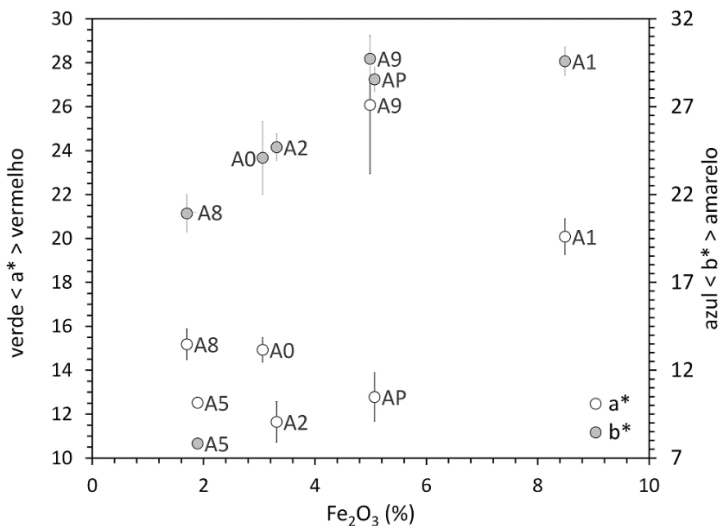
Já a Figura 36 ilustra os valores dos parâmetros a^* e b^* que auxiliam a identificar a tonalidade da cor, assim uma maior concentração de ferro revela uma tendência a cor vermelha para a^* e uma predominância da cor amarela para b^* .

Figura 35 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a luminosidade (L^*) das argilas estudadas.



Fonte: Autor, 2024

Figura 36 - Correlação entre o cromóforo Fe_2O_3 e a cromacidade (a^* e b^*) das argilas estudadas.



Fonte: Autor, 2024

A Tabela 8 apresenta a diferença de cor (ΔE^*) da média dos parâmetros de tonalidade (L^* , a^* e b^*) das amostras de referência do diagnóstico da cerâmica estrutural de coloração branca (ou seja, das massas estudadas na Etapa I da metodologia) e as argilas estudadas (Etapa II da metodologia). A variação no valor de ΔE^* entre as amostras de argilas é de 10,06 a 34,20, indicando uma diferença significativa na tonalidade quando comparado às amostras de referência.

A menor diferença de cor foi observada entre as argilas A0 e A8, com uma variação de ~ 10 , o que as torna mais próximas das amostras de referência, como é evidenciado na análise visual das Figura 12 e Figura 19 após a queima. Por outro lado, o valor de ΔE^* da argila A5 que também teve coloração muito próxima do branco (L^* de 86,97) foi de 18,60, o que representa uma diferença considerável em relação à amostra padrão. Essa diferença pode ser explicada principalmente pelo parâmetro b^* , que na argila A5 apresentou um valor de 7,83, puxando a tonalidade para o azul. Já a amostra de referência tem uma média de ~ 23 nesse parâmetro, o que confere uma tonalidade mais próxima do amarelo.

Tabela 8 - Dados da diferença de cor ΔE^* das argilas em relação ao perfil de referência da região do APL-CVMF.

Material	ΔE^*
A0	10,25
AP	19,75
A1	12,91
A2	11,31
A5	18,60
A8	10,06
A9	34,20

Fonte: Autor, 2024

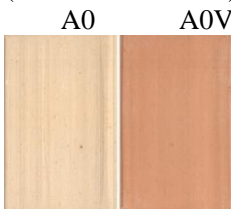
É importante salientar que na cerâmica vermelha hoje não se tem indicadores de tonalidade como ocorre na cerâmica de revestimento por exemplo que usam intervalos de 0,5 a 0,7 no espaço CIELAB (Machado *et al.*, 1997). No processo da cerâmica vermelha a qualidade geralmente se concentra mais em aspectos como resistência mecânica, tamanho e absorção de água. Então os valores conseguidos com esse estudo podem se mostrar promissores como indicadores de tendência em relação a tonalidade.

5.2.6.1 Análise colorimétrica em função do tipo de forno

Para a análise colorimétrica a argila base para a produção de produtos brancos/mesclados, foi queimada em um forno redondo utilizado no processo de queima de coloração branca (A0) e um forno contínuo tradicional da cerâmica vermelha (A0V).

A Figura 37 mostra a comparação visual da diferença de coloração entre as amostras, que ocorreu principalmente devido ao tempo de queima e tipo de atmosfera ao qual as amostras foram expostas, sendo a primeira 157h e atmosfera redutora e a segunda 24h e atmosfera oxidante.

Figura 37 – Análise visual da influência do tipo de forno com base na comparação de imagens das amostras A0 (atmosfera redutora) e A0V (atmosfera oxidante).



Fonte: Autor, 2024

A diferença visual das amostras é comprovada com a análise colorimétrica ilustrada na Tabela 9, principalmente pelos valores de luminosidade que passaram de 75 para 67, evidenciando o escurecimento da peça A0V. Além disso a diferença de cor (ΔE^*) em relação à média do diagnóstico da cerâmica estrutural de coloração branca teve um aumento de 10 para 17 na amostra A0V.

Esses dados demonstram que, para produzir produtos de coloração branca ou mesclada, que é uma característica da região do APL-CVMF, o baixo teor de ferro e o tratamento térmico com atmosfera redutora precisam ser aplicados de forma integrada.

Tabela 9 - Colorimetria das peças A0 (atmosfera redutora) e A0V (atmosfera oxidante).

A0				A0V			
*L	*a	*b	ΔE^*	*L	*a	*b	ΔE^*
75,848	16,63	24,09	10,25	67,24	15,64	29,48	17,20

Fonte: Autor, 2024

6 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a interação entre as características minerais das matérias primas usadas nas formulações, sobretudo o teor de ferro, e o tratamento térmico artesanal são fundamentais para a obtenção de telhas e tijolos brancos e mesclados.

Foi possível estabelecer um perfil de referência para a cerâmica estrutural de coloração branca com os parâmetros obtidos com o diagnóstico de dez massas das indústrias da região do APL-CVMF. O teor de ferro foi um fator determinante com valores próximos a 3%, confirmando a classificação aplicada as massas de cores claras pela literatura, outro óxido importante foi a alumina que influenciou diretamente na luminosidade. Os resultados de mineralogia demonstram que a presença de rutilo somado a baixos teores de ferro auxilia na obtenção de cores claras após a queima. Por fim a colorimetria evidência a tendência das massas a tons de coloração clara com valores de luminosidade entre 77 e 81, a^* entre 5 e 7 e b^* 20 a 25, comprovando uma padronização na região. Ainda correlacionado os parâmetros de colorimetria com a presença de ferro, um menor teor mostrou uma tendência a maior luminosidade e coloração mais clara.

A seleção das argilas ocorreu em duas vertentes, para baixo teor de Fe_2O_3 (<3%) e região geológica (cavas alagadas). Relacionando os resultados obtidos com o percentual de ferro, as amostras A0, A5 e A8 obtiveram coloração clara e próxima ao perfil de referência. Sendo a amostra A0 uma matéria prima base para a fabricação de cerâmica estrutural de coloração branca, e as outras duas subutilizadas pelo setor cerâmico. Essas matérias primas tem características bastante diversificadas entre si, a amostra A0 tem menor teor de resíduo bruto (4,98%) o que ajuda na alta plasticidade. Já as amostras A5 e A8 tem médio e alto teor de resíduo (14,85% e 43,23% respectivamente) influenciando diretamente nas médias e baixa plasticidade. O que indica que esses materiais podem ser usados como complemento em formulações. A análise colorimétrica mostrou valores de L^* igual a 75, 86 e 79, a^* 14, 12 e 15 e b^* 24, 7 e 20 respectivamente para todas as amostras apontadas. Ainda as amostras A0 e A8 obtiveram um ΔE^* ~10 tornado sua tonalidade mais próxima do perfil de referência. Esses resultados indicam que a incorporação dessas matérias primas em formulações cerâmicas pode contribuir para a otimização dos recursos naturais disponíveis.

Relacionando a caracterização com o perfil geológico, percebe-se a importância de um planejamento eficiente de mineração. Não basta

extrair a argila com as melhores características, é importante também encontrar aplicações para aquelas com propriedades específicas para aproveitar todo o potencial do perfil.

as argilas A0, AP e A1 pertencem ao mesmo perfil, estando a 1,5m, 3,0m e inferior a 3,0m de altura respectivamente, dos quais seguem uma tendência de quanto maior a profundidade maior o teor de Fe_2O_3 (3,06%, 5,07% e 8,49%), menor o teor de Al_2O_3 (18,16%, 16,11% e 14,97%) e menor o percentual de TiO_2 (1,64%, 1,62% e 1,40%), levando a cores mais escuras a medida que aumenta a profundidade.

Analisando a colorimetria em relação ao tipo de forno e atmosfera usada percebe-se uma diferença visual de cor levando mais para o vermelho quando queimado em forno tradicional da cerâmica vermelha com ciclos mais rápidos de queima, comprovado pela diferença de cor pelo $\Delta E^* = 17$, contrastando o valor 10 (A0) quando comparado com o perfil de referência. Com isso, o baixo teor de ferro tem que ser combinado a uma queima de atmosfera redutora e ciclos lentos, para a obtenção das tonalidades brancas e mescladas.

Finalmente, o estudo fornece bases científicas para a possível obtenção de uma indicação Geográfica (IG) na região do APL-CVMF, fortalecendo a valorização da cerâmica estrutural de coloração branca no mercado.

Trabalhos futuros

Um estudo para avaliar ativamente a atmosfera redutora em um forno redondo industrial, utilizando medidores de atmosfera distribuídos estrategicamente ao longo de todo o ciclo de queima. O objetivo é compreender e monitorar principalmente o que ocorre no processo do “arrojo” - patamar de queima, identificando parâmetros que possam otimizar o processo e garantir maior controle sobre as condições da queima.

Estudar a etapa de queima de cerâmica estrutural de coloração branca em laboratório para tentar reproduzir a atmosfera redutora em ciclos mais curtos. A partir dessa análise, pretende-se identificar variáveis que influenciam no processo de queima e desenvolver estratégias para potencializar a eficiência do tratamento térmico, reduzindo tempo e custos sem comprometer a qualidade do material.

Utilizar o ensaio UV-Visível para confirmar as fases formadas na redução do ferro para a formação da coloração branca.

Propor novas composições utilizando as argilas alternativas, agora que se tem um melhor entendimento das suas características - mesmas matérias primas que atualmente não são aproveitadas.

REFERÊNCIAS

ABCERAM. **A origem da cerâmica**. São Paulo, SP, 2023. Disponível em: <https://abceram.org.br/a-origem-da-ceramica/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270 - Componentes cerâmicos — Blocos e tijolos para alvenaria**. Rio de Janeiro: 2023.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15310:2009 Componentes Cerâmicos - Telhas - Terminologia, Requisitos e Métodos de Ensaio**. . Rio de Janeiro: 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR16097: Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**. 2012.

ALBUQUERQUE DO NASCIMENTO, Valdivânia. **Aplicações em ciências e engenharias de materiais**. [S. l.]: Editora Inovar, 2020.

ALDERETE, María Verónica; BACIC, Miguel Juan. Local Productive Arrangements and local development in non-metropolitan municipalities of Sao Paulo, Brazil. **Cuadernos de Gestión**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 103–124, 2018. Disponível em: <https://ojs.ehu.eus/index.php/CG/article/view/18907>.

ANFACER. **História da Cerâmica**. São Paulo, SP, 2023. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/historia-da-ceramica>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ANICER. **Dados do setor**. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

APL-SE, Nucleo Estadual de Arranjos Produtivos Locais. Plano de desenvolvimento do arranjo produtivo de cerâmica vermelha sergipana. p.1–32, dez. 2008.

ATTERBERG, A. Über die physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Tone. **Internationale Mitteilungen für Bodenkunde**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 10–43, 1911.

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães *et al.* **Minerais de Titânio**. 2^a ed.ed. [S. l.]: CETEM, 2008. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1141/1/37._Minerais_de_Tit%C3%A2nio_revisado.pdf. Acesso em: 9 jan. 2025.

BAVARESCO, Mateus V *et al.* Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 263–292, 2021.

BENEDET, Grasiela Amoriso *et al.* Development of eco-friendly clay ceramics using rice husk ash as a secondary mineral source of quartz. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 38, p. 108103, 2024.

BERNS, Roy S.; REIMAN, D. Mark. Color managing the third edition of *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. **Color Research & Application**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 360–373, 2002.

BILLMEYER JR, Fred W.; SALTZMAN, Max. **Principles of Color Technology**. 2nd. ed. New York, NY: Wiley & Sons, Incorporated, John, 1981.

BITENCOURT, Silvio Silveira; JESUS, Aladim Rocha de. Custos da etapa de produção na fabricação de telhas brancas de argila: um estudo de caso. **Faculdade de Capivari**, [s. l.], p. 1–20, 2018.

BORGERT, João Batista. ° Workshop sobre Revestimentos Cerâmicos A Influência da Queima na Variação da Tonalidade de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], p. 47–49, 1999.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na Indústria de Cerâmica Vermelha: Medidas e Alternativas para o Controle Dimensional. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 21, n. 5–6, p. 40–43, 2016.

CABRAL, Marsis *et al.* A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da

Competitividade. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 36–42, 2012.

CABRAL, Marsis; AZEVEDO, Paulo Brito Moreira de. Potencial Técnico e Econômico do Aproveitamento de Resíduos da Indústria de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], ano 22, n. 3, 2017. p. 29–38.

CAMENAR, E. L. *et al.* Síntese e caracterização de hidróxidos e óxidos mistos Fe(III):Al com potencial aplicação como pigmentos obtidos a partir da mistura dos géis de goethita e boehmita. **Cerâmica**, [s. l.], ano 64, n. 371, set. 2018. p. 331–340. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132018000300331&lng=pt&tlng=pt.

CARROLL, Dorothy. Role of clay minerals in the transportation of iron. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 14, n. 1–2, p. 1–28, 1958. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0016703758900905>.

COMIN, André Biava *et al.* Characterization and processing of kaolin from southern Brazil for potential strategic application in the porcelain stoneware tiles manufacturing. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 148, p. 105157, 2024.

CRUZ, Carlos. **Otimização de processos e custo: APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça se destaca por suas conquistas**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Nacional da Indústria Cerâmica, 2023. Disponível em: <https://revista.anicer.com.br/otimizacao-de-processos-e-custo/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

DAMIANI, Juliano C *et al.* Coração Negro em Revestimentos Cerâmicos: Principais Causas e Possíveis Soluções. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], p. 12–16, 2001. Disponível em: <https://app.periodikos.com.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4641/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4641.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.

DE BRITO, Alexandre Magno Vieira Gonçalves. Cogeração na indústria cerâmica: uma revisão sistemática sobre a recuperação de calor em fornos cerâmicos e seus benefícios. **XXIV ENGEMA**, [s. l.], p. 1–12, 2022.

DEHOU, S.C. *et al.* Physicochemical, crystalline and morphological characteristics of bricks used for ground waters purification in Bangui region (Central African Republic). **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 59–60, p. 69–75, 2012.

DIAS, J. F.; TOFFOLI, S. M.; AGOPYAN, V. Absorção de telhas de cerâmica vermelha. **Associação Brasileira Cerâmica**, Rio de Janeiro, RJ, 2004. p. 10.

DONDI, Michele. Caracterização Tecnológica dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais e Interpretação dos Dados. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 11, 2006.

DONDI, Michele; FABBRI, B; SISTU, Giovanni. **Argille da laterizi della Sardegna: Composizione e influenza sulle caratteristiche tecnologiche dei prodotti**. [S. l.: s. n.], 1995. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268506149>. .

DONDI, Michele; RAIMONDO, Mariarosa; ZANELLI, Chiara. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 96, p. 91–109, 2014.

ELYSEU, Fábio. **Desenvolvimento de cerâmica vermelha por monoqueima rápida a partir de massas compostas por argilominerais**. 2014. 126 f. Dissertação - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2014.

EPPLER, Richard A. Seleccionando Matérias-Primas para Esmaltes. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], 2002.

FEITOSA, Alan de Oliveira; DUTRA, Ricardo Peixoto Suassuna; CAMPOS, Lizandra Fernanda Araújo. **Influência das variáveis de processamento na cor e propriedades tecnológicas de cerâmicas estruturais**. 2015. 122 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, João Pessoa/PB, 2015.

FELTRIN, J. *et al.* Superfícies fotocatalíticas de titânia em substratos cerâmicos: Parte I: Síntese, estrutura e fotoatividade. **Cerâmica**, [s. l.], v. 59, n. 352, p. 620–632, 2013.

FINKELNBURG, Dave. **Arquivo Techno: Redução**. Westerville, OH, 2022. Disponível em: <https://ceramicartsnetwork.org/ceramics-monthly/ceramics-monthly-article/reduction#>. .

FIORI, C *et al.* **Mineralogical Composition of the Clay Bodies Used in the Italian Tile Industry Applied Clay Science**. [S. l.: s. n.], 1989.

GONÇALVES, Anderson Tiago Peixoto; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Análise da obtenção de vantagens competitivas para Arranjos Produtivos Locais: Um estudo exploratório no setor de extração mineral do estado da Paraíba. **Revista Gestão Industrial**, [s. l.], ano 11, n. 4, dez. 2015.

GONÇALVES, Anderson Tiago Peixoto; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Caracterização estrutural de arranjos produtivos locais: uma aplicação no setor de extração mineral em microrregião brasileira. In: , 2013, Porto, Portugal, Portugal. **XV Congresso Latino-Iberoamericana de Gestão de Tecnologia**. Porto, Portugal, Portugal: ALTEC 2013, 2013. p. 19.

GUAREZI, Gelson Junior Maccari *et al.* Mineração Circular: Potencialização de cinza da casca de arroz como fonte alternativa mineral na produção de cerâmica vermelha. In: SILVA, Cristina Ferreira Correia *et al.* (org.). **Prêmio Melhores Práticas em APL de Base Mineral: Coletânea 2010-2022**. 1ªed. Teresina, PI: IFPI/ CT RedeAPLmineral, 2023. p. 315–346.

HEIN, A. *et al.* Red clays from Central and Eastern Crete: geochemical and mineralogical properties in view of provenance studies on ancient ceramics. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 24, n. 3–4, p. 245–255, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131703002370>.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 296, p. 123653, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821014136>.

HORN FILHO, N. O *et al.* Estudo geológico dos depósitos clásticos quaternários superficiais da planície costeira de Santa Catarina, Brasil. **GRAVEL**, [s. l.], p. 67, 2014.

HOUSEMANN, J. E.; KOENING, C. J. Influence of Kiln Atmospheres in Firing Structural Clay Products: II, Color Development and Burnout*. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 82–89, 1971. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1151-2916.1971.tb12224.x>.

INOCENTE, Jordana Mariot *et al.* Efeito de um corante incorporado a três vidrados de louça em grés. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [s. l.], v. 14, n. 1, 2017. Disponível em:
<http://tecnologiamm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.1017>.

KORIFI, Rabia *et al.* CIEL*a*b* color space predictive models for colorimetry devices - Analysis of perfume quality. **Talanta**, [s. l.], v. 104, p. 58–66, 2013.

LIEBERMANN, J. High- strength bauxite porcelain- new results and the especial impact of reducing firing atmosphere. **Interceram**, [s. l.], v. 57, p. 247–249, 2008.

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

MACHADO, Paula Pinheiro *et al.* Controle de Qualidade para Revestimentos Cerâmicos Através da Análise Colorimétrica de Superfície Vidrada Monocromática. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], p. 51–55, 1997. Disponível em:
<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587656fd7f8c9d6e028b45ef/pdf/ci-2-3-4-587656fd7f8c9d6e028b45ef.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.

MAFRA, Antero Tadeu. **Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha**. 1999. 128 f. Florianópolis, SC, 1999.

MAGED, Ali *et al.* Avaliação dos depósitos de argila de Abu Zenima como possível fonte de matéria-prima para a indústria cerâmica:

Sensoriamento Remoto e Caracterização. **Relatórios Científicos**, [s. l.], p. 16, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-26484-5>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELLI, V. C. Multitização em refratários utilizando diferentes fontes precursoras: revisão. **Cerâmica**, [s. l.], v. 56, n. 340, p. 368–375, 2010.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, José Fernando *et al.* Color control in industrial clay calcination. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], v. 5, p. 1–7, 2020.

MATENCIO, Tulio. Importância dos materiais cerâmicos na nossa sociedade. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2020.

MEDEIROS, S. G. *et al.* Preparação de compósitos alumina-mulita de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulínica da Paraíba e hidróxido de alumínio. **Cerâmica**, [s. l.], v. 62, n. 363, p. 266–271, 2016.

MEIER, Heinz. Como é medida a eficiência energética de telhados frios? Suíça, 2023. Disponível em: <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/cool-roofs-and-energy-efficiency.html>.

MENEZES, R. R. *et al.* Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão. **Cerâmica**, [s. l.], v. 52, n. 321, p. 37–49, 2006.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; JUNIOR, Marsis Cabral. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produto. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 28–39, 2001.

MULLER, L.E; SOARES, J.M.D; PINTO, C.A.M. **Curso Básico de Cerâmica Vermelha Estrutural**. 1990. 135 f. - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

NAPOLI, Laís. Cerâmica: a mais antiga das indústrias. **Revista da Anicer**, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/revista-anicer/revista-96/historia/>. Acesso em: 7 jan. 2024.

NAZARIO, Lanna Celly da Silva *et al.* Panorama da indústria de cerâmica vermelha e os impactos ambientais na região do Seridó. **Ecogestao Brasç**, [s. l.], v. 6, p. 437–444, 2018.

NIGAY, P.M.; CUTARD, T.; NZIHOU, A. The impact of heat treatment on the microstructure of a clay ceramic and its thermal and mechanical properties. **Ceramics International**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 1747–1754, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216318508>.

OLIVEIRA, Amando Alves de. **Tecnologia em Cerâmica**. Criciúma, SC: Lara, 2013.

OLIVEIRA, Luiz C. A.; FABRIS, José D.; PEREIRA, Márcio C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. **Química Nova**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 123–130, 2013.

PAGNAN, Sérgio *et al.* Fornecimento sustentável de argilas para APL de cerâmica vermelha. In: SILVA, Cristina Ferreira Correia *et al.* (org.). **Prêmio Melhores Práticas em APL de Base Mineral: Coletânea 2010-2022**. 1ªed. Teresina, PI: IFPI/ CT RedeAPLmineral, 2023. p. 82–91.

PETERSON, Michael *et al.* Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na formulação de massa de uma indústria cerâmica estrutural do sul - catarinense. **Revista da Unifebe**, [s. l.], v. 1, n. 15, p. 9–17, 2015.

PILTZ, Gerhard. **Untersuchung der Möglichkeiten der Aufhellung der Brennfärben von Ziegelrohstoffen**. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1964.

PRACIDELLI, Sbastiao. ci-13-1-587657347f8c9d6e028b4732. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], 2008.

QUANDT, Carlos Olavo. Redes de cooperação e inovação localizada: Estudo de caso de um arranjo produtivo local. **Review of Administration and Innovation - RAI**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2012.

RAIMUNDO, M. *et al.* **Plasticity of bricks clays: comparasion of several empirical tests end correlacionwith mineralogical composition and particle size distribution.** Elseviered. [S. l.: s. n.], 2001.

RATHOSSI, C.; PONTIKES, Y. Effect of firing temperature and atmosphere on ceramics made of NW Peloponnese clay sediments: Part II. Chemistry of pyrometamorphic minerals and comparison with ancient ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 30, n. 9, p. 1853–1866, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221910000762>.

REBELO, Wagner Benedet *et al.* Valorization of the Residual Fraction of Coal Tailings: A Mineral Circularity Strategy for the Clay Ceramic Industry in the Carboniferous Region of Santa Catarina, Southern Brazil. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 2131, 2024.

RIELLA, Humberto Gracher. **Cerâmica - dos minerais à porcelana.** 1. ed. São Paulo: 2010, 2010.

RIETVELD, Hugo M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. **J. Appl. Crystallogr.**, [s. l.], v. 2, n. 65, p. 65–71, 1969.

RIZZATTI, Eduardo; ROMAN, Humberto R.; NAKANISHI, Elizabeth Y. Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 730–746, 2011.

RODRIGUES, L. R. *et al.* Resíduo do processo Kraft (dregs) como matéria-prima alternativa para cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s. l.], v. 65, n. 373, p. 162–169, 2019.

SABINO, Artemizia Rodrigues. **Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha de Tabatinga-AM: Um estudo de caso em indústrias do município.** 2016. 121 f. Mestrado Profissional - Universidade Federal do Pará, Pará, 2016.

SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. **Cerâmica**, [s. l.], ano 58, n. 347, set. 2012. p. 393–399. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132012000300018&lng=en&tlng=en.

SALES, J. C *et al.* A queima na Indústria de cerâmica vermelha em estado do nordeste brasileiro. *In:* , 2014, Bento Golçalves. **Anais do 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Bento Golçalves: [s. n.], 2014. p. 1094–1105.

SANTANA, G. P. *et al.* Magnetita e sua transformação para hematita em um solo derivado de esteatito. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 33–42, 2001.

SAVAZZINI-REIS, Alessandra; DELLA-SAGRILLO, Viviani Possamai Valenzuela; DÍAZ, Francisco Rolando. **Caracterização e propriedades cerâmicas de argilas usadas em cerâmica vermelha no Estado do Espírito Santo (2016)**. 2016. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SAVIATTO, Emily *et al.* Sustainable Mining: Reuse of Clay from Abandoned Areas in the South of Brazil for Ceramic Production Based on a Simplex Design. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 19, p. 6466, 2023.

SILVA NETO, Luís de França da *et al.* Óxidos de ferro em latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 1873–1881, 2008.

SIMÊNIO, Éder Cícero Adão. **Ciência dos materiais**. Educacional S.Aed. Londrina: [s. n.], 2016.

SINDICER. **SINDICER busca selo de regionalização da cerâmica**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.sindicermf.com.br/index.php/noticias/64-sindicer-busca-selo-de-regionalizacao-da-ceramica>. Acesso em: 29 nov. 2023.

SPROUL, Julian *et al.* Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy and Buildings**, [s. l.], ano 71, mar. 2014. p. 20–27. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813007652>.

STRAZZERA, Bernardino; DONDI, Michele; MARSIGLI, Marco. Composition and ceramic properties of tertiary clays from southern

Sardinia (Italy). **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 247–266, 1997.

TOZZI, N. **Smalti Ceramic Considerazioni Teoriche e Pratiche**. Faenza, Italia: Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.A, 1992.

UMAMA, Mohammad Abu *et al.* Temperature and humidity effects on salt crystallization in burnt clay bricks. **Results in Materials**, [s. l.], v. 21, p. 100541, 2024.

VALANCIENE, V.; SIAUCIUNAS, R.; BALTUSNIKAITE, J. The influence of mineralogical composition on the colour of clay body. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 30, n. 7, p. 1609–1617, 2010.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; FORNAZIER, Armando. Agricultural productivity: closing the gap between Brazil and the United States. *In*: CEPAL REVIEW NO. 118. Santiago: United Nations, 2016. p. 203–220.

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

WANG, Sen *et al.* Effects of vermiculite on in-situ thermal behaviour, microstructure, physical and mechanical properties of fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 316, p. 125828, 2022.

WANG, Linying; HUANG, Maoyi; LI, Dan. Where Are White Roofs More Effective in Cooling the Surface?. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], ano 47, n. 15, 16 ago. 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL087853>.

WERNECK, Vera Rudge. Sobre o processo de construção do conhecimento: o papel do ensino e da pesquisa. **Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação**, [s. l.], v. 14, n. 51, p. 173–196, 2006.

WILDENER, Wilson *et al.* CPRM. Mapa geológico do estado de Santa Catarina. **Rigeo**, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/17996>. Acesso em: 29 fev. 2024.

WILSON, Ian Richard. The constitution, evaluation and ceramic properties of ball clays. **Cerâmica**, [s. l.], v. 44, n. 287–288, p. 88–117, 1998.

WIŚNIEWSKA, Kornelia; PICHÓR, Waldemar; KŁOSEK-WAWRZYN, Ewelina. Influence of Firing Temperature on Phase Composition and Color Properties of Ceramic Tile Bodies. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 21, p. 6380, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/21/6380>.

ZACCARON, Alexandre *et al.* Characterization and use of clays and argillites from the south of Santa Catarina State, Brazil, for the manufacture of clay ceramics. **Clay Minerals**, [s. l.], v. 55, n. 2, p. 172–183, 2020.

ZACCARON, Alexandre *et al.* Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 19, 2014.

ZACCARON, Alexandre *et al.* The behavior of different clays subjected to a fast-drying cycle for traditional ceramic manufacturing. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 339–348, 2024.

ZHANG, Yu; KIM, Jae-Won. Graded structures for damage resistant and aesthetic all-ceramic restorations. **Dental Materials**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 781–790, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564109000025>.