

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

PAULO FERNANDES

ESTUDO DA EXTRUSÃO E SECAGEM RÁPIDA DE COMPOSIÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA A PARTIR DE MATÉRIAS-PRIMAS ABANDONADAS

CRICIÚMA

2025

PAULO FERNANDES

**ESTUDO DA EXTRUSÃO E SECAGEM RÁPIDA DE COMPOSIÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA A PARTIR DE MATÉRIAS-PRIMAS ABANDONADAS**

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. Vitor de Souza Nandi

CRICIÚMA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F363e Fernandes, Paulo.

Estudo da extrusão e secagem rápida de composição de cerâmica vermelha a partir de matérias-primas abandonadas / Paulo Fernandes. - 2025.

151 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: Vitor de Souza Nandi.

1. Cerâmica vermelha. 2. Cerâmica vermelha - Secagem. 3. Secagem de ciclo rápido. 4. Argilas. 5. Minerais de argila. I. Título.

CDD 23. ed. 620.14

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Paulo Fernandes

Estudo da extrusão e secagem rápida de composição de cerâmica vermelha a partir de matérias-primas abandonadas

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, SC, 18 de junho de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO**
Data: 05/09/2025 17:46:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente
 **MURILO DANIEL DE MELLO INNOCENTINI**
Data: 06/09/2025 10:10:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP

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

Assinado por: **Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro**

Num. de Identificação: 05403140
Data: 2025.09.07 11:22:54+01'00'

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me dar força, sabedoria e resiliência para superar os desafios desta jornada, iluminando meu caminho em cada etapa.

À minha esposa, Mônica Parise, pelo amor, paciência e constante apoio, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. À minha família, por todo o carinho, compreensão e incentivo que sempre me motivaram a buscar os meus objetivos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro que viabilizou a execução desta pesquisa e contribuiu diretamente para o avanço do conhecimento.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) pelo valioso conhecimento compartilhado ao longo desses dois anos de jornada. Em especial, ao professor Dr. Fabiano Raupp Pereira pela parceria ao longo desta pesquisa.

Ao meu sócio, amigo e coorientador deste estudo, Dr. Vitor de Souza Nandi, pelo suporte e compreensão durante este período de dedicação intensa aos estudos.

Também deixo meu agradecimento ao Dr. Alexandre Zaccaron pelo incentivo a voltar para área acadêmica e suporte no desenvolvimento deste estudo.

Ao Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini e a toda a sua equipe do curso de Engenharia Química da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), pelo apoio técnico e pela condução dos ensaios de permeabilidade que possibilitaram o enriquecimento científico deste trabalho.

Ao Sr. Agnaldo Cesar Bertan, Diretor da empresa Natreb máquinas para cerâmica, que disponibilizou o laboratório para algumas etapas desse estudo.

À Universidade Do Extremo Sul Catarinense - UNESC por me proporcionar uma formação acadêmica de excelência e os recursos necessários para a concretização deste projeto.

E, finalmente estendo minha gratidão aos colegas de classe, com quem tive a oportunidade de compartilhar experiências enriquecedoras, e a todos os profissionais do Parque Tecnológico e Científico (i.Parque), bem como aos alunos e bolsistas dos laboratórios, pelo apoio e companheirismo ao longo dessa caminhada.

“Não vos conformeis com este mundo,
mas transformai-vos pela renovação da
vossa mente.”

São Paulo em *Romanos 12:2*

RESUMO

Este estudo investigou o desenvolvimento de formulações para a produção de cerâmica vermelha estrutural a partir da combinação de três argilas distintas: Argila plástica (AV), argila arenosa (AZ) e argilito (TM). O objetivo foi demonstrar o uso de secagem rápida com minerais alternativos de base primária (áreas abandonadas), avaliando a influência composicional, mineralógica e granulométrica dessas argilas no desempenho dos corpos cerâmicos. Foram desenvolvidas dez formulações e avaliadas suas propriedades tecnológicas de secagem, com ênfase na resistência mecânica e pós queima. As caracterizações físico-químicas e térmicas das argilas demonstraram diferenças significativas entre os materiais utilizados. A argila AZ apresentou maior teor de inertes (quartzo), conferindo menor retração linear na secagem, enquanto a AV exibiu melhor plasticidade e trabalhabilidade na conformação por extrusão. Já a argila TM destacou-se pela elevada resistência mecânica após queima. A variação da umidade durante a conformação não comprometeu a integridade das peças durante a secagem rápida. A formulação F8 apresentou desempenho superior nesse aspecto, sem a formação de trincas ou defeitos superficiais. Os ensaios de resistência mecânica à compressão indicaram que as formulações F5 (50 % de AV e 50 % de TM) F8 (66,6 % de AV, 16,7 % de AZ e 16,7 % de TM) e F10 (16,7 % de AV, 16,7 % de AZ e 66,6 de % TM) apresentaram os melhores desempenhos, com valores médios superiores a 1,5 MPa após queima, demonstrando a viabilidade dessas composições para a fabricação de produtos estruturais. Além disso, a densidade aparente das formulações variou entre 1,91 e 2,03 g/cm³, refletindo diretamente na redução da porosidade. Além das melhorias nas propriedades técnicas, o estudo destacou a importância da economia na indústria cerâmica, com o aproveitamento de novas áreas de argila e a formulação de composições otimizadas que reduzem desperdícios e melhoram a eficiência produtiva. A combinação das argilas AV, AZ e TM mostrou-se eficiente na produção de materiais cerâmicos de alto desempenho, atendendo aos critérios normativos e possibilitando a fabricação de produtos sustentáveis e competitivos para o setor.

Palavras-chave: Planejamento por misturas. Fator de trabalhabilidade. Secagem de ciclo rápido. Permeabilidade. Resistência mecânica.

ABSTRACT

This study investigated the development of formulations for the production of structural red ceramics from the combination of three distinct clays: Plastic clay (AV), sandy clay (AZ), and argillite (TM). The objective was to demonstrate the use of innovative fast-drying technologies with alternative minerals of primary (abandoned areas), evaluating the compositional, mineralogical and granulometric influence of these clays on the performance of the ceramic bodies. Ten formulations were developed and their technological properties of drying, with emphasis on mechanical resistance, and post-firing were evaluated. The physicochemical and thermal characterizations of the clays showed significant differences between the materials used. The AZ clay presented a higher inert (quartz) content, conferring less linear shrinkage during drying, while the AV clay exhibited better plasticity and workability in extrusion forming. The TM clay stood out for its high mechanical resistance after firing. The variation in moisture content during shaping did not compromise the integrity of the pieces during fast drying. Formulation F8 showed superior performance in this regard, without the formation of cracks or surface defects. Compressive strength tests indicated that formulations F5 (50 wt% AV clay and 50 wt% TM clay), F8 (66.6 wt% AV clay, 16.7 wt% AZ clay, and 16.7 wt% TM clay), and F10 (16.7 wt% AV clay, 16.7 wt% AZ clay, and 66.6 wt% TM clay) presented the best performances, with average values above 1.5 MPa after firing, demonstrating the viability of these compositions for the manufacture of structural products. In addition, the apparent density of the formulations varied between 1.91 and 2.03 g/cm³, directly reflecting the reduction of porosity. In addition to the improvements in technical properties, the study highlighted the importance of the circular economy in the ceramic industry, with the use of new clay areas and the formulation of optimized compositions that reduce waste and improve production efficiency. The combination of clays AV, AZ and TM proved to be efficient in the production of high-performance ceramic materials, meeting the normative criteria and enabling the manufacture of sustainable and competitive products for the sector.

Keywords: Mixture planning. Workability factor. Fast cycle drying. Permeability. Mechanical resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Unidade estrutural das caulinitas, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica.....	35
Figura 2: Unidade estrutural da illita, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica	36
Figura 3: Unidade estrutural da montmorilonita, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica	38
Figura 4: Exemplos de morfologia de cristais de algumas espécies de argilas, a) Vêtu: montmorilonita dentro de uma bentonita, b) Livretos: caulinita dentro de um digenético arenito, c) Illita “Hair” dentro de um poro de arenito, d) Placas hexagonais de illita.	39
Figura 5: Classificação das partículas de argilominerais de acordo com as suas dimensões	40
Figura 6: Diagrama de Winkler estabelecido pela aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, A: Material de qualidade, com dificuldade de produção (requer mistura), B: Telhas, capas, C: Tijolos furados, D: Tijolos maciços	41
Figura 7: Diagrama de consistência dos argilominerais: Variação volumétrica em função do teor de umidade. V_0 volume inicial seco; V_i volume intermediário; V_f volume final; $S_r < 100\%$ poros com ar; $S_r = 100\%$ o solo está saturado; LC limite de contração; LP limite de plasticidade; LL limite de Liquidez	43
Figura 8: Fluxograma representativo do processo de fabricação da cerâmica vermelha desde a extração das matérias-primas até a expedição	47
Figura 9: Desempenho da secagem em função do tempo: 1ª fase (evaporação constante) e 2ª fase (taxa decrescente de secagem).....	52
Figura 10: Atuação dos mecanismos de secagem da peça cerâmica: fluxos internos (a) evaporação superficial, (b) migração capilar, (c) otimização da eficiência da secagem.....	55
Figura 11: Curva de Bigot: relação entre teor de umidade (água de conformação) e retração durante o processo de secagem em materiais cerâmicos	56
Figura 12: Distribuição de água durante a secagem em um corpo cerâmico: (a) saturado, (b) transição, (c) remoção da água livre, (d) remoção da água ligada.....	57

Figura 13: Esquema de funcionamento do método Cembureau de medida de permeabilidade Onde: a) Suprimento de ar; b) Regulador de pressão com manômetro; c) Célula de ensaio com corpo-de-prova; d) Bolhometro (vazão).....	61
Figura 14: Plano experimental por etapas (OE-1 a OE-4) para desenvolvimento e caracterização de corpos de prova cerâmicos	63
Figura 15: Mapa regional com ordem de grandeza a nível nacional e estadual, incluindo as áreas de estudo: Ponto AZ: Argila Zulma; Ponto TM: Taguá Moído; Ponto AV: Argila Verde	66
Figura 16: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Verde (AV).....	67
Figura 17: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Zulma (AZ).....	68
Figura 18: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Taguá Moído (AV)	69
Figura 19: Diagrama triaxial das composições desenvolvidas (% em massa)	75
Figura 20: Fotografia secador rápido de laboratório Natreb, modelo STL (experimento de secagem): a) câmara de secagem; b) tanque de vapor; c) fonte geradora de calor	78
Figura 21: Esquema do permeômetro utilizado nos ensaios.....	85
Figura 22: Classificação das matérias-primas com base no limite líquido e índice de plasticidade segundo o diagrama de trabalhabilidade desenvolvido por Marsigli e Dondi (1997).....	92
Figura 23: Distribuição cumulativa e de frequência do tamanho de partículas por sedimentação das matérias-primas, (seta tracejada) regiões de Maior Concentração de Finos e (seta contínua) frações granulométricas maiores.....	93
Figura 24: Classificação das matérias-primas AV, AZ e TM com base no diagrama triangular do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), utilizando as frações granulométricas de argila (<4 µm), silte (4–63 µm) e areia (>63 µm)	95
Figura 25: Classificação das matérias-primas AV, AZ e TM segundo o diagrama triangular de distribuição granulométrica de Winkler.....	96
Figura 26: Difractogramas de Raios X das matérias-primas TM, AZ e AV, evidenciando os principais minerais presentes nas amostras.....	102

Figura 27: Resultados das análises ATD e TG das amostras estudadas, com linhas sólidas (—) para TG e linhas pontilhadas (...) para ATD.....	103
Figura 28: Fotografia das peças referente as 10 formulações conformadas	105
Figura 29: Índice de trabalhabilidade estabelecidos por Marsigli e Dondi (1997) entre o limite de plasticidade e índice de plasticidade das dez formulações determinada por delineamento de mistura, demonstrando as faixas de extrusão ótima e aceitável	106
Figura 30: Fotografia das amostras durante o processo de secagem em ciclo rápido: a) Início da secagem, b) final da secagem.	109
Figura 31: Curva de Bigot das formulações estudadas, sob secagem de ciclo rápido.	110
Figura 32: Perda de umidade e retração térmica linear em função do tempo para as formulações estudadas, sob secagem de ciclo rápido	111
Figura 33: Fotografia das 10 formulações após o processo de secagem rápida em ciclo de 60 min	113
Figura 34: Umidade de conformação e residual das formulações após o processo de secagem de ciclo rápido.....	114
Figura 35: Superfície de resposta da retração linear de secagem (RLSR) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas	116
Figura 36: Análise comparativa da umidade de conformação e da retração linear de secagem em diferentes formulações em ciclo rápido de 60 min.....	117
Figura 37: Superfície de resposta da densidade aparente (ρ_{app}) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas	118
Figura 38: Superfície de resposta da porosidade aparente (P) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas	120
Figura 39: Avaliação da densidade aparente a seco e porosidade a seco de diferentes formulações: Análise Comparativa das Características Microestruturais	122
Figura 40: Mapa de permeabilidade com dados obtidos neste trabalho.....	123
Figura 41: Avaliação da resistência mecânica à compressão a seco de diferentes formulações, identificando faixas de desempenho ótimo e aceitável.....	125

Figura 42: Superfície de resposta das perdas (Δ) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas	126
Figura 43: Fotografias das formulações F1, F3 e F4 após ciclos rápidos que apresentaram defeitos visuais de secagem.....	128
Figura 44: Superfície de resposta para absorção de água (AA) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas	130
Figura 45: Avaliação da retração linear de queima e absorção de água em diferentes formulações e sua conformidade com critérios normativos de qualidade.....	132
Figura 46: Avaliação da resistência mecânica à compressão após queima (σ_q) das formulações em relação a um critério normativo de desempenho.....	133
Figura 47: Fotografia da análise comparativa de tonalidade das peças cerâmicas resultantes das diferentes formulações após processo de queima.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de Atterberg e limite de contração para diferentes argilominerais. Limites de consistência dos argilominerais.....	44
Tabela 2: Composições de massas de cerâmica vermelha utilizando a ferramenta de planejamento de misturas para as matérias-primas utilizadas no trabalho.	76
Tabela 3: Teor de umidade <i>in natura</i> das matérias-primas utilizadas no estudo (% em massa).....	90
Tabela 4: Limites de Atterberg das matérias primas estudadas	91
Tabela 5: Distribuição granulométrica das matérias-primas: Faixas de tamanho, parâmetros estatísticos e quantificação das partículas finas	94
Tabela 6: Teor de resíduo bruto das matérias-primas AV, AZ e TM, obtido por peneiramento a úmido em malha de 325 Mesh/44 µm	97
Tabela 7: Distribuição granulométrica do resíduo bruto obtido na peneira 325 Mesh/44 µm das matérias-primas AV, AZ e TM, indicando a fração retida em diferentes malhas	98
Tabela 8: Composição química das matérias-primas TM, AZ e AV, obtidos por Fluorescência de Raios X	99
Tabela 9: Composição mineralógica das matérias-primas determinada por difração de Raios X com quantificação pelo método Rietveld.	101
Tabela 10: Análise granulométrica do resíduo bruto em malha 325 Mesh / 44 µm obtido por peneiramento das diferentes formulações proposta nesse estudo, apresentando a quantidade retida em diferentes aberturas de malhas	107
Tabela 11: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a retração linear de secagem rápida (RLSR) avaliadas por delineamento de misturas	116
Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a densidade aparente (ρ_{app}) avaliadas por delineamento de misturas	119
Tabela 13: Valores de densidade aparente (g/cm^3) das formulações desenvolvidas a partir de mistura das argilas AV, AZ e TM	120
Tabela 14: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a porosidade (P) avaliadas por delineamento de misturas.....	121

Tabela 16: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados as perdas (Δ) avaliadas por delineamento de misturas	127
Tabela 17: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a absorção de água (AA) avaliadas por delineamento de misturas.	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Transformações físicas e químicas ocorridas durante a queima de um corpo cerâmico	50
Quadro 2: Tipos de secagem e principais vantagens e desvantagens	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Absorção de água

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

Al(OH)₃ – Hidróxido de alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio (alumina)

APL-MF – Arranjo Produtivo Local de Morro da Fumaça

ATD – Análise Térmica Diferencial

AV – Argila verde

AZ – Argila zulma

Ca – Cálcio

CerTec – Laboratório de Cerâmica Técnica

C₄H₁₀ – Gás butano

DRX – Difração de Raios X

DTP – Distribuição do Tamanho de partículas

Fe – Ferro

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

FRX – Fluorescência de Raios X

GPS – Global Positioning System

ÍP – Índice de plasticidade

iParque – Parque Científico e Tecnológico

LC – Limite de Contração

LL – Limite Líquido

LP – Limite plástico

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

NBR – Norma Brasileira

H₂O – Molécula de água

Mg – Magnésio

Na – Sódio

NM – Norma Mercosul

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OE – Objetivo específico

ONU – Organização das Nações Unidas

PF – Perda ao fogo

T – Temperatura

Ti – Titânio

TM – Taguá Moído

RB – Resíduo bruto

RL – Retração linear

RMCC – Resistência mecânica a compressão pós queima

RMCS – Resistência mecânica a compressão a seco

SC – Santa Catarina

Si – Silício

SiO₂ – Dióxido de silício (sílica)

TG – Termogravimétrica

U – Umidade

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

V₀ – Variação inicial

V_i – Variação intermediária

V_f – Variação final

ΔV – Variação de volume

w% – Teor de umidade

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – Delta

Δ – Delta

$\pm$ – Mais ou menos

$>$ – Maior que

$\geq$ – Maior ou igual que

$<$ – Menor que

$\leq$ – Menor ou igual que

μ – Viscosidade

ν – Viscosidade cinemática de um fluido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	JUSTIFICATIVA	25
3	OBJETIVOS	27
3.1	OBJETIVO GERAL	27
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
4.1	INDÚSTRIA CERÂMICA VERMELHA	28
4.2	ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS (APL).....	30
4.3	MATÉRIAS-PRIMAS CERÂMICAS	32
4.3.1	Argilas	33
4.4	GRUPO DOS MINERAIS ARGILOSOS	34
4.4.1	Caulinita	35
4.4.2	Ilita	36
4.4.3	Montmorilonita	37
4.5	CARACTERÍSTICA GRANULOMÉTRICA DAS ARGILAS	39
4.6	PLASTICIDADE	42
4.7	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA.....	45
4.8	SECAGEM	50
4.8.1	Taxa de secagem constante	53
4.8.2	Taxa de secagem decrescente	54
4.8.3	Curva de Bigot	55
4.8.4	Tipos de secagem.....	58
4.9	PERMEABILIDADE	59
4.9.1	Tortuosidade	62
5	MATERIAIS E MÉTODOS	63
5.1	MATERIAS-PRIMAS (OE-1).....	64
5.1.1	Beneficiamento	65
5.1.1.1	Demarcação das argilas	65
5.1.1.1.1	Argila Verde (AV)	66
5.1.1.1.2	Argila Zulma (AZ).....	67
5.1.1.1.3	Argila Taguá Moído (TM).....	68

5.1.2	Análise física	69
5.1.2.1	Determinação da umidade.....	69
5.1.2.2	Plasticidade.....	70
5.1.2.3	Distribuição de tamanhos de partículas por sedimentação	71
5.1.2.4	Resíduo bruto e determinação da granulometria por peneiramento	72
5.1.3	Análise química (FRX) e mineralógica (DRX)	73
5.1.4	Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (TG)...	73
5.2	DETERMINAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (OE 2).....	74
5.2.1	Caracterização dos corpos de provas.....	76
5.2.1.1	Extrusão.....	76
5.2.2	Estudo das composições	77
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CPS SECOS (OE 3).....	77
5.3.1	Secagem artificial de característica rápida.....	78
5.3.2	Curva de Bigot	79
5.3.3	Perda de água (U)	80
5.3.4	Retração Térmica linear de secagem (RTLS)	80
5.3.5	Densidade aparente.....	81
5.3.6	Porosidade aparente	82
5.3.7	Permeabilidade	84
5.3.8	Resistência mecânica à compressão a seco (RMCS).....	86
5.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CPS QUEIMADOS (OE 4)	87
5.4.1	Absorção de água (AA)	87
5.4.2	Retração Térmica linear de queima (RTLQ).....	88
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
6.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA MATÉRIAS PRIMAS (OE 1).....	90
6.1.1	Determinação da umidade <i>in natura</i>	90
6.1.2	Plasticidade	91
6.1.3	Distribuição de tamanhos de partículas por sedimentação	92
6.1.4	Resíduo bruto e granulometria por peneiramento.....	97
6.1.5	Análise química quantitativa (FRX)	99
6.1.6	Caracterização Mineralógica (DRX)	101
	Análise Térmica (ATD/TG).....	103
6.2	DETERMINAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (OE 2).....	104

6.2.1	Plasticidade	105
6.2.2	Granulometria	106
6.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CPS SECOS (OE 3).....	108
6.3.1	Curva de Bigot	109
6.3.2	Umidade Residual de Secagem Rápida.	113
6.3.3	Retração linear de secagem rápida	115
6.3.4	Densidade aparente.....	117
6.3.5	Porosidade aparente	119
6.3.6	Permeabilidade	122
6.3.7	Resistência Mecânica à Compressão a Seco.....	124
6.3.8	Perdas de secagem	126
6.3.9	Análise visual de defeitos a seco	128
6.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CPS QUEIMADOS (OE 4).	129
6.4.1	Absorção de Água	130
6.4.2	Resistência Mecânica à Compressão Queimado.....	133
6.4.3	Cor de Queima	134
7	CONCLUSÃO.....	136

1 INTRODUÇÃO

O setor de mineração de matérias-primas cerâmicas no Brasil, insere-se atualmente em um enorme desafio relacionado à escassez de recursos minerais. Esse cenário representa um obstáculo significativo para o desenvolvimento sustentável do setor, especialmente para os segmentos que produzem cerâmica vermelha (Florentino *et al.*, 2019).

Os desafios que o setor cerâmico enfrenta relacionam com o fornecimento de matérias-primas, sobretudo a escassez de argilas com maior plasticidade, bem como a falta de avanços tecnológicos na pesquisa mineral, na extração e na tecnologia de processamento. Todos estes fatores acabam por impactar na qualidade dos produtos cerâmicos e dificultam o cumprimento dos requisitos legais para regularizar as operações locais de produção (Saviatto *et al.*, 2023).

O setor de cerâmica vermelha no Brasil é parte integrante de uma ampla atividade da indústria de transformação de minerais não-metálicos voltada diretamente à construção civil, ao lado de cerâmica de revestimento, de sanitários, de cimentos e de vidros. Sua principal missão é produzir uma ampla gama de materiais essenciais, incluindo blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos aparentes, lajotas e tubos, contribuindo de forma significativa para a indústria da construção e a vida cotidiana das pessoas (Cabral *et al.*, 2012; Pinto *et al.*, 2021).

Considerando apenas as empresas formalizadas, o setor de cerâmica vermelha no Brasil detém uma participação de 4,8 % no seguimento da indústria da construção civil. Este setor compreende aproximadamente 5500 empresas, as quais produzem cerca de 8 bilhões de unidades anuais. Destaca-se que mais de 90 % das coberturas de telhados e blocos de vedação utilizados no país provêm deste segmento, gerando uma receita anual de aproximadamente R\$ 18 bilhões e 293 mil postos de trabalhos diretos (Anicer, 2023; IBGE - Cadastro Central de Empresas, 2021; Silva, 2017).

Apesar dos avanços recentes na indústria cerâmica brasileira, que envolveram uma série de iniciativas importantes, como aprimoramento dos processos industriais, maior controle e padronização dos produtos, existe uma defasagem tecnológica que requer investimentos na pesquisa, no planejamento e

desenvolvimento de todo processo produtivo, bem como no controle da qualidade das matérias-primas (Pauletti, 2001).

Argilas e siltes argilosos são as principais matérias-primas utilizadas pelo setor de cerâmica estrutural ou cerâmica vermelha, minerais caracterizados por teores significativos de ferro e responsáveis pela tonalidade vermelha dos artefatos. A fabricação desses produtos impõe um desafio significativo ao controle da qualidade e uniformidade, dada a multiplicidade de variáveis que influenciam o processo (Moreno *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2020).

No contexto técnico, as argilas possuem estrutura porosa composta por materiais com características argilosas, como caulinita, illita e montmorilonita, além de materiais não argilosos como quartzo, feldspatos e carbonatos. Essa estrutura exibe uma porosidade que varia de dimensões micrométricas a milimétricas, frequentemente interconectadas (Santos *et al.*, 2016).

O processo de fabricação de tijolos cerâmicos vazados compreende as seguintes etapas sucessivas: extração da argila, beneficiamento, extrusão, secagem, queima, seleção e estoque. Dentre essas etapas, destaca-se a secagem como um estágio de particular relevância. Isto ocorre porque, imediatamente após a conformação da peça cerâmica, a água encontra-se distribuída de maneira quase homogênea entre as partículas de argila e outros componentes da matéria-prima. A remoção dessa água é crucial, uma vez que sua saída resulta na coesão das partículas de argila e demais minerais componentes, induzindo à diminuição das dimensões da peça – fenômeno conhecido como retração volumétrica. Essa fase demanda atenção especial para assegurar a qualidade e as características desejadas (Batista *et al.*, 2009).

Contudo, a extração da água de um corpo argiloso, como o encontrado na cerâmica estrutural, requer essencialmente a aplicação de uma pressão de evaporação específica. Este processo é fundamental para conduzir a água presente no interior do corpo cerâmico até sua superfície, onde pode ser efetivamente removida. A pressão de evaporação desempenha um papel crucial na eficiência do processo de secagem, influenciando diretamente a velocidade com que a água é transportada para a superfície da peça cerâmica conformada (Barros, 2020).

A otimização do processo de secagem está diretamente ligada ao equipamento, devendo este ser projetado de modo que uma combinação favorável

de custo e qualidade final do produto seja atendida. Alguns estudiosos, vêm mostrando interesse no sentido de melhorar a eficiência energética e os ciclos de secagem (Zaccaron *et al.*, 2024).

A secagem constitui um processo multifísico complexo, que engloba ao mesmo tempo transferência de calor e massa entre o meio circundante, composto pelo ar, e a peça cerâmica em questão. Esse fenômeno é ainda mais influenciado pelas condições de escoamento do ar de secagem, as quais podem ser afetadas por variáveis como a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (Brosnan; Robinson, 2003; Mujumdar, 2006).

Barreto *et al.* (2006) relatam que a secagem pode ser categorizada em três segmentos principais sendo esses: condutivo, convectivo, radiativo. Atualmente a modalidade convectiva é a mais prevalente na indústria cerâmica vermelha, caracterizada por tempos de operação que variam entre 12 e 48 h.

Também se aplica conceitos dos fenômenos de transferência de calor e massa no projeto de um secador com o intuito de incrementar a evolução do processo de secagem, levando em consideração aspectos energéticos e conhecimentos das matérias-primas utilizadas (Kudra; Mujumdar, 2009).

Nos últimos anos, têm sido introduzidas inovações tecnológicas, conhecidas como técnicas avançadas de secagem. Dentre essas técnicas, destaca-se a secagem rápida, que demonstra taxas iniciais de secagem consideravelmente mais elevadas (Raether, 2020).

Ao avaliar estudos recentes na área de secagem rápida para a fabricação de tijolos cerâmicos, nota-se que essa técnica viabiliza ciclos de secagem em torno de 60 min. Esses ciclos, quando comparados aos tradicionais encontrados no Brasil, são notavelmente rápidos, sendo comuns apenas em empresas especializadas em revestimentos cerâmicos (Nandi, 2022).

A partir dessa afirmação, podemos enfatizar que o setor de cerâmica estrutural, em estados que já usam tecnologias mais desenvolvidas, está aderindo às práticas de secagem rápida em termos de aumento de produtividade. O estado de São Paulo, como exemplo, abriga diversas empresas com secadores contínuos de ciclos de secagem rápida para fabricação de tijolos, telhas, blocos estruturais e lajotas (Brosnan; Robinson, 2003; Nandi, 2022; Zaccaron, 2018).

Neste contexto, a problemática central refere-se à grande quantidade de matérias-primas provenientes de áreas ainda não exploradas, que, sob as condições tradicionais de processamento, não apresentam viabilidade para a produção de cerâmica vermelha. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a utilização de recursos minerais de fontes alternativas de base primária, em especial argilas de áreas abandonadas, por meio da definição de composições adequadas à extrusão e compatíveis com o processo de secagem rápida. A proposta busca contribuir para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-MF), promovendo ganhos de produtividade e melhorias na qualidade dos produtos cerâmicos.

2 JUSTIFICATIVA

O setor brasileiro de fabricação de produtos minerais não metálicos ainda tem muito espaço para crescer e se desenvolver tecnicamente, como é o caso da indústria de cerâmica vermelha, pois a baixa tecnologia utilizada resulta em uma dependência de insumos minerais argilosos de alta qualidade para atender a demanda produtiva (Fernandes, 2007).

Seguindo uma tendência internacional do setor cerâmico de mineração, espera-se que o mercado consumidor pressione o mercado produtor para aprimorar o controle de qualidade e especificações das matérias-primas e insumos minerais, além de buscar preços competitivos. Isso implica na modernização do setor mineral, envolvendo investimentos financeiros e tecnológicos em favor de maior eficiência na produção. A mineração necessita ser profissionalizada em todas as etapas, com a especialização de recursos humanos e a implementação de melhorias tecnológicas em equipamentos e processos (Castro *et al.*, 2022).

Por outro lado, a busca por equilíbrio ambiental na mineração está exigindo das empresas a implementação de medidas de gestão mais rigorosas para conduzir suas operações, reduzir os impactos ambientais e recuperar as áreas mineradas (Ramos, 2017).

Algumas regiões costumavam ser grandes produtoras, porém agora estão com suas reservas diminuídas, seja devido à exaustão dos depósitos ou às restrições ambientais. Isso levanta preocupações sobre o fornecimento futuro para o setor. No entanto, a médio e longo prazo, é provável que o consumo de matérias-primas minerais continue a crescer, impulsionado pelo aumento da população, a recuperação econômica e a crescente presença do Brasil no mercado global. Isso destaca a necessidade de investir no melhor aproveitamento das lavras e do desenvolvimento tecnológico existentes (Gavronski; Alegre, 2007).

Apesar dos progressos recentes na indústria cerâmica do país, que incluem várias iniciativas importantes, como aprimoramentos nos processos de fabricação, melhor controle e padronização dos produtos, ainda existe uma necessidade crucial por soluções tecnológicas e de gestão para melhorar o fornecimento de matérias-primas e otimização de seus processos produtivos. As indústrias de cerâmica vermelha frequentemente enfrentam desafios com a qualidade e a consistência das

propriedades das matérias-primas, o que resulta em uma redução na produtividade e na uniformidade dos produtos vendidos (Constantino *et al.*, 2005).

Baseando-se nesta contextualização, é possível argumentar a importância da utilização de argilas de áreas abandonadas quando estas estão alinhadas com o moderno sistema de tecnologia de secagem rápida no setor, com ciclos de aproximadamente 60 min. O desenvolvimento desta proposta busca contribuir significativamente com o aprimoramento de composições cerâmicas que atendam os requisitos de produtividade e de qualidade de produtos do setor de cerâmica vermelha do sul catarinense, por meio da tecnologia de secagem rápida. Ressalta-se ainda o forte alinhamento do tema com o objetivo 12 dos ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU – Organização das Nações Unidas: Consumo e produção responsáveis.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a possibilidade de aplicação de tecnologias produtivas de secagem rápida e de recursos minerais de fontes alternativas de base primária (argilas de áreas abandonadas) capazes de contribuir para a circularidade mineral e o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região do APL-MF.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear as características tecnológicas existentes na região de Morro da Fumaça (de base mineral e processual) necessárias à aplicação do método de secagem rápida na fabricação de cerâmica vermelha;
- Formular composições com fontes minerais alternativas de base primária, utilizando o delineamento de misturas para aplicação na tecnologia de secagem rápida;
- Analisar as características minerais e de processamento, por meio do conhecimento dos parâmetros tecnológicos necessários ao processo de secagem em ciclos rápidos para a adequação das composições cerâmicas da região de Morro da Fumaça;
- Analisar as características tecnológicas e propriedades finais dos materiais obtidos em ciclo rápido de secagem, como forma de contribuir por meio da circularidade mineral para o desenvolvimento sustentável da região do APL-MF.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 INDÚSTRIA CERÂMICA VERMELHA

As cerâmicas representam uma categoria abrangente de materiais compostos que desempenham papéis diversos em nosso cotidiano. Desde cerâmicas à base de argila utilizadas em utensílios domésticos ou até mesmo empregadas em sensores e antenas de tecnologia aeroespacial, esses dois extremos originados de materiais cerâmicos exercem uma influência significativa na população global (Kurian; Thankachan, 2023). A utilização da cerâmica como um produto tecnológico remonta ao período mesolítico, datando de aproximadamente cinco a dez mil anos atrás. Nesse período, as sociedades antigas utilizavam técnicas manuais para misturar, moldar e decorar artefatos confeccionados a partir de matérias-primas de origem argilosa (Oliveira; Hotza, 2015).

Com o avanço da tecnologia, as cerâmicas têm progressivamente adquirido relevância como uma categoria fundamental de novos materiais. Elas desempenham um papel insubstituível em setores como a aviação, aeroespacial, indústria de defesa, eletrônica, biomedicina e energia nuclear, entre outros. Isso se deve às notáveis propriedades desses materiais, incluindo alta resistência térmica, dureza, resistência química e isolamento elétrico, tornando-os ideais para aplicações em ambientes extremos e tecnologicamente avançados (Li *et al.*, 2021).

Essas propriedades se destacam pela notável estabilidade química derivada de ligações químicas intrínsecas estabelecidas entre componentes. Essa estabilidade é um resultado direto da combinação de ligações iônicas e covalentes, criando uma estrutura molecular robusta e altamente resistente à degradação química. As ligações iônicas, onde elétrons são transferidos entre átomos, e as ligações covalentes, onde elétrons são compartilhados, colaboram para fortalecer as estruturas das cerâmicas. Essa combinação fortalece as propriedades fundamentais desses materiais, conferindo-lhes uma resistência notável a reações químicas adversas, tornando-os essenciais para aplicações em ambientes tecnologicamente desafiadores (Fiocchi, 2014).

A combinação dessas propriedades faz das cerâmicas a escolha preferencial em setores que requerem materiais robustos e confiáveis para suportar condições

extremas e demandas tecnológicas avançadas. Essa versatilidade e desempenho excepcional das cerâmicas são fatores-chave no seu crescente reconhecimento e adoção em diversos campos de aplicação.

A indústria cerâmica, tanto no contexto brasileiro quanto continental, pode ser subdividida em diversos segmentos, cada um com características distintas e níveis tecnológicos específicos. Essas subdivisões englobam a cerâmica vermelha, da qual terá uma notória abordagem nesse estudo, cerâmica branca, materiais refratários, cerâmica avançada e revestimentos cerâmicos. Cada um desses segmentos possui particularidades que os diferenciam em termos de composição, propriedades e aplicações, refletindo as variadas especializações dentro da indústria cerâmica (Killer; Rotta, 2019).

O segmento de cerâmica vermelha é composto de um amplo e diversificado conjunto de materiais de alvenaria amplamente empregados na construção civil (Motta *et al.*, 2001).

A indústria cerâmica estrutural é considerada uma das indústrias de materiais fundamentais no desenvolvimento mundial, com significativo papel no setor manufatureiro por um período que se estende a mais de 300 anos. Do ponto de vista histórico, isso demonstra a longevidade e a relevância contínua da indústria cerâmica no contexto da construção civil (Reaney *et al.*, 2023).

No Brasil a cerâmica vermelha experimentou melhorias significativas durante os séculos XVI ao XIX. Esse avanço teve início com a chegada dos colonizadores europeus, que introduziram suas técnicas de construção. Eles empregaram essas técnicas na construção de notáveis edifícios, como palácios, residências e igrejas, fazendo uso predominantemente de tijolos produzidos a partir das argilas locais. Esse desenvolvimento histórico não apenas enriqueceu o patrimônio arquitetônico do Brasil, mas também evidencia a importância da cerâmica vermelha como um componente essencial na construção (Corrêa, 2012).

A respeito do destaque alcançado por algumas empresas no setor, observa-se uma notável predominância de pequenas e médias empresas, distribuídas por todo o território nacional. No que diz respeito ao domínio tecnológico, algumas delas atingiram um elevado grau de sofisticação ao longo de todo o processo produtivo, abrangendo desde a fase de preparação da matéria-prima até as etapas de conformação, secagem e queima. Todavia, esta situação não representa a norma

geral, e muitas empresas ainda persistem em estágios consideravelmente atrasados no que tange à modernização tecnológica (Gomez *et al.*, 2020).

Alinhado com as tendências globais, buscando otimizar seus recursos produtivos para atender à demanda existente e alcançar resultados superiores, esse setor está orientado a realizar investimentos e aprimoramentos em seu sistema de produção, levando em consideração um amplo espectro de fatores. Diante das demandas do mercado e das responsabilidades ambientais, as indústrias cerâmicas estão promovendo alterações substanciais em seus processos de fabricação, com especial ênfase na melhoria da eficiência energética (Junior, 2016).

A indústria cerâmica também é identificada como uma candidata viável para receber resíduos sólidos industriais, pois as temperaturas empregadas no processo de fabricação de cerâmica têm a capacidade de encapsular e estabilizar componentes potencialmente perigosos, como metais pesados e substâncias tóxicas. Estes elementos podem ser incorporados na matriz cerâmica sinterizada, resultando em um material sólido, robusto e inerte. Esta prática contribui para a minimização dos impactos ambientais e promove a economia de recursos naturais (Maciel *et al.*, 2023).

4.2 ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS (APL)

Os Arranjos Produtivos Locais (APL) baseiam-se em estudos comportamentais e teorias que visa o bem coletivo, fundamentou-se em estudos passados que foram aprimorados de acordo a necessidade evolutiva, como exemplo “A Teoria da Ecologia Organizacional” criado nos anos 70 de Hannan e Freeman. Esse estudo trouxe considerações relevantes sobre como as organizações se adaptam às mudanças que ocorrem em seu ambiente (Alvarenga *et al.*, 2013). Pode ser classificada dentro da perspectiva funcionalista, que possui atributos como o realismo (a realidade é determinada pelo mundo), o positivismo (o conhecimento é adquirido) e o determinismo (a situação é influenciada pelo ambiente). Nessa abordagem, considera-se que o ambiente externo é estático e cabe às organizações se adaptarem internamente para reduzir as influências recebidas (Lima, 2011).

Nesta teoria, adota-se uma abordagem baseada em Darwin, onde aqueles mais adaptados sobrevivem, pois o foco do estudo se dá as populações e não as

organizações individuais. A população é composta por um conjunto de organizações que possuem características e atividades semelhantes, as quais compartilham formas comuns (Regner, 2001).

Quanto maior a resistência das empresas a aderirem novos conceitos, maior a probabilidade de essas empresas não conseguirem se adaptar e, assim, os processos seletivos serão implementados. Por sua vez, as organizações que não se adaptarem acabarão por perecer, enquanto aquelas que superarem a resistência progredirão. Levar em conta esse aspecto é crucial e importante, como apontam (Maiello *et al.*, 2018; Rodrigues, 2004; Silva; Silva, 2017).

O APL na sua identidade traz a criação de oportunidades dentro das cadeias de produção, com o objetivo de assegurar que o desenvolvimento de produtos esteja alinhado com os ciclos naturais, visando a redução dos fatores externos negativos associada aos processos produtivos. A partir das características intrínsecas de interação e colaboração presentes nos arranjos regionais, busca contribuir para a expansão da economia circular no Brasil (Oliveira *et al.*, 2018).

Um APL é caracterizado como uma concentração geográfica de empresas que mantêm relações interdependentes. Esse arranjo é composto por diversos atores, incluindo agentes econômicos, atores políticos e sociais, bem como instituições afins. É relevante observar que a formação de um APL promove uma sinergia entre essas entidades, o que contribui para a especialização produtiva e a competitividade no mercado, gerando benefícios econômicos e sociais para a região em questão (Pinheiro; De Francisco, 2016).

Os dados sobre o número de APLs no país são imprecisos, com informações variando dependendo da fonte consultada. No entanto, é certo que há um crescimento progressivo e contínua mobilização dos governos nesse sentido. O governo federal adotou a estratégia de desenvolvimento por meio da inclusão do tema em seus planos plurianuais (PPA), no Plano Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação, na Política de Desenvolvimento Produtivo e no Programa Brasil Maior (Tizziotti *et al.*, 2019).

A implementação bem-sucedida desse modelo de práticas que visam a busca da melhoria em conjunto, pode resultar em benefícios econômicos, ambientais e sociais, ao promover a otimização dos recursos e a redução do impacto ambiental associado às atividades produtivas.

4.3 MATÉRIAS-PRIMAS CERÂMICAS

A indústria mineral desempenha um papel significativo na economia brasileira, fornecendo matérias-primas essenciais para sustentar a agricultura e a indústria na sociedade atual. O Brasil possui uma ampla variedade de atividades no setor, abrangendo desde empresas que exploram jazidas de classe mundial e minerais cruciais para o desenvolvimento nacional, até minas que atendem principalmente às necessidades locais e regionais (Machado, 1998).

A riqueza mineral é influenciada pelo cenário geológico, ou seja, a forma como as rochas e sedimentos ocorrem na natureza, o que cria condições favoráveis para a formação de minerais de valor econômico. Esses fatores geológicos naturais, combinados com o crescimento das áreas urbanas e industriais e a demanda resultante por matérias-primas, levam as atividades de mineração a se concentrarem em áreas produtoras específicas, de acordo com o tipo de substância mineral e sua utilidade (Silva Da, 2019).

Algumas substâncias minerais, devido aos custos de transporte, precisam ser extraídas perto dos lugares onde serão utilizadas. Isso faz com que as instalações de produção estejam espalhadas por várias áreas geográficas, já que há demanda por esses minerais. A capacidade de esses produtos serem economicamente viáveis e competitivos no mercado dependam significativamente da distância que eles precisam percorrer durante o transporte (Cozzolino, 1997; Muianga, 2012).

O mineral argila se forma e se encontra em dois ambientes diferentes: o marinho e o continental, cada um com suas especializações em vários subambientes. No ambiente continental, a argila pode surgir em ambientes distintos, cada qual com características próprias: solo, lacustre, fluvial, deltaico, lagunar e glacial. Ela também pode ocorrer em subambientes hidrotermais. Já no ambiente marinho, a argila é encontrada em subambientes diversos, como plataforma costeira, talude continental, fundo abissal e crista oceânica.

No ciclo das rochas, a formação dos minerais argilosos, do ponto de vista geológico, ocorre em três estágios: alteração meteórica/hidrotermal, sedimentação e compactação. O tipo e a velocidade de decomposição das rochas dependem de fatores litológicos, geomorfológicos, biológicos e climáticos. É nas camadas de decomposição das rochas que surgem os chamados minerais de formação recente

ou autogênicos sem interferências de agentes externo, com destaque para os minerais argilosos.

A evolução geoquímica da decomposição envolve desintegração mecânica, decomposição química e a transformação e formação de novos minerais. Esses processos se baseiam na mobilidade diferencial dos elementos químicos principais que formam minerais e rochas: silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), titânio (Ti), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K). A intensidade da decomposição pode ser avaliada em termos geoquímicos pelos chamados índices de decomposição (Ferraz, 2004).

4.3.1 Argilas

O termo "argila" aplica-se à diferentes definições: para um ceramista, argila é um material natural que, ao ser misturado com água, se transforma em uma pasta plástica; para um sedimentologista, é um termo granulométrico que engloba sedimentos dominados por partículas com diâmetro equivalente a 2 μm . Um petrologista considera a argila como uma rocha friável, composta por minerais extremamente finos não visíveis a olho nu, enquanto um mineralogista a define como um mineral ou mistura de minerais argilosos com granulometria muito fina (Ferraz, 2004; Peres, De Souza, 2012).

Os minerais de argila são produtos resultantes de combinações químicas e mineralógicas complexas, compreendendo sílica no estado coloidal (SiO_2) e elementos metálicos (Al_2O_3 , Fe_2O_3) entre outros, na forma de óxidos. Os feldspatos são os minerais mais suscetíveis à ação da natureza, sendo os precursores dos argilominerais. Além do tamanho reduzido, a composição mineralógica singular confere a essas partículas um comportamento notavelmente distinto em relação às partículas de silte e de areia (Teixeira-Neto, 2009).

Do ponto de vista industrial, as argilas e suas propriedades são explicadas como compostos de silicato de alumínio, que estão na forma hidratada e podem conter, em alguns casos, outros elementos como ferro, potássio, cálcio e sódio. É graças a essas características que as argilas, quando em contato com água, apresentam propriedades que vão ser importantes para o processo produtivo, como a capacidade de moldar-se, resistência mecânica em ambientes úmidos, redução de

volume durante a secagem. Todas essas propriedades oferecem uma ampla gama de aplicações tecnológicas (Patricio *et al.*, 2014).

Além disso, as argilas são fáceis de moldar e mantêm sua resistência tanto após o processo de secagem quanto do processo de queima. Elas são compostas principalmente por argilominerais, filossilicatos, que podem ser subdivididos em grupos como caulinita, illita e montmorilonítica, dependendo da sua estrutura cristalina (Santana, 2006; Vieira *et al.*, 2007).

As massas de cerâmica vermelha industriais são comumente subdivididas em dois tipos principais: massa simples e massa composta. A massa simples refere-se àquelas compostas por uma única matéria-prima, que possui as proporções necessárias de minerais para permitir a fabricação de cerâmica desejada. Um exemplo disso são as massas usadas na produção de telhas, tijolos. Geralmente, essas massas consistem principalmente em argila, embora possam ocasionalmente incluir a mistura de várias argilas ou materiais argilo-arenosos (Junior, 2016).

Já a massa é formada pela combinação de diferentes matérias-primas classificadas em plásticas, que conferem características importantes na fase de moldagem e resistência mecânica e de baixa plasticidade, que desempenham um papel vital no processamento térmico, estrutura e cor do produto (Barba, 2002).

A ação humana também exerce impacto significativo nos atributos das matérias-primas, mediante atividades agrícolas específicas, drenagem, calagem, fertilização e uso de herbicidas, as quais podem alterar certos parâmetros das matérias-primas cerâmicas. O perfil das matérias-primas cerâmicas é interpretado verticalmente, resultado de transferências e acúmulos de material que promovem a formação das camadas, cuja estrutura é distinta da rocha íntegra ou mesmo da alterada, nas quais predominam apenas transformações mineralógicas. Portanto, podem ser definidos como camadas diferenciadas baseadas em características como cor, textura, consistência, estrutura e presença de atividade biológica (Matencio, 2020; Macedo *et al.*, 2002).

4.4 GRUPO DOS MINERAIS ARGILOSOS

Em um mineral argiloso, os elementos mais comuns, como oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio no estado iônico, adotam arranjos em

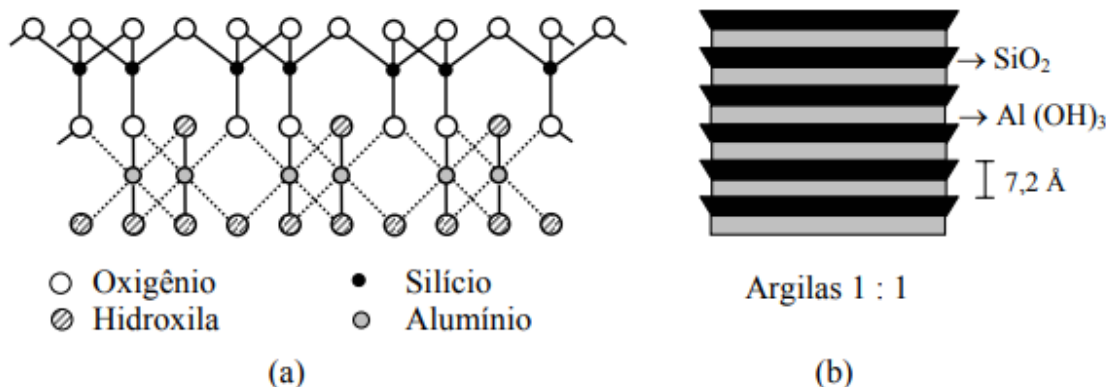
modelos estruturais tridimensionais semelhantes a esferas. Cada modelo abriga diversas espécies, uma característica frequentemente decorrente de substituições atômicas isomórficas comuns nos minerais argilosos. A forma como essas unidades estruturais se interliga permite a divisão das argilas em três principais grupos: caulinitas, ilitas e montmorilonitas (Meunier, 2005).

Além disso, é importante ressaltar que a estrutura desses minerais argilosos, influenciada pela disposição e pela interação entre essas espécies, não apenas determina suas propriedades físicas e químicas, mas também impacta diretamente em suas aplicações práticas, como na indústria cerâmica.

4.4.1 Caulinita

A unidade estrutural fundamental das caulinitas é composta por uma camada de tetraedros de sílica e outra de octaedros de gibsita. Nesta última, as hidroxilas são parcialmente substituídas pelos oxigênios nos vértices dos tetraedros da camada de sílica. O plano comum das duas camadas é composto por átomos de oxigênio e hidroxilas, com uma ligação iônica entre elas. Sob o aspecto iônico, a unidade estrutural das caulinitas é neutra, como indicado na Figura 1(a). A estrutura das caulinitas é resultante do empilhamento dessas unidades, onde a conexão entre o plano de hidroxilas de uma unidade e o plano de oxigênio de outra é estabelecida por meio de ligações de hidrogênio. Comumente, as caulinitas são compostas por 6 unidades estruturais, como representado na Figura 1(b) (Delavi, 2011; Meunier, 2005).

Figura 1: Unidade estrutural das caulinitas, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica



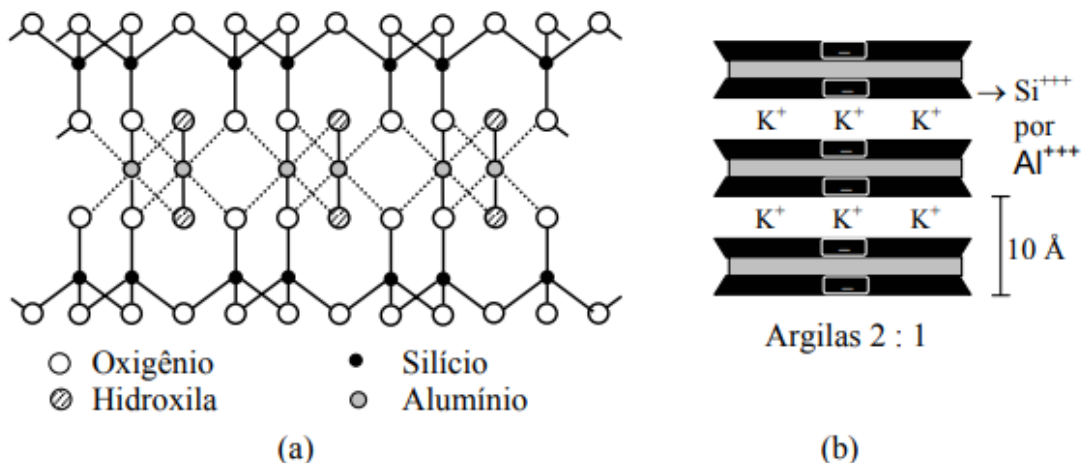
Fonte: Adaptado de Delavi (2011) e Meunier (2005).

As ligações de hidrogênio presentes nas caulinitas, embora sejam fracas, são suficientemente fortes para impedir a penetração de grandes quantidades de água entre as unidades estruturais. Isso resulta em uma pequena expansão, dificuldade de dispersão na água e baixa plasticidade das caulinitas. Devido às valências livres estarem concentradas apenas nas extremidades, a capacidade de adsorção de água e de permuta catiônica é limitada. Essas argilas se destacam por serem as de maior tamanho, variando em comprimento de 0,3 a 4 microns e em espessura de 0,05 a 2 microns (Meunier, 2005; Tavares, 2008).

4.4.2 Ilita

As ilitas possuem a mesma unidade estrutural básica que as montmorilonitas Figura 2(a). No entanto, nas ilitas, os átomos de silício das camadas de sílica são parcialmente substituídos por alumínio. Isso gera valências livres nas camadas periféricas das unidades estruturais, que são neutralizadas por cátions de K, dispostos entre as unidades empilhadas. O esquema estrutural das ilitas está representado na Figura 2(b), onde o cátion K se ajusta bem às malhas hexagonais dos planos de oxigênio das camadas de tetraedros de sílica e não é deslocado por outros cátions (Delavi, 2011; Meunier, 2005).

Figura 2: Unidade estrutural da ilita, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica



Fonte: Adaptado de Delavi (2011) e Meunier (2005).

A capacidade de adsorção de água e troca catiônica nas argilas ilitas é restrita às ligações quebradas nas extremidades das camadas, resultando em uma

capacidade relativamente baixa. O diâmetro médio das ilitas varia entre 0,1 e 0,3 microns. Nas ilitas, se a substituição do silício por alumínio for mínima, as ligações entre as unidades estruturais mediadas pelos cátions K podem ser insuficientes, permitindo a penetração da água. Quando isso acontece, as propriedades das ilitas se assemelham às propriedades das montmorilonitas (Delavi, 2011; Meunier, 2005).

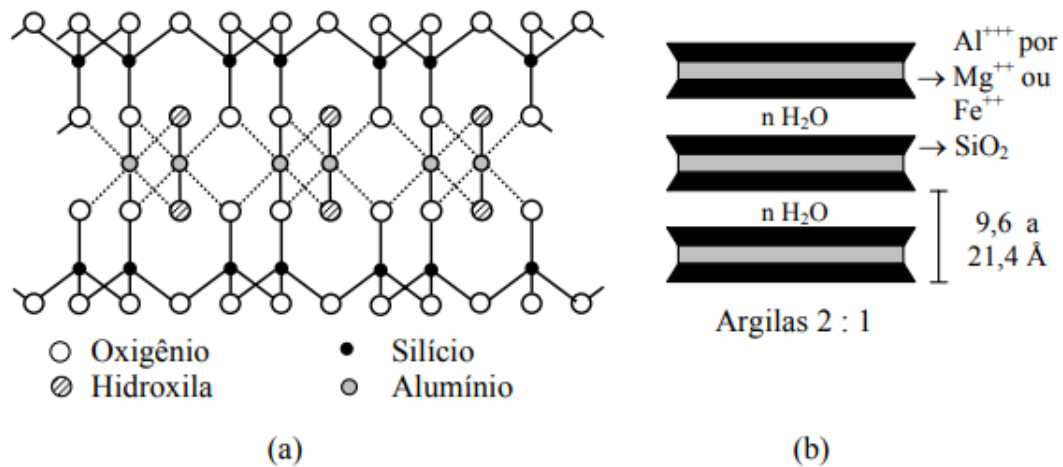
Os minerais deste grupo constituem uma porção significativa de argilas, apresentando um comportamento intermediário entre a caulinita e a montmorilonita. A ilita se distingue da montmorilonita por sua menor capacidade de troca catiônica e por sua menor expansibilidade intercristalina, resultante de uma menor capacidade de retenção de água ou líquidos orgânicos. Além disso, a ligação entre as camadas da ilita é mais estável em comparação com a montmorilonita. É fundamental destacar que essa estabilidade intercadas nas ilitas influencia diretamente diversas aplicações industriais, como na fabricação de materiais de impermeabilização e na estabilização de solos, sendo um fator relevante na engenharia geotécnica para a formulação de misturas e tratamento de solos (Meunier, 2005; Tavares, 2008).

4.4.3 Montmorilonita

A unidade estrutural fundamental das montmorilonitas consiste em uma camada de octaedros de gibsita entre duas camadas de tetraedros de sílica, conforme mostrado na Figura 3(a). Nas montmorilonitas, o alumínio das camadas de octaedros é parcial ou totalmente substituído por magnésio e ferro, gerando um excesso de valências negativas na camada interna. Essas valências não podem ser satisfeitas por cátions devido às camadas de tetraedros adjacentes. A estrutura das montmorilonitas é caracterizada por ter moléculas de água entre as unidades estruturais, conforme o esquema na Figura 3(b) (Delavi, 2011; Meunier, 2005).

Devido à fácil penetração da água entre as camadas estruturais, as montmorilonitas se dispersam facilmente na água, têm grande expansão e alta plasticidade. Além disso, apresentam uma considerável capacidade de adsorção de água e de troca catiônica devido às ligações quebradas nas extremidades e às cargas negativas nas superfícies das unidades estruturais. As montmorilonitas são as argilas de menor tamanho (Delavi, 2011; Meunier, 2005).

Figura 3: Unidade estrutural da montmorilonita, (a) estrutura molecular, e (b) estrutura simbólica



Fonte: Adaptado de Delavi (2011) e Meunier (2005).

As montmorilonitas são argilominerais pertencente ao grupo das esmectitas, incluindo também as bentonitas, são compostas por uma estrutura de alumínio intercalada entre duas de sílica. Devido à frágil união entre as camadas de sílica, esse grupo de minerais possibilita uma alta adsorção de moléculas de água, exibindo notáveis variações volumétricas sob diferentes níveis de umidade.

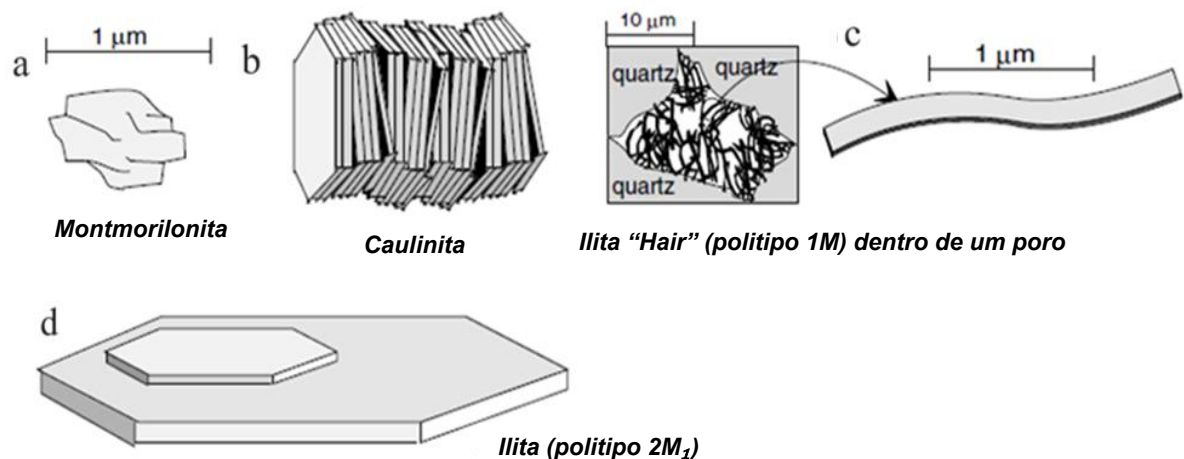
Essas argilas representadas na Figura 4 apresentam uma considerável capacidade de troca catiônica, permitindo a retenção e a liberação de íons relativamente à plasticidade, esta é mais evidente em teores de água superiores aos observados na caulinita.

É relevante ressaltar que a capacidade de expansão e retração das montmorilonitas em resposta à variação de umidade tem implicações significativas na indústria, especialmente na formulação de fluidos de perfuração usados na extração de petróleo e na fabricação de selantes e materiais de impermeabilização, onde a capacidade de retenção de água e a plasticidade controlada são atributos essenciais para sua eficácia e desempenho (Meunier, 2005; Tavares, 2008).

As argilas em forma cristalina apresentam variadas formas, influenciadas não apenas pela espécie mineral, mas também por uma série de condições de cristalização. Fatores como temperatura, composição química, pH das soluções e duração do processo desempenham papéis significativos nesse processo. Por exemplo, condições de formação específicas podem resultar em variações no tamanho e na forma dos cristais, sendo que tais características geralmente não são

independentes entre si. Consequentemente, a identificação confiável das espécies a partir da forma dos cristais é desafiadora, embora seja possível delinear algumas características gerais.

Figura 4: Exemplos de morfologia de cristais de algumas espécies de argilas, a) Vêu: montmorilonita dentro de uma bentonita, b) Livretos: caulinita dentro de um digenético arenito, c) Ilita "Hair" dentro de um poro de arenito, d) Placas hexagonais de ilita.



Fonte: Meunier (2005).

Os cristais de esmectita, em particular, costumam ser caracterizados por seu tamanho reduzido, com cristalitos frequentemente abaixo de 1 µm, e por sua finura extrema, com algumas camadas medindo apenas alguns nanômetros. A morfologia desses cristais pode variar consideravelmente dependendo do cátion que satura a folha intermediária. Por exemplo, a montmorilonita e as esmectitas trioctaédricas, como as saponitas e estevensitas, tendem a assumir uma aparência de flocos, muitas vezes com bordas enroladas, conforme ilustrado na Figura 4. Por outro lado, a beidelita frequentemente exibe uma morfologia de ripas hexagonais, sugerindo uma possível relação com o grau de turboestratismo no empilhamento das camadas. (Meunier, 2005).

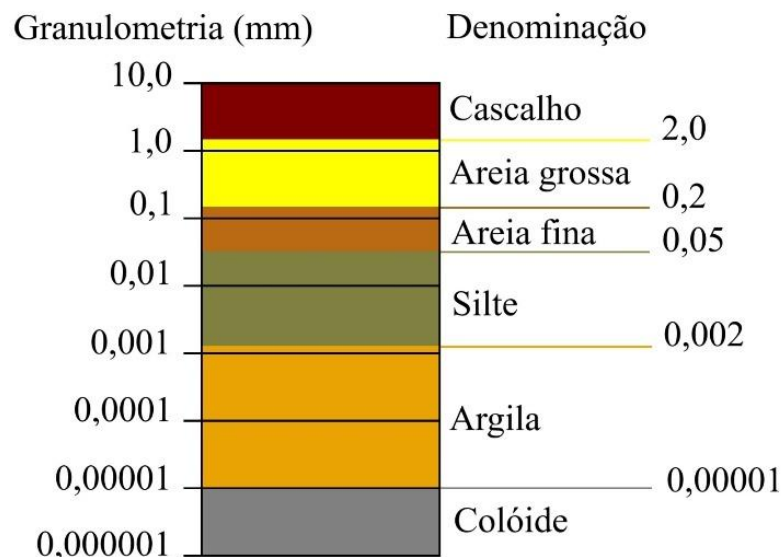
4.5 CARACTERÍSTICA GRANULOMÉTRICA DAS ARGILAS

As matérias-primas desempenham um papel fundamental no processo cerâmico e podem ser divididas em dois grupos distintos: as matérias-primas

plásticas (argilosas) e as de baixa plasticidade (complementares). As matérias-primas plásticas são de suma importância na fase inicial de moldagem da cerâmica, uma vez que lhe conferem plasticidade, tornando-a maleável e facilmente moldável de acordo com as exigências do processo. Por outro lado, as matérias-primas de baixa plasticidade ganham especial relevância durante as etapas subsequentes, especialmente durante o processo térmico, onde contribuem de maneira significativa para a formação final do produto cerâmico (Furszyfer *et al.*, 2022).

A distribuição de tamanho de partículas desempenha um papel crucial na identificação e caracterização dos diferentes tipos de matérias-primas. Esse aspecto é definido como a distribuição percentual das partículas do solo conforme suas dimensões representadas na Figura 5, e pode ser determinado por meio de métodos como peneiração, sedimentação ou análise a laser.

Figura 5: Classificação das partículas de argilominerais de acordo com as suas dimensões



Fonte: Adaptado de Pádua *et al.* (2011).

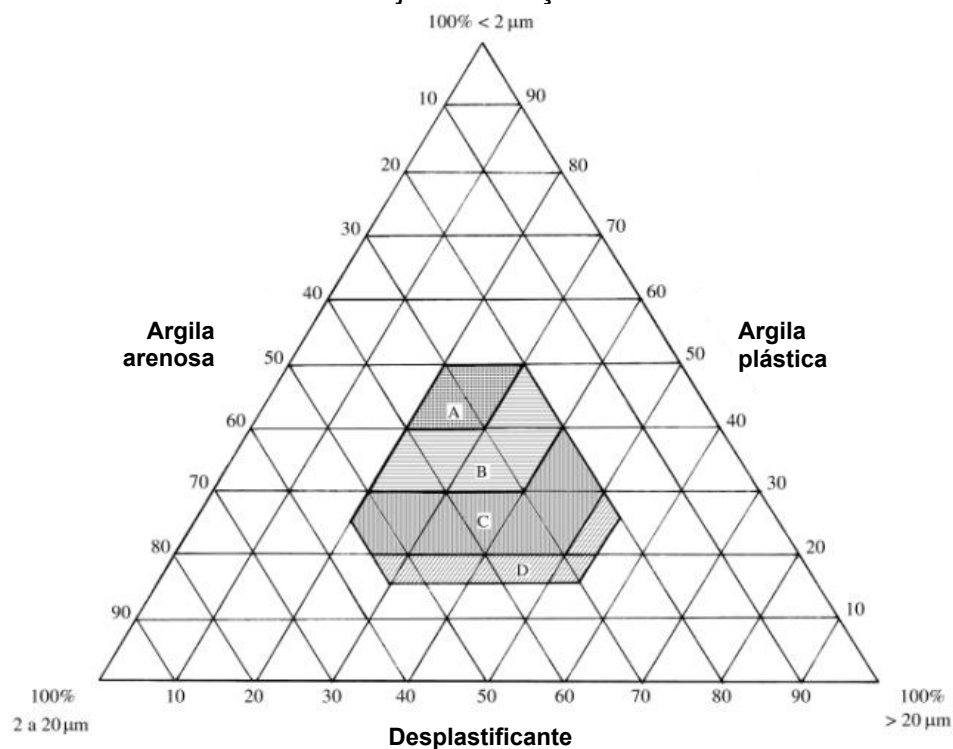
As frações granulométricas comumente identificadas incluem areia, silte e argila, sendo que cada uma dessas frações apresenta características físicas e químicas distintas, que exercem uma influência direta sobre as propriedades do solo resultante (Pádua *et al.*, 2011).

As partículas dos argilominerais são classificadas com base em suas dimensões, em uma ordem crescente, que inclui argilas ($\leq 0,002$ mm), siltes (0,002 a 0,06 mm), areias (0,06 a 2,0 mm) e cascalhos (2 a 60 mm), com subdivisões em

finos, médios e grossos para os três últimos. Partículas maiores que 60 mm são chamadas de calhaus, enquanto aquelas com diâmetro superior a 200 mm são designadas como pedras. É essencial notar que cascalhos, areias, calhaus e pedras resultam de processos mecânicos ou físicos, enquanto siltes e argilas derivam de processos químicos (Machado *et al.*, 2003).

Uma das principais forma de classificar a tipologia das argilas é fornecida pelo clássico diagrama triaxial de Winkler Figura 6. Este diagrama é fundamental na definição de especificações granulométricas para produtos cerâmicos, como tijolos maciços, blocos (tijolos furados) e telhas.

Figura 6: Diagrama de Winkler estabelecido pela aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, A: Material de qualidade, com dificuldade de produção (requer mistura), B: Telhas, capas, C: Tijolos furados, D: Tijolos maciços



Fonte: Andrade (2009).

Ele permite a identificação das proporções ideais de argilas de diferentes granulometrias para atender aos requisitos específicos de cada tipo de produto cerâmico. O diagrama de Winkler é uma ferramenta valiosa no controle do processo de formulação de massas cerâmicas, oferecendo diretrizes para a obtenção de características desejadas nos produtos (Coelho *et al.*, 2012).

Argilas com granulometria muito fina podem apresentar desafios durante o processamento, tornando necessário o ajuste dessa distribuição granulométrica. Essa adaptação pode envolver a adição de outras argilas ou materiais não plásticos à composição original, visando alcançar uma distribuição granulométrica mais adequada para facilitar o processamento, reduzir custos, minimizar o consumo de matérias-primas e evitar desperdícios (Pracidelli; Melchiades, 1997).

Aprofundando as informações trazidas pelo diagrama triaxial de Winkler, a observação revela uma flexibilidade nos limites das especificações de argila, particularmente entre as classes C e D, uma vez que, na prática, é comum que ceramistas utilizem a mesma composição para a produção de telhas e blocos cerâmicos. Além da composição granulométrica, que reflete o teor de argilominerais e quartzo, outras características exercem influência no desempenho das argilas. Um bom exemplo é o teor de matéria orgânica, que pode afetar a plasticidade e a resistência mecânica das peças no estado cru (Amaral, 2016; Andrade, 2009).

4.6 PLASTICIDADE

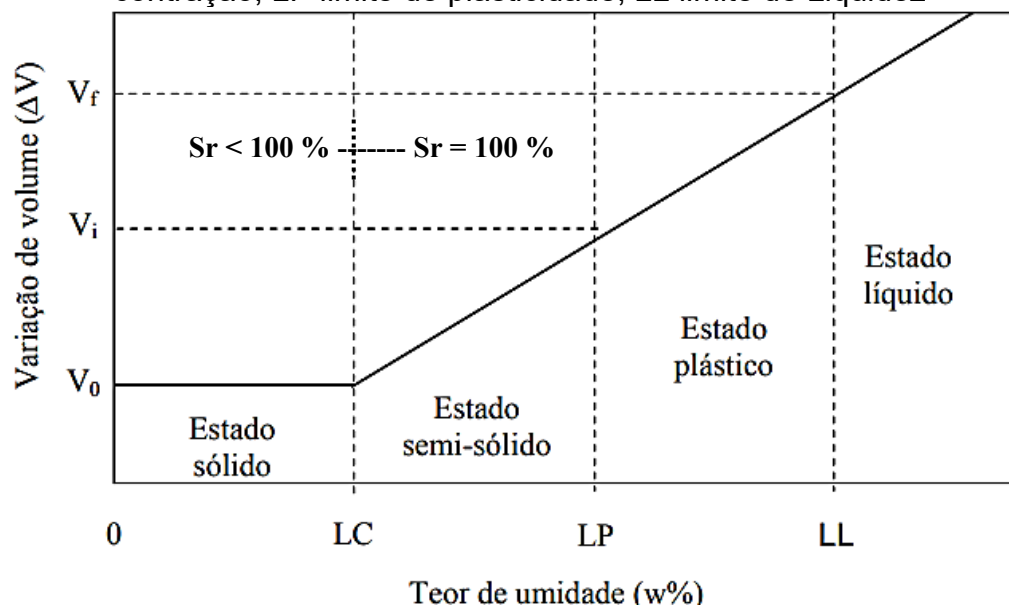
A propriedade plasticidade por sua vez é a capacidade que as argilas têm de serem moldados sob determinadas condições de umidade com grandes deformações permanentes, sem rupturas, fissuras ou variações de volume consideráveis, dentro de amplas faixas de umidade. Portanto, são os argilominerais que conferem plasticidade, diferentemente dos minerais como quartzo e feldspato, mesmo que suas partículas tenham diâmetros inferiores a 0,002 mm (Machado; Machado, 1997).

No início do século XX, o químico sueco Albert Atterberg dedicou-se a pesquisas sobre as propriedades das argilas de aspecto finos, especialmente em relação à consistência. Ele observou que as argilas finas demonstram variações significativas em seu estado de consistência conforme o teor de umidade presente. Em outras palavras, as características de consistência das argilas variam de acordo com seus níveis de umidade. Atterberg definiu teores específicos de umidade como os limites de consistência, mais conhecidos como limites de Atterberg (Ribeiro; Souza, 2018).

O termo consistência está intrinsecamente ligado ao grau de resistência e plasticidade das argilas, atribuídos às interações internas entre as partículas das argilas. Os minerais classificados como coesivos apresentam uma consistência plástica dentro de determinados limites de umidade. Abaixo desses limites, assumem uma consistência sólida, enquanto acima deles adotam uma consistência líquida. Além desses estados de consistência plástica e sólida, é possível identificar um estado intermediário, conhecido como consistência semissólida (Molina Junior, 2017).

Na Figura 7 observa-se os estados de consistência dos argilominerais. São estes teores de umidade que delimitam as transições entre os estados sólido e semissólido, semissólido e plástico, e plástico e líquido são denominados como limite de contração, limite de plasticidade e limite de liquidez, respectivamente. Esses limites são fundamentais para a compreensão das propriedades de consistência das argilas e são identificados por meio de análises específicas que determinam os comportamentos e estados desses materiais em diferentes condições de umidade (Setyo Muntohar; Hashim, 2005).

Figura 7: Diagrama de consistência dos argilominerais: Variação volumétrica em função do teor de umidade. V_0 volume inicial seco; V_i volume intermediário; V_f volume final; $S_r < 100\%$ poros com ar; $S_r = 100\%$ o solo está saturado; LC limite de contração; LP limite de plasticidade; LL limite de Liquidez



Fonte: Adaptado de Setyo Muntohar & Hashim (2005).

A presença de minerais específicos pode alterar significativamente o limite líquido e plástico de uma argila. Da mesma forma, diferentes tipos e quantidades de cátions adsorvidos na superfície das partículas podem influenciar esses limites. Argilas com partículas mais finas tendem a exibir limites diferentes daqueles com partículas maiores, devido às suas características estruturais distintas. A composição da água presente, incluindo sua atividade iônica e características químicas, também pode afetar estes limites, tornando a compreensão desses fenômenos uma tarefa complexa e multidisciplinar, que requer análises detalhadas e abordagens integradas de estudo (Pereira, 2004).

Para avaliar essas relações, a Tabela 1 oferece os valores dos limites de consistência de diferentes argilominerais. Estes dados representam uma importante referência para entender como as características específicas de cada mineral influenciam na plasticidade das argilas, fornecendo informações valiosas para o entendimento dos comportamentos e das propriedades mecânicas das argilas (Caputo, 2015).

Tabela 1: Limites de Atterberg e limite de contração para diferentes argilominerais.
Limites de consistência dos argilominerais

Argilominerais	Limite de Liquidez LL (% H₂O)	Limite de Plasticidade LP (% H₂O)	Limite de Contração LC (% H₂O)
Montmorilonita	100 – 900	50 – 100	8,5 – 15
Ilita	60 – 120	35 – 60	15 – 17
Caulinita	30 – 110	25 – 40	25 - 29

Fonte: Adaptado de Caputo (2015).

O índice de plasticidade é o mais utilizado atualmente entre os diversos índices que relacionam o limite líquido, o plástico e, em alguns casos, o teor de umidade da argila. Fisicamente, representa a quantidade de água necessária para acrescentar a um argilomineral, levando-o do estado plástico ao líquido. Esse índice é definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (Machado; Machado, 1997).

As argilas plásticas consistem predominantemente em caulinita, com proporções variáveis de ilitas, quartzo, matéria orgânica e esmectitas. Suas impurezas incluem óxidos de ferro, óxidos de titânio e minerais carbonáticos. Os

depósitos dessas argilas se manifestam na forma de sedimentos recentes não consolidados, associados a rios que transportaram e depositaram quantidades adequadas de caulinita, quartzo, matéria orgânica e outras substâncias ao longo de suas margens (Boulos *et al.*, 2015; Meunier, 2005).

Este tipo de argila se caracteriza pela elevada concentração de matéria orgânica e pelas cores claras quando submetidas à queima industrial. Devido à sua capacidade de conferir maior resistência e plasticidade às massas, essas argilas são empregadas na fabricação de diversos materiais cerâmicos tradicionais. Na indústria de cerâmica vermelha, as argilas plásticas são comumente utilizadas para corrigir possíveis deficiências em termos de especificações físicas ou químicas encontradas em argilas comuns (Motta *et al.*, 2004).

Argilas com elevado teor de sílica são exemplos de argilas com baixa plasticidade, esse modelo desempenha o papel de elemento estrutural em materiais cerâmicos, favorecendo o processo de secagem e resultando em menores valores de retração (Bogas, 2013). Este composto é caracterizado por sua natureza refratária, conferindo-lhe a capacidade de resistir a elevadas temperaturas de queima sem sofrer deformações estruturais (Silva, 2021).

É importante destacar que as argilas de baixa plasticidade desempenham funções cruciais não apenas na fase de processamento térmico, mas também nas etapas de moldagem e secagem, contribuindo para reduzir a retração das peças e facilitar a secagem. Durante a queima, as matérias-primas de baixa plasticidade têm um papel fundamental, controlando transformações, deformações e o processo de sinterização. Por essa razão, esses materiais não plásticos são conhecidos por diversos nomes, como inertes, vitrificantes e fundentes (Tizziotti *et al.*, 2019).

4.7 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

A indústria cerâmica é um campo complexo que se desdobra em duas etapas fundamentais: a fase primária, que envolve a exploração e obtenção da matéria-prima, destacando-se especialmente a argila; e a fase subsequente, de transformação, que assume a responsabilidade pela transformação dessa matéria-prima em produtos de qualidade. Embora essas fases possam ser conduzidas por empresas distintas, é essencial ressaltar que estão profundamente interligadas, cada

uma exercendo um papel crucial no desempenho integral da cadeia produtiva (Cozzer; Saquetto, 2019).

No contexto específico das matérias-primas, as argilas emergem como elementos essenciais, considerando seu notável volume de produção e consumo. São componentes de destaque na fabricação de cerâmica estrutural e de revestimentos. Sua relevância econômica e funcionalidade asseguram uma posição proeminente na indústria (Prado, 2011; Macedo *et al.*, 2008).

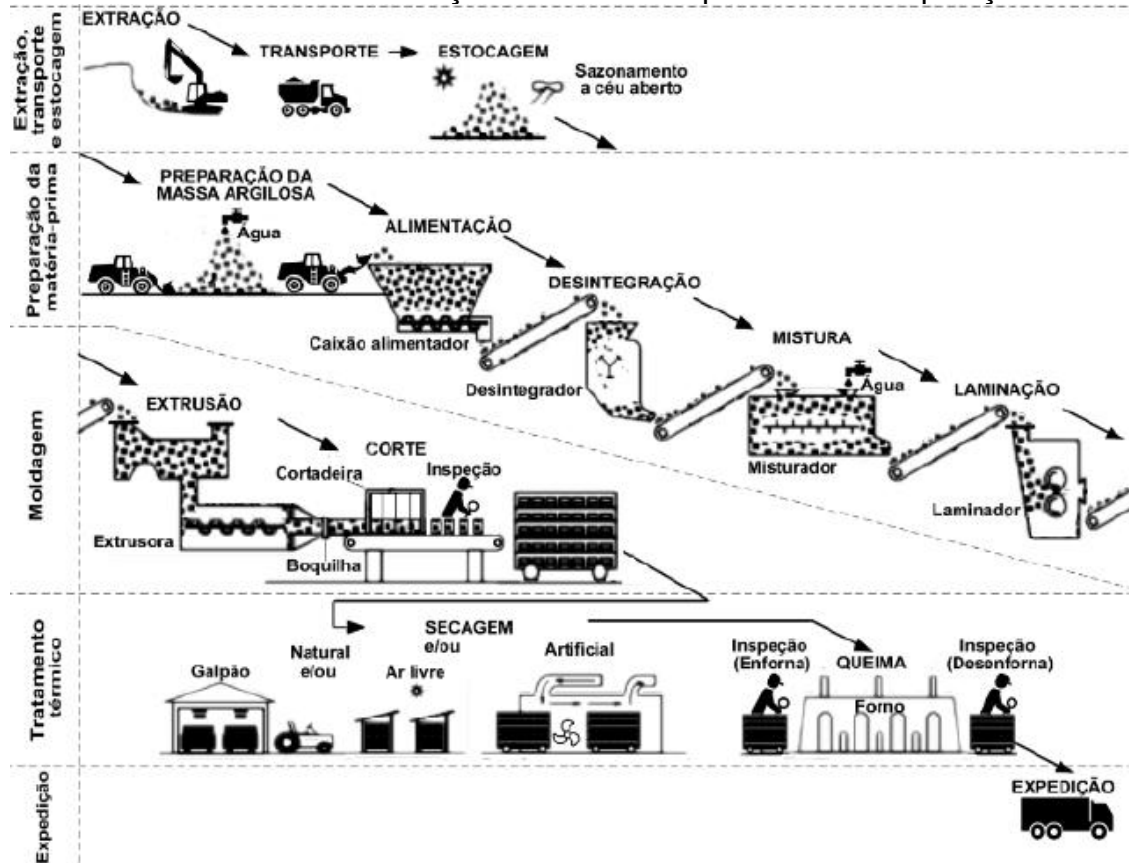
Assim como em qualquer setor altamente competitivo, a indústria de cerâmica vermelha direciona seus esforços para atender às demandas específicas do mercado, buscando incessantemente a produção de produtos que atendam às exigências e tendências dos consumidores. Esse compromisso implica uma gestão criteriosa de insumos específicos, como matérias-primas a alocação estratégica de recursos humanos capacitados para operar tecnologias avançadas e a otimização de fontes de energia, visando não só a eficiência produtiva, mas também a sustentabilidade ambiental, fatores cruciais na competitividade do setor (Rocha; Palma, 2012).

Em todas as indústrias, incluindo a de cerâmica vermelha, é observada uma padronização na sequência e procedimentos fundamentais do processo de produção. No entanto, é importante ressaltar que a variação significativa ocorre, principalmente, na tecnologia empregada em cada etapa. Essa variação tecnológica tem um impacto direto na eficiência, precisão e otimização de todas as fases do processo produtivo. Além disso, a adaptação de tecnologias mais sustentáveis e ecoeficientes também está se tornando uma preocupação crescente na indústria, refletindo-se na escolha e no desenvolvimento de processos produtivos mais ecologicamente corretos (Campos, 2008). O processo produtivo da cerâmica vermelha conforme observado na Figura 8 tem início com a extração das argilas em jazidas específicas.

Após a extração e estocagem das argilas, o processo produtivo da cerâmica vermelha segue três passos essenciais: a preparação da matéria-prima, a conformação (ou moldagem) e o tratamento térmico. Durante a preparação da matéria-prima, as argilas são processadas e refinadas para alcançar as especificações desejadas. Na fase de conformação, a matéria-prima preparada é moldada de acordo com o design e as dimensões desejadas. Por fim, o tratamento

térmico é realizado para promover a sinterização das peças, conferindo-lhes resistência e durabilidade. Uma visão abrangente das fases e dos procedimentos de produção empregados na fabricação de cerâmica vermelha, ilustrando seu fluxo geral no processo produtivo (Silva *et al.*, 2017).

Figura 8: Fluxograma representativo do processo de fabricação da cerâmica vermelha desde a extração das matérias-primas até a expedição



Fonte: Silva & Silva (2017).

Na fase de preparação da matéria-prima as argilas estocadas à intempérie são submetidas ao processo de sazonalamento natural, que através da ação da chuva e presença de sol, são eliminadas as impurezas voláteis como sais solúveis e materiais orgânicos. O período que o material permanece nessas condições determina a qualidade da matéria prima obtida (Maia, 2018). O próximo passo consiste no preparo mecânico das argilas que envolve a ação do homem através de máquinas e processamento. As argilas de aspecto mais maleáveis são apenas desagregadas, misturadas e laminadas para seguir adiante no processamento. As argilas com aspectos mais duros envolvem um processo a mais, que seria a

moagem desse material para obtenção de partículas menores obtendo uma melhor homogeneização subsequentemente. Outro ponto de destaque se dá na preparação de massa, onde as argilas misturadas recebem o teor de água necessária para a realização da conformação (Silva *et al.*, 2017).

Na etapa de conformação, a argila, previamente preparada e homogeneizada passa por diversas fases antes da conformação. Isso inclui a correção da quantidade de água para atingir o ponto de plasticidade ideal, realizado no equipamento conhecido como misturador de pás. Envolve também o processo de laminação que tem como objetivo formar lâminas de argila homogêneas e eliminar quaisquer resíduos de argila seca e pequenas pedras. Após esse processamento, já em linha de produção contínua, ocorrem a extrusão a vácuo. A massa argilosa é densificada, adquirindo rigidez para possibilitar sua movimentação, o vácuo desempenha um papel crucial, compactando as partículas e formando fitas de maneira contínua. Posteriormente, essas fitas são cortadas nas dimensões desejadas, resultando em peças cruas. Para a produção de telhas, há um processo adicional, que consiste na prensagem a úmido de bastões extrudados e cortados, conformados por um molde de movimento mecânico contínuo. Os corpos destinados à extrusão apresentam teores de umidade superiores a 14–15 %, podendo, dependendo das matérias-primas, alcançar valores de 20–22 % (Silva *et al.*, 2017; Zorzi *et al.*, 2004).

Amaral *et al.* (2011) se referem ao procedimento de extrusão como a passagem de um volume de material cerâmico por meio de uma abertura moldada ou perfilada, referida como a boca de extrusão. A partir deste ponto, o material adquire uma forma moldada com seção transversal constante, sendo então submetido ao corte para obtenção das peças que seguirão para a secagem.

A secagem representa uma fase complexa no processo de produção de cerâmica vermelha. Seu objetivo principal consiste em remover, por meio da evaporação, a água utilizada na fase de conformação, a qual é essencial para conferir plasticidade à massa cerâmica. A água empregada na conformação pode ser categorizada em dois tipos distintos: água intersticial e água livre, também conhecida como água de plasticidade (Vieira *et al.*, 2003).

A água intersticial preenche os poros das partículas, enquanto a água livre se encontra entre as partículas de argila, atuando para separá-las e facilitar a manipulação no processo de conformação. A presença da água livre, juntamente

com a composição da massa, o nível de umidade e a compactação da mistura, são os principais fatores que influenciam a retração das peças cerâmicas. Devido a essa influência direta, a retração assume um papel de grande relevância tecnológica como parâmetro de controle no processo de fabricação (Cruz, 1996).

Durante o processo de secagem, ocorrem tensões que têm o potencial de originar defeitos comprometedores para a qualidade das peças cerâmicas. Portanto, a compreensão dos mecanismos subjacentes possibilita a prevenção desses problemas. Além disso, o controle preciso da temperatura, da taxa de aquecimento e da duração ideal para a completa secagem são outros fatores determinantes na minimização das possibilidades de ocorrência de falhas (Bogas, 2013; Pádua *et al.*, 2011; Vieira *et al.*, 2003).

A queima também conhecida como sinterização, como o processo de fortalecimento intrínseco de estruturas porosas por meio do aumento controlado da temperatura. Durante esse procedimento, reações químicas podem ser desencadeadas, resultando na formação de novas fases cristalinas, potencialmente acompanhadas pela presença de fase líquida. O Quadro 1 exemplifica os patamares que ocorrem conforme o aumento da temperatura, com os diferentes fenômenos pré-determinado (Bogas, 2013).

No processo de sinterização, ocorre a ligação entre as partículas de um material através do fenômeno de difusão no estado sólido. Em temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão, as partículas se fundem, resultando na coalescência, o que promove um aumento na densidade do corpo cerâmico. Esse processo de coalescência reduz a porosidade do material, culminando em um aumento significativo de sua resistência mecânica (Menezes *et al.*, 2007; Silva; Alves Júnior, 1998).

A setor cerâmico vermelho consome consideravelmente recursos naturais e energéticos. No Brasil, estima-se que cerca de 141,6 milhões de toneladas de argila sejam consumidas anualmente, além de um consumo anual de energia elétrica variando de 25 a 45 kWh por tonelada de argila. A geração de desperdícios também é um desafio, demandando uma discussão crescente sobre a sustentabilidade na indústria cerâmica vermelha. Identificar e resolver desperdícios de argila, água, energia elétrica e biomassa vegetal são questões essenciais para o desenvolvimento sustentável deste setor industrial (Falcão, 2018).

Quadro 1: Transformações físicas e químicas ocorridas durante a queima de um corpo cerâmico

Temperatura °C	Fenômenos ocorridos
20 a 150	Eliminação de água livre não eliminada na secagem ou, entretanto, absorvida do meio ambiente.
< 200	Eliminação de água coloidal intercalada entre lamelas de argilominerais.
350 a 650	Combustão de matéria orgânica e dissociação de compostos sulfurosos.
450 a 650	Transformações irreversíveis de decomposição dos minerais argilosos com perda de água de constituição. Neste fenômeno endotérmico a caulinita é transformada em metacaulinita tornando-se instável.
570	Transformação de quartzo- α (trigonal) em quartzo- β (hexagonal) acompanhada de expansão violenta no aquecimento e contração violenta no resfriamento.
800 a 950	Decomposição dos carbonatos e liberação de CO_2 .
> 700	Início da sinterização com reações químicas da sílica, alumina e elementos fundentes originando sílica-aluminatos complexos.
> 1000	Início da gressificação. Amolecimento dos sílico-aluminatos e assimilação de pequenas partículas menos fundentes, conferindo maior compacidade e dureza ao corpo cerâmico. Ocorre contração resultante da densificação.
1000 a 1100	Transformação de fase da caulinita, formando mulita.

Fonte: Adaptado de Bogas (2013).

4.8 SECAGEM

No contexto específico do processo de fabricação nas indústrias de cerâmica vermelha, a etapa de secagem é particularmente sensível e complexa. É frequente que nesta fase surjam defeitos que só se tornam perceptíveis após a queima. A compreensão dos mecanismos subjacentes à secagem não apenas permite uma análise mais aprofundada dos defeitos, mas também oferece insights sobre como evitá-los de maneira mais eficaz (Sales *et al.*, 2014).

No estudo do fenômeno de secagem da argila, é evidente que a eficiência desse processo está intimamente relacionada tanto às considerações termodinâmicas quanto às características morfológicas do meio poroso, que é a argila (Teixeira-Neto; Teixeira-Neto, 2009).

O processo de secagem implica na transferência simultânea de calor e massa, visando a remoção substancial da água presente no material poroso. Esse procedimento ocorre através do transporte e evaporação da água em um meio gasoso que circunda o material e está em um estado insaturado (Gomez *et al.*, 2020).

O processo de secagem pode ser categorizado como convectivo, condutivo ou radiativo. Na secagem convectiva, o ar aquecido entra em contato com o material a ser seco, transferindo calor para sua superfície sólida. Isso resulta na criação de um gradiente de temperatura entre a superfície e o interior do material. Esse gradiente facilita a transferência de calor por condução, aquecendo tanto o material sólido quanto a água presente nele. O aquecimento da água aumenta sua pressão de vapor, criando condições propícias para a movimentação da água do interior do material para o ar circundante. Consequentemente, são estabelecidos gradientes de umidade nas camadas do material e, por meio da difusão molecular, o líquido mais interno migra em direção à superfície, onde evapora e é removido pelo ar de secagem externo (Martins *et al.*, 2020).

Na fase inicial do processo de secagem, a evaporação da água é constante em relação ao tempo. A água deve migrar do interior para a superfície da peça, mantendo-se compatível com a velocidade de evaporação. No entanto, esse efeito só é viável enquanto houver um excesso de água nos capilares; somente assim a eficiência da evaporação permanecerá estável. A presença de uma atração entre as partículas de água e argila resulta em uma significativa redução na taxa de evaporação. Portanto, a taxa de evaporação na superfície da argila é consideravelmente menor do que na superfície livre da água (Nandi, 2022).

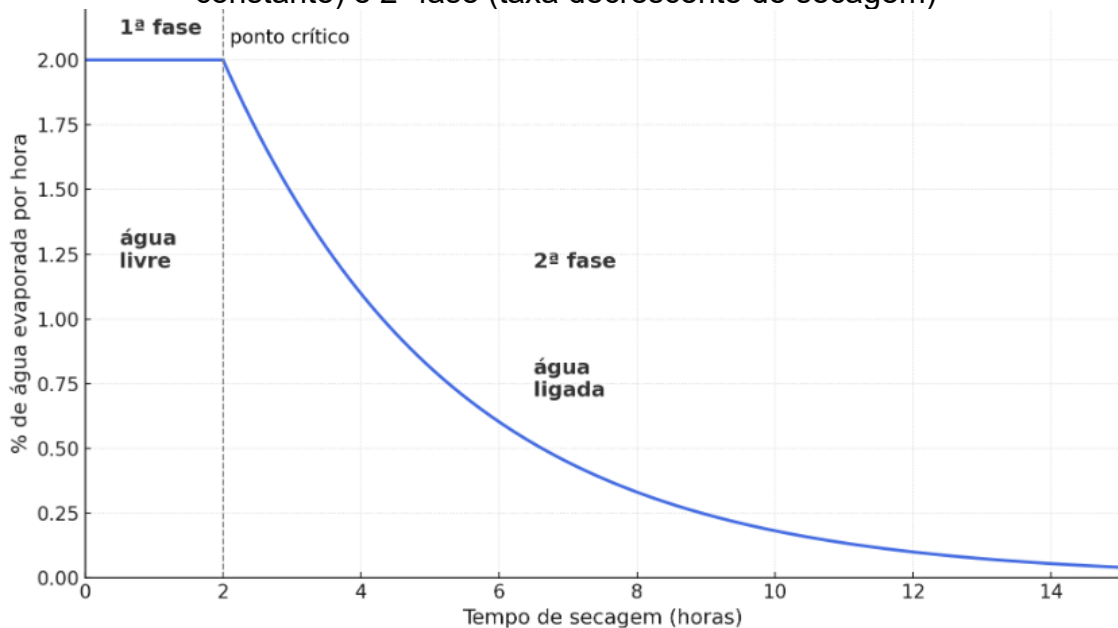
A transferência de massa (água) para o ambiente pode ocorrer por meio de dois fenômenos distintos: difusão, associada a baixos níveis de hidratação, e capilaridade, predominante em condições de alta hidratação, considerando também o tamanho e a distribuição dos poros. Na fase inicial da secagem de materiais cerâmicos, quando os poros estão saturados, ocorre uma taxa constante de

secagem, acompanhada pelo deslocamento da água livre em direção à superfície, impulsionada pelas forças capilares (Da Silva, 2016).

Conforme ilustrado na Figura 9, essa etapa corresponde à 1ª fase da secagem, também chamada de fase de evaporação constante. Durante esse período, a taxa de evaporação mantém-se elevada e constante, pois há abundância de água livre nos poros maiores do material. O processo é controlado principalmente pelas condições externas (temperatura, umidade relativa e ventilação) e pela capacidade do material de transportar água até a superfície por capilaridade (Alvarez, 2013).

A partir do ponto crítico, que marca a transição entre a saturação dos poros e a redução da água disponível na superfície, inicia-se a 2ª fase da secagem, caracterizada por uma taxa de evaporação decrescente. Nesta etapa, a água existente nos poros está fortemente adsorvida à matriz cerâmica, sendo classificada como água ligada. A mobilidade dessa água é reduzida, e o processo de secagem passa a ser limitado pela difusão da umidade a partir das regiões internas do material até a superfície. Assim, a taxa de secagem diminui progressivamente ao longo do tempo, sendo controlada pela estrutura interna e pelas características do material cerâmico (Alvarez, 2013).

Figura 9: Desempenho da secagem em função do tempo: 1ª fase (evaporação constante) e 2ª fase (taxa decrescente de secagem)



Fonte: Alvarez (2013).

A energia (calor sensível) presente no fluxo de ar é transferida para a superfície do material poroso, induzindo a vaporização dessa camada superficial de água, que é então carregada pelo ar. Uma parcela desse calor contribui para o aumento da temperatura nessa região, dando início ao processo de transferência de calor em direção ao centro da peça. Durante esse processo, a movimentação interna ocorre simultaneamente em fases líquida e de vapor, pois a vaporização da água na superfície cria um gradiente de umidade em relação ao interior, desencadeando também o processo de difusão, com o movimento do interior da peça em direção à superfície, influenciado pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso (Callejas *et al.*, 2016).

Dessa maneira, a fase líquida é primariamente um fenômeno de capilaridade, enquanto o movimento em vapor é principalmente um fenômeno de difusão, ambos influenciados pelas características do meio poroso, controlando assim a taxa de secagem. A taxa de secagem é a medida da velocidade com que a umidade se move do interior do produto para a superfície, sendo diretamente influenciada pelo estado físico das moléculas de água (seja líquido ou vapor) e pelo mecanismo de transferência de massa (Martins *et al.*, 2020). Segundo Dias (2013) o processo de secagem compreende duas etapas distintas, caracterizadas por diferentes níveis de facilidade na perda de umidade.

4.8.1 Taxa de secagem constante

Durante esta fase, a água que evapora é considerada água livre. Nesse período, a migração da água do interior para a superfície do produto é adequada para acompanhar a perda de água por evaporação na superfície. A transferência de massa e de calor é proporcional, mantendo a velocidade de secagem constante. Enquanto houver massa de água suficiente na superfície para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem permanecerá estável (Brosnan; Robinson, 2003; Dias *et al.*, 2013).

Durante essa etapa, parte da superfície do corpo cerâmico permanece coberta por um filme de água. Esse filme de água tende a evaporar devido ao processo de secagem, sendo alimentado principalmente pela sucção capilar que atua no interior do corpo cerâmico. Se a transferência de energia for através de convecção, a

temperatura na superfície da peça permanecerá úmida devido ao ar que circula sobre a superfície úmida. Para evitar perdas excessivas de massa nessa fase, são adotados cuidados específicos, visando evitar uma retração excessiva da peça, que pode resultar em fissuras ou até mesmo na ruptura da peça (Dias *et al.*, 2013).

4.8.2 Taxa de secagem decrescente

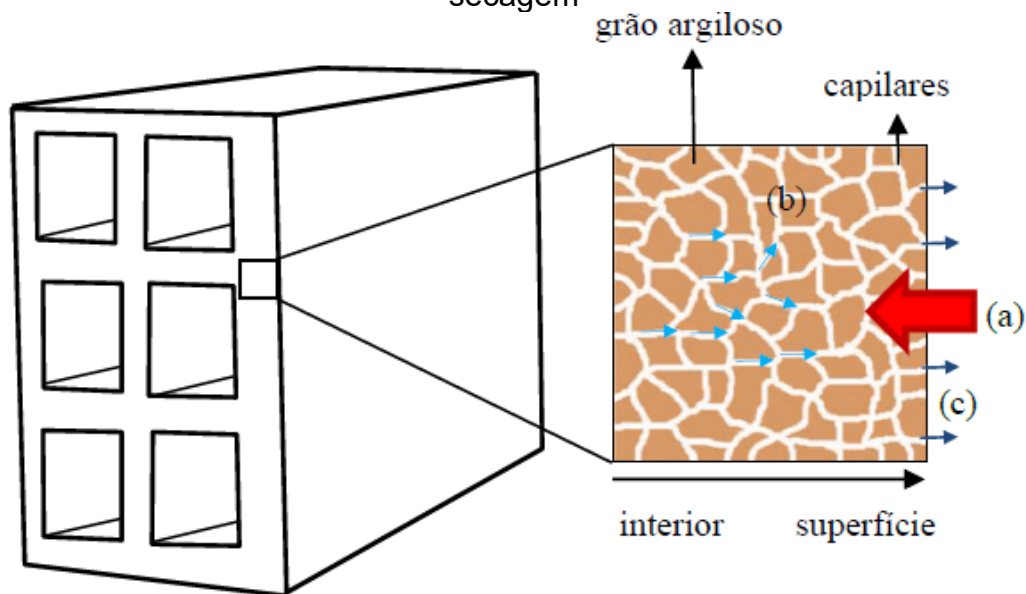
Neste estágio, a quantidade de água na superfície do produto diminui, reduzindo, assim, a transferência de massa. Ocorre um decréscimo na transferência de calor, não compensado pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. Consequentemente, a temperatura do produto aumenta, alcançando a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo de secagem é encerrado (Martins, 2016; Silva, 2018).

Especificamente nesta etapa de secagem, ocorre inicialmente um período em que a temperatura do ar circulante deve ser suficientemente alta para possibilitar que a água do interior do produto cerâmico alcance a superfície. Esse período inicia-se após a fase de taxa constante, precisamente após atingir a umidade crítica, momento em que a taxa de perda de umidade começa a diminuir. Nesse ponto, a superfície não está mais coberta de água, e a evaporação da umidade começa no interior do corpo cerâmico (Martins, 2016; Silva, 2018).

Essa etapa é caracterizada pela remoção da umidade residual do interior do corpo cerâmico, que migra em direção à superfície devido ao processo de difusão conforme a Figura 10. A temperatura torna-se a principal variável de controle durante a secagem, alcançando níveis elevados. É fundamental que a velocidade da difusão da umidade interna seja compatível com a taxa de evaporação, evitando que a superfície seque mais rapidamente, o que pode causar contrações, obstrução dos poros e, consequentemente, fissuras. Nessas condições, a água do interior encontra dificuldade para migrar, sendo forçada às extremidades, o que compromete a integridade do material. Assim, o volume de vazios tende a ser proporcional à quantidade de água evaporada, e a redução de volume corresponde à perda de umidade.

Conforme mostra a Figura 10, o ponto (a) representa o fluxo de água para a superfície, predominante na fase inicial da secagem. O ponto (b) mostra a migração da umidade por capilaridade entre os grãos argilosos, enquanto o ponto (c) ilustra o fluxo de vapor na superfície, dependente das condições externas. A harmonia entre esses mecanismos é essencial para uma secagem uniforme e livre de defeitos. (Zaccaron, 2018).

Figura 10: Atuação dos mecanismos de secagem da peça cerâmica: fluxos internos (a) evaporação superficial, (b) migração capilar, (c) otimização da eficiência da secagem



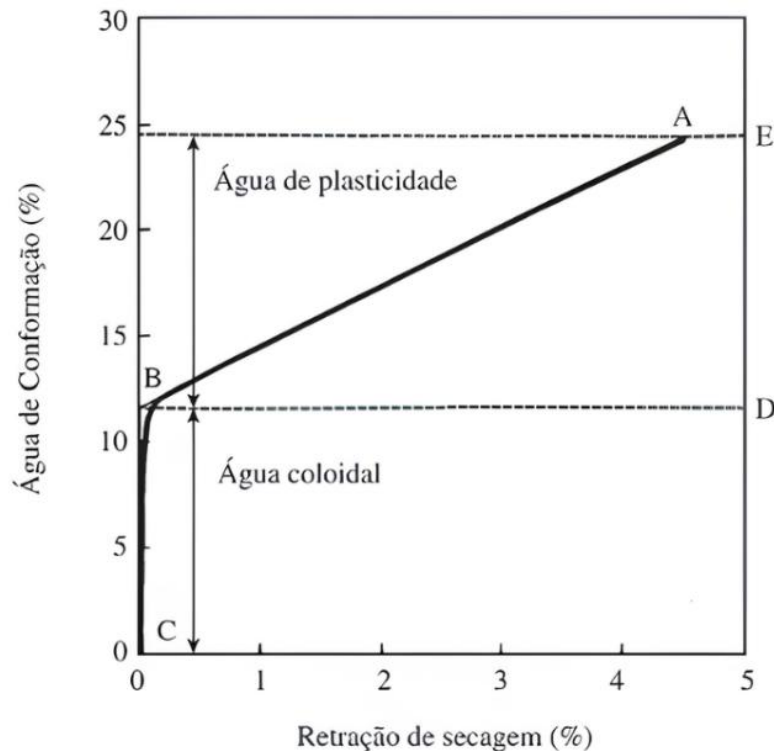
Fonte: Zaccaron (2018).

4.8.3 Curva de Bigot

A retração experimentada pelas peças de cerâmica vermelha durante o processo de secagem é um parâmetro de grande importância tecnológica, pois as tensões geradas nessa etapa podem resultar em trincas, comprometendo a qualidade do produto. Uma abordagem para prevenir tais fenômenos é a utilização das curvas Bigot, que acompanham a perda de massa em relação à retração linear. Essas curvas, além de monitorar a relação entre perda de massa e retração, buscam otimizar o ciclo de secagem, fornecendo dados para previsão de tempo e custos envolvidos em lotes específicos de secagem de produtos (Brosnan; Robinson, 2003). A Figura 11 apresenta uma curva de Bigot que ilustra a retração durante o

processo de secagem em relação à perda de água de conformação. A linha (A), representado no eixo das ordenadas (linha E), indica a quantidade de água inicialmente presente nas peças no início da secagem. Na linha principal demarcada no gráfico, é possível observar a retração total que ocorrerá durante o processo.

Figura 11: Curva de Bigot: relação entre teor de umidade (água de conformação) e retração durante o processo de secagem em materiais cerâmicos



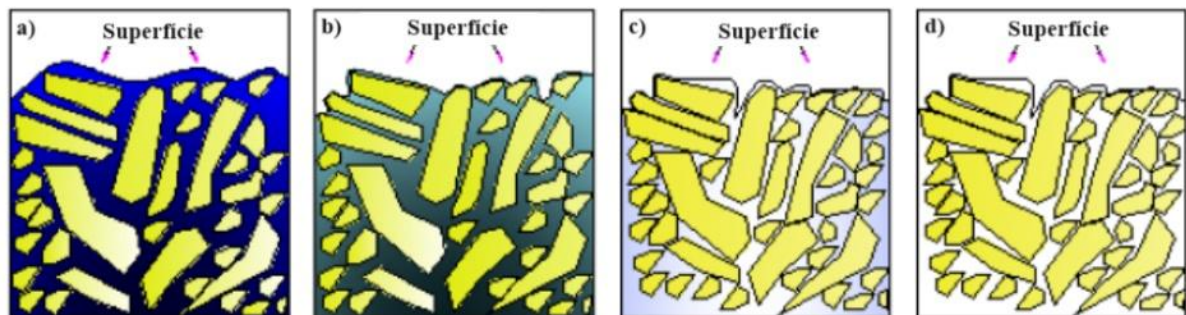
Fonte: Vieira *et al.* (2003).

A linha (A-B) corresponde à primeira fase da secagem, marcada pela eliminação da água de plasticidade situada entre as partículas. Essa é a etapa mais crítica, pois a remoção da água entre as partículas está associada à retração, aumentando o risco de defeitos, conforme mencionado anteriormente. A linha (B-C) representa a segunda fase da secagem, caracterizada pela eliminação da água intersticial. Teoricamente, a linha (B) deveria permanecer no eixo indicando ausência de retração quando a eliminação da água intersticial começa. Porém, na prática, nem todas as partículas entram em contato ao mesmo tempo, e a superfície seca mais rapidamente que o interior da peça, resultando na evaporação de água entre as partículas. Consequentemente, parte da água removida ainda provém da interposição entre partículas. À medida que a água de plasticidade evapora, a água

intersticial dos capilares, que não causa retração, se torna predominante. A linha (D) separa os dois tipos de água de umidade: a água de plasticidade corresponde ao segmento (D-E), enquanto a água intersticial é representada por (D-C) (Vieira *et al.*, 2003).

A Figura 12 traz um esboço do comportamento de uma massa cerâmica durante o processo de secagem. Inicialmente, todas as partículas de argila na massa estão completamente envolvidas por água. Com a evaporação da água, as partículas se aproximam e a massa sofre retração.

Figura 12: Distribuição de água durante a secagem em um corpo cerâmico: (a) saturado, (b) transição, (c) remoção da água livre, (d) remoção da água ligada



Fonte: Adaptado do Avelino (2018).

Na primeira fase da retração, a diminuição de volume do produto úmido é proporcional à redução do volume de água. Conforme a secagem prossegue, as partículas continuam a se aproximar gradualmente até se tocarem completamente. A retração continua, porém a uma velocidade menor devido a estrutura sólida está mais rígida, restringindo o movimento das partículas, à medida que a perda de água passa a ser parcialmente compensada pela formação de poros. Esse período é identificado como a segunda fase de retração. Na última fase, a retração alcança um estado final, onde a secagem adicional aumenta o volume dos poros, mas o volume total da peça permanece constante (Avelino, 2018).

Avelino (2018), propôs uma subdivisão do processo de secagem em quatro estágios distintos, como indicado na Figura 12. No estágio (a), a água se distribui formando uma camada contínua que separa as partículas umas das outras. Conforme o processo avança, ocorre uma gradual aproximação das partículas, resultando na contração progressiva da massa como um todo. No estágio (b), a camada de água retrai até que as partículas entrem em contato, com a água

preenchendo apenas os poros entre elas. No estágio (c), uma fina película de água se fixa na superfície das partículas devido às forças de adsorção, e essa camada é eliminada durante a etapa final de secagem. A quantidade residual de água que permanece está fortemente ligada aos pontos de contato entre as partículas e aos poros restantes (d). Essa divisão em estágios detalha as mudanças físicas que ocorrem durante o processo de secagem, fornecendo um entendimento mais aprofundado das transformações da água na massa cerâmica (Avelino, 2018).

4.8.4 Tipos de secagem

Há dois métodos de secagem empregados nas indústrias de cerâmica vermelha conforme representado no Quadro 2 a secagem natural e artificial.

Quadro 2: Tipos de secagem e principais vantagens e desvantagens

Tipo de secagem	Vantagens	Desvantagens
• Natural	• Menos custo de geração de calor	• Tempo elevado de secagem;
		• Baixa produção
		• Dependência do fator climático
	• Favorece os locais em que as condições climáticas são mais favoráveis	• Pode-se afetar a qualidade das peças (trincas, deformações de homogeneidade de secagem) caso o processo não seja bem controlado
• Artificial	• Menor tempo de secagem	• Custo com geração de calor
	• Maior produtividade	• Requer mais conhecimento técnico do operador
	• Redução de perdas	• Exige equipamentos e controles, como termômetros e higrômetros.
	• Melhoria da qualidade das peças	

Fonte: Adaptado de Junior (2016).

A secagem natural ocorre em meio atmosférico, aproveitando-se da ventilação e da temperatura ambiente, onde o calor necessário para a secagem é proveniente do ar. Nesse processo, o produto úmido é deixado ao ar livre, usualmente em galpões, para a secagem. Geralmente, os produtos cerâmicos são secos por um período que varia entre 7 e 15 dias, dependendo da umidade do material e das condições de umidade relativa do ar nos locais de secagem. É importante observar que quando o ar está excessivamente seco, pode ocorrer uma diferença na velocidade de secagem entre a superfície e o interior das peças, resultando em defeitos como rachaduras, quebras e deformações (Brosnan; Robinson, 2003).

4.9 PERMEABILIDADE

Permeabilidade é uma grandeza física que quantifica a capacidade macroscópica de um meio poroso permitir o fluxo de um fluido através de sua estrutura. Essa propriedade é crucial para compreender e caracterizar os processos de transporte em meios porosos, sendo influenciada pela geometria, distribuição e interconectividade dos poros nos materiais (Moreira *et al.*, 2012; Pezzatti, 2020).

Os poros, característicos de uma vasta gama de cerâmicas, desempenham um papel crucial tanto na fabricação quanto nas propriedades desses materiais. Na fase de fabricação, os poros exercem influência significativa sobre as propriedades mecânicas dos compactos verdes, bem como sobre a permeabilidade requerida para a evacuação dos gases gerados durante os processos de secagem e queima. Além disso, é importante destacar que a presença de porosidade pode afetar a densidade aparente, a resistência à compressão e a condutividade térmica das cerâmicas, influenciando diretamente em sua aplicabilidade em diversos contextos industriais, como na produção de componentes eletrônicos, revestimentos térmicos e produtos estruturais. Ademais, a otimização do controle da porosidade é um aspecto crucial para garantir a qualidade e a eficiência dos produtos cerâmicos em seus respectivos usos finais (Dutra; Pontes, 2002; Lot *et al.*, 2018).

Para a maioria das aplicações práticas, a porosidade de um corpo cerâmico é tipicamente definida pela fração volumétrica dos poros presentes no corpo, sem considerar a morfologia e as propriedades de transporte de cada poro. No entanto, em determinadas circunstâncias, as características individuais dos poros

desempenham um papel crucial na avaliação do desempenho do material cerâmico (Perez; Estevão, 2020; Romano; Pandolfelli, 2006).

Uma manifestação fundamental do fenômeno da permeabilidade é identificada pela existência de um gradiente de pressão diferentes entre dois meios, induzindo o movimento direcional de um fluido de uma região com pressão superior para outra com pressão inferior. Este processo, embora fundamentalmente conduzido pelas leis da mecânica dos fluidos, é altamente influenciado por muitas variáveis, incluindo as propriedades do meio poroso, tais como sua porosidade, tortuosidade e distribuição granular, juntamente com as condições termodinâmicas e mecânicas prevaletentes no sistema. A dinâmica resultante desse fluxo pode se manifestar em uma faixa gama de regimes de escoamento, desde o regime laminar, caracterizado por fluxo suave e organizado, até o regime turbulento, que exhibe padrões complexos de turbulência e instabilidade- (Dutra; Pontes, 2002; Silva *et al.*, 2022).

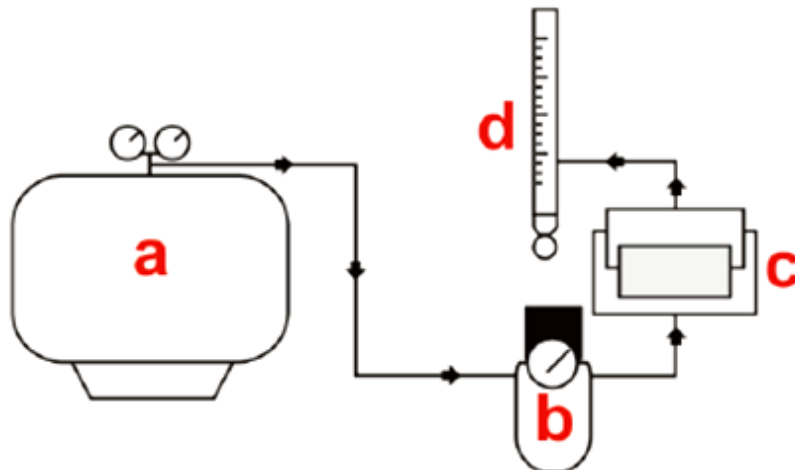
A teoria dos fenômenos de permeabilidade, que considera fluxos laminares homogêneos, tem suas bases na lei estabelecida por Henry Darcy em 1856. Por meio de seus experimentos, Darcy demonstrou que a velocidade de um fluido que atravessa um meio poroso homogêneo é constante, quando em regime laminar. Essa relação é expressa conhecida como Lei de Darcy. Nota-se que a variação da carga hidráulica, em relação à trajetória do fluxo, representando condutividade hidráulica, uma medida que depende tanto das características do meio poroso quanto da densidade e viscosidade do fluido. Dessa forma, através de equações levando em considerações outros fatores podem ser encontrados a variação de pressão exercida sobre o fluido definida na lei de Darcy- (Baldovino, 2018; Innocentini *et al.*, 2000).

Destaca-se que a Lei de Darcy é estritamente válida para regimes de escoamento laminar, considerando apenas os efeitos de atrito na queda de pressão ao longo do meio. No entanto, os efeitos moleculares, especialmente dos gases, podem limitar sua aplicabilidade, uma vez que o diâmetro dos poros pode ser igual ou menor que o caminho livre das moléculas em fluxo do fluido. Além disso, diversos fatores como adsorção, condensação capilar, difusão molecular, efeitos de borda e presença de íons no fluido podem influenciar a medida da permeabilidade quando analisada através da Lei de Darcy. Para lidar com essas condições de contorno,

diferentes resoluções da equação de Darcy foram propostas para corrigir os efeitos que invalidam a solução clássica. O gradiente de pressão demonstra uma tendência parabólica com o aumento da velocidade do fluido, devido à contribuição da inércia e turbulência, como observado por Forchheimer em 1901. Assim, sugeriu-se a modificação da Lei de Darcy, incluindo um segundo termo que representa os efeitos cinéticos da interação entre o fluido e o sólido (Tiab; Donaldson, 2004).

Existem diversos métodos para determinar a permeabilidade de materiais porosos ao ar, tanto em laboratório quanto in situ, cada um com suas características, aparatos, tratamento dos dados, vantagens e desvantagens. A Figura 13 apresenta tais técnicas que podem ser classificadas como destrutivas ou não, dependendo do eventual dano causado à estrutura avaliada. Em geral, os métodos baseiam-se na Lei de Darcy, utilizando diferentes soluções para corrigir os efeitos que invalidam a solução clássica. A viscosidade, densidade e compressibilidade do fluido (normalmente ar ou água) são fatores determinantes para as medidas (Donadel, 2010; Innocentini *et al.*, 2000; Tiab; Donaldson, 2004; Zucatelli, 2016).

Figura 13: Esquema de funcionamento do método Cembureau de medida de permeabilidade Onde: a) Suprimento de ar; b) Regulador de pressão com manômetro; c) Célula de ensaio com corpo-de-prova; d) Bolhometro (vazão)



Fonte: Adaptado de Donadel (2010).

Um método amplamente empregado para a determinação da permeabilidade em concretos é o proposto pelo Comitê Cembureau. Este método é reconhecido por sua aplicabilidade na avaliação dos efeitos da proporção da mistura e do processo de cura no material (Baldovino, 2018). Baseando-se na relação de Hagen-Poiseuille

para fluidos compressíveis sob condições de fluxo estacionário, este procedimento oferece resultados consistentes e uma boa repetibilidade.

No entanto, algumas limitações são observadas, incluindo o risco de danos ao corpo de prova durante o ensaio, especialmente em casos de alta porosidade, e a necessidade de cuidados especiais para evitar vazamentos laterais. O método consiste essencialmente na aplicação de uma pressão constante em uma face do corpo de prova poroso, com subsequente determinação da vazão de saída do ar. É crucial assegurar que o ar percorra exclusivamente ao longo do corpo de prova, sem vazamentos laterais, e que esteja livre de umidade que possa influenciar na permeabilidade ao longo do tempo (Donadel, 2010; Martins, 2006).

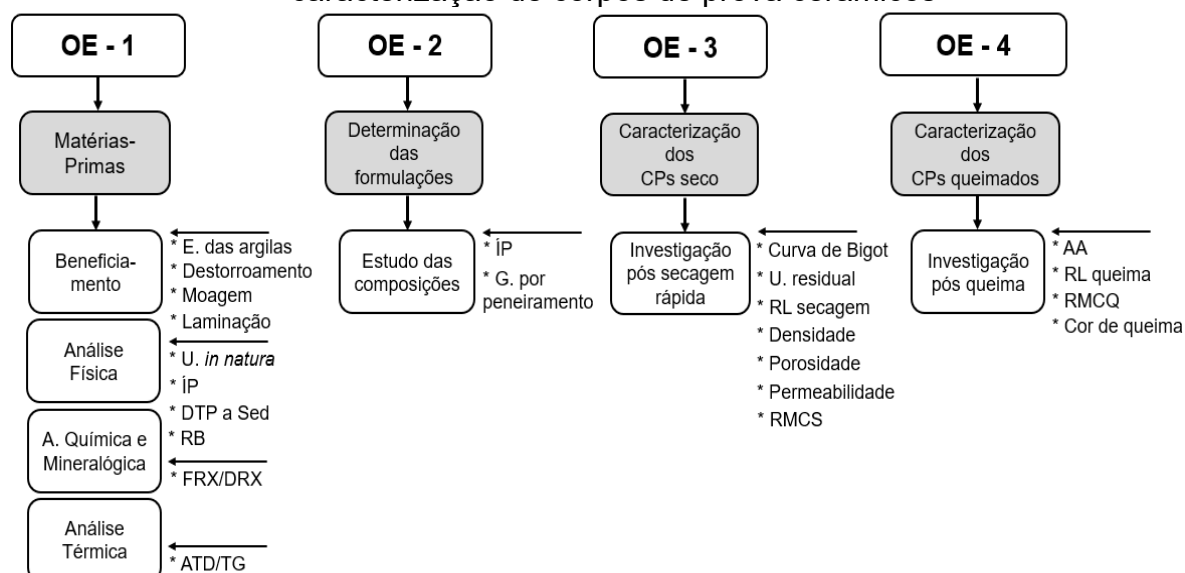
4.9.1 Tortuosidade

O transporte de fluidos ocorre exclusivamente através dos poros comunicáveis, sendo a intensidade desse transporte, ou seja, a permeabilidade do fluido, determinada pela interação entre o fluido e as paredes do poro. A configuração geométrica dos poros desempenha um papel crucial nesse processo, influenciando diretamente a interação fluido-poro e a permeabilidade. Por exemplo, espera-se que poros esféricos apresentem interações diferentes com um fluido em comparação com poros cilíndricos, devido às variações na área de contato. Geralmente, quanto maior a tortuosidade e a área de contato do caminho poroso, maior será a perda de energia (pressão), resultando em uma menor permeabilidade do fluido. Além disso, a conectividade entre os poros também desempenha um papel significativo na facilidade de escoamento do fluido, quanto maior a conectividade entre os poros, mais fácil será o escoamento. Esses aspectos geométricos dos poros são cruciais para compreender e prever o comportamento do fluido em materiais cerâmicos, influenciando diretamente suas propriedades de transporte e, conseqüentemente, seu desempenho em diversas aplicações industriais (Baldovino, 2018; Perez; Estevão, 2020).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O plano experimental foi estruturado em quatro etapas principais: preparação das matérias-primas (OE-1), determinação das formulações (OE-2), caracterização dos corpos de prova (CPs) secos (OE-3) e caracterização dos corpos de prova queimados (OE-4), conforme ilustrado na Figura 14, do qual proporciona uma visão geral do plano experimental estruturado com base nos quatro objetivos específicos (OE) estabelecidos na pesquisa.

Figura 14: Plano experimental por etapas (OE-1 a OE-4) para desenvolvimento e caracterização de corpos de prova cerâmicos



E. das argilas: Escolha das argilas; U: umidade; ÍP: índice de plasticidade; DTP a Sed: distribuição do tamanho de partículas por sedimentação; RB: resíduo bruto; A: Análise; FRX: fluorescência de Raios-X; DRX: difratometria de Raios-X; ATD: análise térmica diferencial TG: termogravimetria; G: granulometria; RL: retração linear; RMCS: resistência mecânica a compressão a seco; AA: absorção de água; RMCQ: resistência mecânica a compressão pós queima

Fonte: Autor (2024).

Inicialmente, as matérias-primas foram submetidas a um processo de beneficiamento, que incluiu as escolhas das argilas que foram utilizadas o destorroamento, moagem e laminação. Em seguida, foram realizadas análises físicas (umidade natural, índice de plasticidade, distribuição do tamanho de partículas por peneiramento e por sedimentação e a determinação do resíduo bruto), análises químicas e mineralógicas (fluorescência de Raios X - FRX e difração de Raios X – DRX), além de análise térmica (análise térmica diferencial e

termogravimetria – ATD/TG), com o objetivo de caracterizar completamente as matérias-primas utilizadas.

Com base nesses resultados, ocorreu a determinação das formulações cerâmicas, por meio do estudo das composições e do ajuste granulométrico, utilizando o índice de plasticidade e a granulometria por peneiramento como base experimental. Na fase seguinte, as formulações foram preparadas e corpos de prova foram obtidas para a caracterização no estado seco, com ênfase na investigação do comportamento frente à secagem rápida. Essa etapa envolveu a análise da curva de Bigot, umidade residual, retração linear após secagem, densidade aparente, porosidade, permeabilidade, resistência mecânica à compressão a seco (RMCS).

Por fim, os corpos de prova foram submetidos à queima, sendo posteriormente realizada a caracterização pós-queima, com a determinação da absorção de água, retração linear após queima, resistência mecânica à compressão queimada (RMCQ) e determinação da cor de queima.

5.1 MATERIAS-PRIMAS (OE-1)

O estudo conduziu-se com três tipos de argilas designadas como Argila Verde (AV), Argila Zulma (AZ) e Argila Taguá Moído (TM). As argilas *in natura*, sem especificação técnica, foram cedidas gentilmente pela Cooperativa de extração mineral também conhecida pelas siglas COOPEMI, e detentora do direito minerário da região determinada para o referido estudo, na região de Morro da Fumaça, município brasileiro localizado no sul de Santa Catarina.

A escolha das matérias-primas visou o aproveitamento de argilas licenciadas para extração, porém de baixo interesse pela cadeia produtiva local, trazendo como os principais pontos positivos as argilas mencionadas, que possuem localização estratégica próxima a inúmeras empresas cerâmicas com volumes de produção consideráveis (superior a 4.000 toneladas/mês). Destaca-se, também, a relevância dessas argilas, que uma vez viabilizadas, poderão ser utilizadas como novas formulações ou integrar partes de composições, ampliando a vida útil das jazidas mencionadas, contribuindo com o uso eficiente de matérias-primas de fonte não renovável. Diante desse contexto, os pesquisadores optaram por examinar o comportamento dessas matérias-primas no processo de secagem rápida a fim de

trazer soluções em equipamentos que contribuam com o desenvolvimento tecnológico da região sul de Santa Catarina.

5.1.1 Beneficiamento

Foram coletados cerca de 100 kg de cada matéria-prima em cinco pontos diferentes de cada jazida correspondente. Por meio de processo de quarteamento conforme estabelecido pela norma ABNT NBR NM 27 (2001), as amostras foram homogeneizadas em um homogeneizador Natreb (HNTB 100) e reduzidas a 50 kg de cada tipo para ensaios laboratoriais e desenvolvimento do trabalho. O material sobressaliente de cada matéria-prima foi devidamente armazenado em saco plástico hermeticamente fechado, protegido da luz solar.

A preparação das argilas para os ensaios subsequentes iniciou-se pelo processo de secagem em uma estufa laboratorial (DeLeo) a 40 ± 5 °C até obter massa constante. Após a desidratação, a argila TM foi moída em um moinho de martelos (Servitech CT-058) com abertura de peneira de 8 mm (abertura mínima utilizada em moinho industrial), enquanto as argilas AV e AZ foram apenas desagregadas com moinhos de rolos de laboratório (Laminador Bertan, LB140).

5.1.1.1 Demarcação das argilas

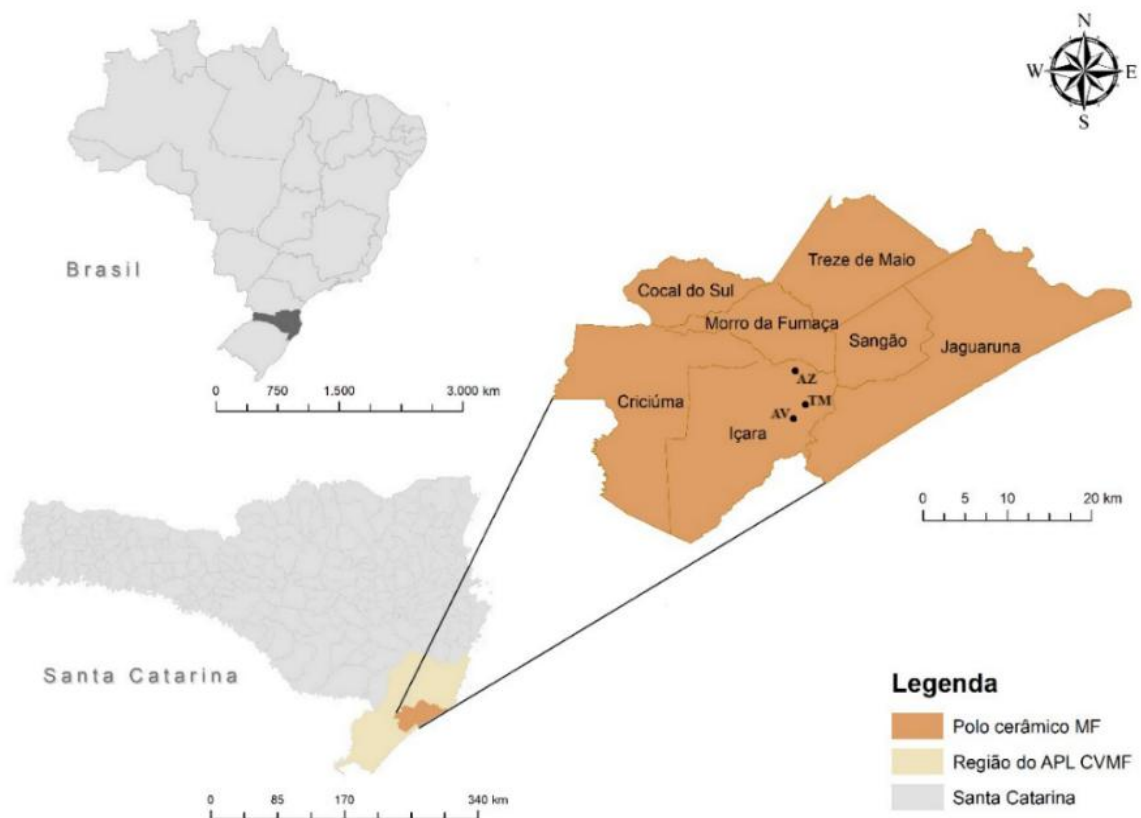
As áreas de onde foram obtidas as amostras de matérias-primas para este estudo apresentam demarcações específicas e já contam com frentes de lavra previamente iniciadas, indicando um histórico de exploração mineral voltado, sobretudo, para o setor de cerâmica vermelha.

A partir desse cenário, observou a necessidade de uma investigação mais aprofundada das propriedades físico-químicas, mineralógicas e tecnológicas dessas argilas. Tais características são determinantes para o desempenho cerâmico, influenciando diretamente a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e a durabilidade das peças após o processo de sinterização. Além disso, a variabilidade composicional das argilas dessas jazidas sugere um potencial ainda inexplorado para formulações mediante a combinação estratégica de diferentes tipos de solo. Com o intuito de apresentar geograficamente as regiões de amostragem, a Figura 15

exibe a localização das jazidas analisadas, permitindo uma melhor compreensão da origem da extração dos materiais estudados e sua contextualização no espaço regional.

É possível observar que a cidade de Içara abriga três jazidas distintas identificadas como "AZ, TM e AV". Essas áreas estão localizadas dentro do polo cerâmico de Morro da Fumaça que no mapa situa-se como a cidade central que possui a maior concentração de cerâmicas, podendo mencionar também nesse contexto as cidades de Içara e Sangão. Essas cidades destacam-se como um ponto central diante do contexto regional que abrange toda a região sul do estado de Santa Catarina.

Figura 15: Mapa regional com ordem de grandeza a nível nacional e estadual, incluindo as áreas de estudo: Ponto AZ: Argila Zulma; Ponto TM: Taguá Moído; Ponto AV: Argila Verde

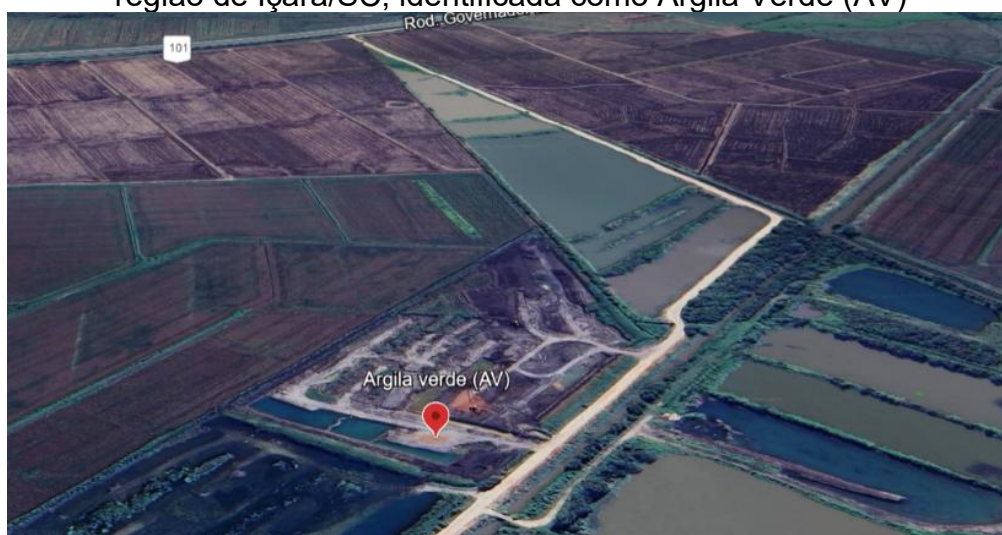


Fonte: autor (2024).

5.1.1.1.1 Argila Verde (AV)

A argila verde apresenta características visuais de plasticidade e mobilidade usuais nas práticas de produção de cerâmica vermelha para a fabricação de tijolos. Sua plasticidade elevada facilita o processo de conformação por extrusão, garantindo boa coesão e resistência mecânica no estado fresco. Apresenta coloração cinza com pigmentação amarela, geralmente associada à presença de óxidos de ferro hidratados e matéria orgânica. Trata-se de um material naturalmente fino, com baixa quantidade de partículas grosseiras, o que elimina a necessidade de moagem prévia para sua utilização. Sua localização é no município de Içara/SC próximo a BR 101 acesso norte Figura 16. Suas coordenadas geográficas são 28°43'27"S 49°12'58"W.

Figura 16: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Verde (AV)



Fonte: Autor (2024).

5.1.1.1.2 Argila Zulma (AZ)

A argila Zulma apresenta características visuais com menor teor de plasticidade em relação a argila verde, é possível notar a presença de areia e mobilidade usuais nas práticas de produção de cerâmica vermelha para produção de tijolos, possui coloração vermelha com pigmentação amarela e não necessita de moagem prévia para sua utilização.

Sua localização é no município de Içara/SC acesso principal Rodovia Pasqualin Cechinel Figura 17. Suas coordenadas geográficas são 28°41'06"S 49°12'48"W.

Figura 17: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Zulma (AZ)



Fonte: Autor (2024).

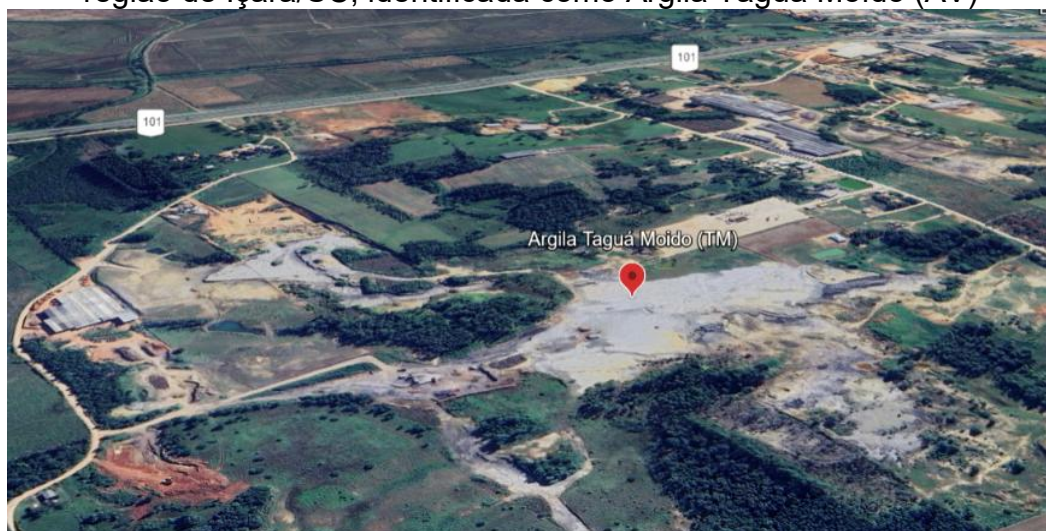
5.1.1.1.3 Argila Taguá Moído (TM)

A argila taguá moído apresenta aspectos visuais diferentes das demais argilas aplicadas nesse estudo. Sua característica principal é a semelhança com argilitos devido sua forma in natura ser mais rígida, mas em presença com água se dissolve ocorrendo desagregação das partículas possui mobilidade usuais nas práticas de produção de cerâmica vermelha para produção de tijolos, apresenta uma única coloração cinza.

Está localizado no município de Içara/SC acesso principal Rodovia Antônio Fortunato Ronsani nas proximidades da BR 101 acesso norte Figura 18. Suas coordenadas geográficas são 28°42'45"S 49°11'47"W. A argila TM antes de ser utilizada nos processos produtivos, passa por um processo de moagem prévia em moinho de martelo. Esse processo é especialmente importante para a argila Taguá devido à sua rigidez característica em estado in natura. Sem a etapa de moagem, a argila teria dificuldade em se desagregar e dissolver na presença de água, prejudicando sua eficiência. A moagem, portanto, garante que o material atenda aos

padrões granulométricos necessários, otimizando sua performance no processo produtivo.

Figura 18: Fotografia vista aérea da localização do ponto de coleta de argilas na região de Içara/SC, identificada como Argila Taguá Moído (AV)



Fonte: Autor (2024).

5.1.2 Análise física

Neste capítulo, são descritos os procedimentos empregados na caracterização física das matérias-primas e corpos de prova desenvolvidos, considerando as técnicas, os parâmetros operacionais, os equipamentos utilizados e as normas técnicas adotadas. As metodologias aplicadas têm como objetivo assegurar a padronização das etapas experimentais, os quais servirão de base para as análises quantitativas e qualitativas apresentadas nos capítulos subsequentes.

5.1.2.1 Determinação da umidade

O ensaio de determinação do teor de umidade foi realizado a partir da coleta de uma amostra do material bruto, logo após a etapa de extração. Inicialmente, uma porção do material foi pesada em balança digital de precisão (Marte, modelo AC 10K, precisão de 0,1 g), obtendo-se a massa úmida. Em seguida, a amostra foi submetida à secagem em estufa (DeLeo, modelo nº 8) a 100 ± 5 °C, até atingir massa constante. Após a secagem, a amostra foi novamente pesada para

determinação da massa seca. O teor de umidade (U) foi calculado em termos percentuais, com base na relação entre a massa de água removida e a massa seca do material, conforme expressa na Equação 1. O procedimento foi realizado em triplicata, permitindo o cálculo da média e do desvio padrão, a fim de garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos dados experimentais. Todos os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais Cerâmicos do i.Parque/UNESC, localizado em Criciúma/SC.

A determinação de umidade precisa do teor de umidade em materiais é fundamental em diversas aplicações, especialmente na produção de cerâmicas, onde a quantidade de água presente pode impactar diretamente as propriedades do produto.

$$U = \frac{(m_u - m_s)}{m_u} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

U = Umidade in natura (%);

m_u = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g).

5.1.2.2 Plasticidade

A investigação da plasticidade das massas argilosas e minerais subutilizados foi conduzida com base nos limites de Atterberg, definidos originalmente por Atterberg (1911), que descrevem as transições de comportamento do solo com a variação do teor de umidade. Esses limites são: limite líquido (LL), teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido; limite plástico (LP), umidade na qual o solo passa do estado semissólido para o estado plástico; e limite de contração (LC), que representa a transição entre o estado sólido e o estado semissólido. Na prática cerâmica, os limites LL e LP são os mais utilizados, por serem mais representativos do comportamento plástico da argila.

A determinação do limite líquido (LL) foi realizada com base na NBR 6459 (ABNT, 2016a), utilizando o aparelho de Casagrande. As amostras foram submetidas a golpes padronizados, registrando-se o teor de umidade correspondente ao fechamento da ranhura padrão em 12 mm, com 25 golpes. O limite plástico (LP) foi obtido conforme descrito na NBR 7180 (ABNT, 2016b), moldando-se manualmente fios de argila com 3 mm de diâmetro; o rompimento espontâneo indicava a umidade crítica. O índice de plasticidade (IP) foi então calculado com base na Equação 2, como sendo a diferença entre o LL e o LP:

$$IP = LL - LP$$

[2]

Onde:

IP = Índice de plasticidade (%);

LL = Limite de liquidez (%);

LP = Limite plástico (%).

Esse índice representa a faixa de umidade na qual o solo ou argila apresenta comportamento plástico, sendo um parâmetro essencial para prever o desempenho do material durante a conformação por extrusão e sua estabilidade dimensional durante a secagem e queima. Valores mais elevados de IP indicam maior plasticidade, o que pode facilitar o processo de moldagem, mas também aumentar o risco de retrações e fissuras. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de caracterização de materiais do SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, unidade de Criciúma/SC.

5.1.2.3 Distribuição de tamanhos de partículas por sedimentação

A distribuição do tamanho de partículas (DTP) das matérias-primas cerâmicas foi determinada por meio do método de sedimentação por gravidade assistida por Raios X, utilizando o equipamento SediGraph III Plus V1.00 (Micromeritics). O princípio de funcionamento baseia-se na lei de Stokes (Stokes, 1844), que descreve

a velocidade de sedimentação de partículas esféricas em um fluido viscoso sob a ação da gravidade, e na lei de Beer-Lambert (Beer, 1852), que correlaciona a absorção de radiação eletromagnética à concentração de partículas em suspensão. Inicialmente, o material foi submetido a peneiramento em malha #230 (63 µm) com o objetivo de remover as frações mais grosseiras, garantindo maior precisão na análise das partículas finas, que são as predominantes no comportamento reológico das massas cerâmicas. Em seguida, as amostras peneiradas foram dispersas em meio líquido adequado, com adição de agentes dispersantes, quando necessário, a fim de evitar a floculação das partículas. Durante a análise, a atenuação dos Raios X transmitidos através da suspensão foi continuamente monitorada ao longo do tempo, permitindo o cálculo do diâmetro equivalente das partículas com base na taxa de sedimentação observada. O presente ensaio foi conduzido no Centro de Serviços em Materiais Cerâmicos (CRC).

5.1.2.4 Resíduo bruto e determinação da granulometria por peneiramento

Para realizar o ensaio, uma amostra de argila foi completamente seca em estufa (DeLeo) a 100 ± 5 °C. Após a secagem, foi pesada em balança de precisão (Marte, AC 10K, 0,1 g) e misturada com água, permanecendo em repouso por 24 h para facilitar a dispersão das partículas. Em seguida, o material foi peneirado em malha #325 mesh (44 µm). A fração retida na peneira foi desidratada e utilizada para calcular o teor de resíduo bruto na argila por meio da Equação 3. O ensaio foi repetido três vezes para obtenção da média e do desvio padrão, e foi realizado no laboratório de Materiais Cerâmicos do i.Parque/UNESC em Criciúma/SC.

$$Rb = \frac{m_r}{m_{am}} \times 100$$

[3]

Onde:

Rb = Resíduo bruto (%);

m_r = massa retida na peneira (g);

m_{am} = massa da amostra inicial (g).

Após a obtenção do teor de resíduo bruto na argila, a amostra foi submetida a peneiramento em agitador eletromagnético (BerTel) por 5 minutos, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas de malhas 100 mesh (149 μm), 140 mesh (105 μm), 200 mesh (74 μm) e 325 mesh (44 μm), para determinar a distribuição do tamanho das partículas. O ensaio foi repetido três vezes para cálculo da média e do desvio padrão, sendo realizado no laboratório de Materiais Cerâmicos do i.Parque/UNESC, em Criciúma/SC.

5.1.3 Análise química (FRX) e mineralógica (DRX)

Para a caracterização, as amostras foram inicialmente desagregadas em almofariz de porcelana até atingirem a malha 200 mesh (74 μm). Em seguida, uma parte do material foi submetida à análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X (Epsilon 3XLE Panalytical). A perda ao fogo (PF) das amostras foi determinada após calcinação a 1000 °C por 3 h. A análise de fases mineralógicas foi realizada por difração de Raios X (D-5000), com radiação $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), 40 kV e 40 mA, faixa de varredura de 4–72° 2 θ e a velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são de 4 s para 0,02°. A quantificação semiquantitativa de fases foi realizada pelo método de análise racional. Esse ensaio foi realizado no laboratório da Safira em Tijucas, Santa Catarina.

5.1.4 Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (TG)

Para a realização das análises térmicas, as amostras foram inicialmente submetidas à moagem, a fim de reduzi-las à forma pulverizada. Posteriormente as amostras foram avaliadas em um equipamento de análises térmicas simultâneas Netzsch 409 EP (análise termo-gravimétrica e termo-diferencial), com taxa de aquecimento de 10 °C/min da temperatura ambiente a 1100 °C. O equipamento possui um sistema de controle operado através de software específico, que registra

as variações de temperatura e de massa ao longo do tempo de ensaio, da qual originam as curvas de ATD e TG.

A conjugação destas duas análises térmicas (ATD e TG) permitem obter informação sobre as diferenças de temperatura e de peso, entre uma amostra e um material de referência inerte, enquanto ambos são aquecidos ou arrefecidos a uma taxa controlada. Ao plotar as diferenças de temperatura e de peso contra a temperatura de aquecimento, obtém-se duas curvas (termogramas diferencial e gravimétrico) que assinalam todos os eventos térmicos com transições de fase, fusão, cristalização ou decomposição, indicando se as reações são endotérmicas ou exotérmicas (ATD) e quantificando as alterações de peso (TG) como no caso das reações de desidratação e oxidação, o que permite avaliar as propriedades térmicas de uma determinada substância.

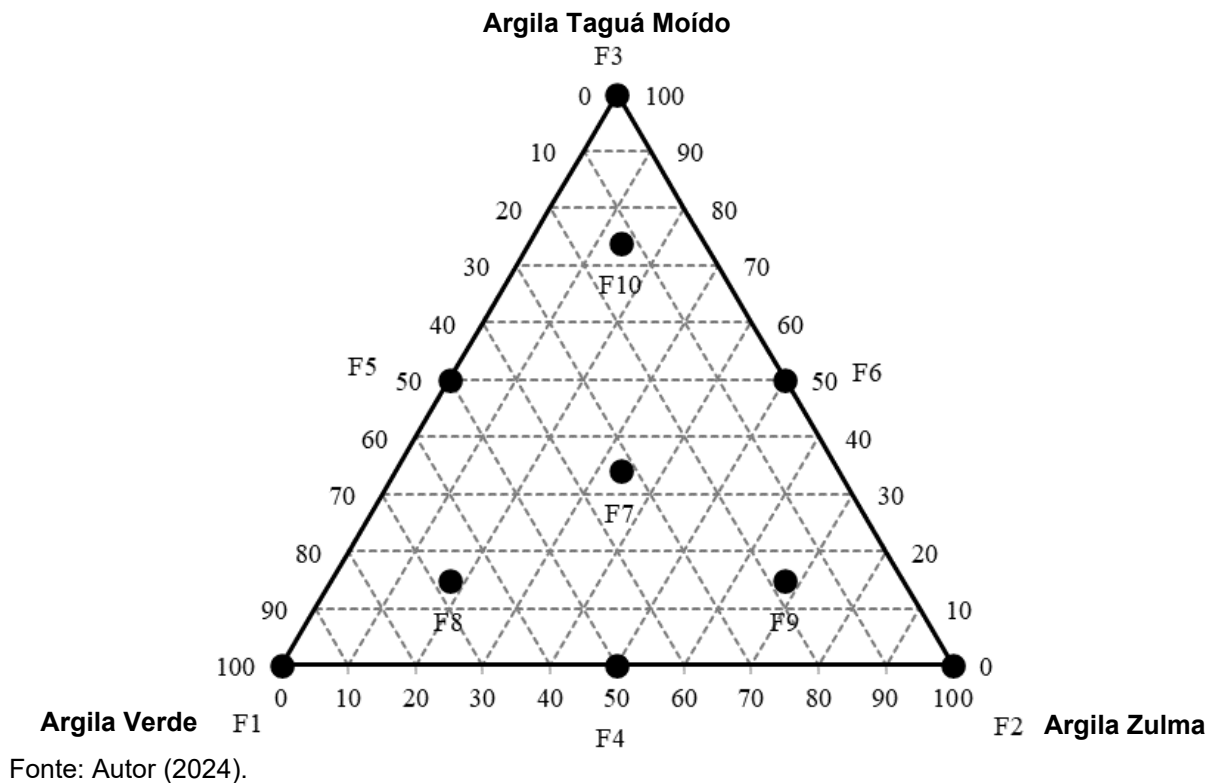
O ensaio foi realizado no Laboratório da Unidade de Investigação e Desenvolvimento de Materiais, UIDM, do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal.

5.2 DETERMINAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (OE 2)

Nesta etapa do trabalho as argilas foram utilizadas no desenvolvimento de composições por meio do método de delineamento de misturas (simplex centroide). Esse método envolve a exploração de diversas formulações com distintas proporções das argilas (% em massa) que possibilitou o desenvolvimento de um diagrama e sua investigação completa Figura 19.

A estatística desempenha um papel fundamental na coleta, apresentação, análise e utilização de dados para a tomada de decisões, resolução de problemas e planejamento de produtos e processos. Dentro do panorama das variadas técnicas de análise e planejamento experimental, o delineamento de misturas se destaca entre as melhores opções. Isso se deve ao fato de que uma gama de materiais é constituída pela combinação de diversos componentes, e as propriedades do produto manufaturado estão relacionadas às proporções dos componentes presentes na formulação (Bello; Vieira, 2011).

Figura 19: Diagrama triaxial das composições desenvolvidas (% em massa)



Foram estabelecidas 10 misturas Tabela 2, partindo das argilas puras (100 %), conforme os vértices do diagrama, incorporando interações bidirecionais (lados) e tridirecionais (centroides) para a otimização do projeto. O delineamento de misturas possibilitou a seleção de um modelo matemático eficiente para a previsão das propriedades de cada componente original, assim como das composições em proporções específicas.

No total, cerca de 15 kg foram preparados para cada formulação, neste objetivo a preparação das formulações, conformação dos corpos de prova e caracterizações tecnológicas foram conduzidas no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha (LABCER), em Morro da Fumaça.

Após a avaliação dos melhores resultados conforme os critérios estabelecidos nos objetivos anteriores, as composições foram submetidas à umidificação de acordo com o equilíbrio de umidade ideal para cada formulação. Nesse contexto, abordou trabalhar próximos ao Limite Plástico (LP), com o objetivo de minimizar a quantidade de água utilizada. Na continuidade, as composições foram laminadas (Laminador Bertan, LB140) e acondicionadas em sacos plásticos, permanecendo em repouso por 24 h para otimização da homogeneização da umidade.

Tabela 2: Composições de massas de cerâmica vermelha utilizando a ferramenta de planejamento de misturas para as matérias-primas utilizadas no trabalho.
FormulaçõesMatérias-primas (% em massa)

Formulações	Matérias-primas (% em massa)		
	Argila Verde (AV)	Argila Zulma (AZ)	Taguá Moído (TM)
F1	100	0	0
F2	0	100	0
F3	0	0	100
F4	50	50	0
F5	50	0	50
F6	0	50	50
F7	33,4	33,3	33,3
F8	66,6	16,7	16,7
F9	16,7	66,6	16,7
F10	16,7	16,7	66,6

Fonte: Autor (2024).

5.2.1 Caracterização dos corpos de provas

Após todas as dez (10) formulações serem devidamente mantidas em repouso por 24 h, foram submetidas as confecções dos corpos de prova pelo processo de extrusão para os objetivos subsequentes de secagem e queima.

5.2.1.1 Extrusão

A conformação das argilas realizou-se por meio do processo de extrusão (extrusora a vácuo Natreb, modelo NTB 140), com um valor de vácuo de aproximadamente 700 mmHg (separou-se as amostras apenas quando esse valor de vácuo foi atingido). Foi adotado para este trabalho a velocidade de 13 rpm para a conformação dos corpos de prova. Esse método de conformação é amplamente empregado na indústria cerâmica para produzir peças com formas específicas e dimensões padronizadas.

No caso específico, os corpos de prova foram conformados em formato de blocos tradicionais de vedação, com dimensões de 35 mm x 40 mm x 55 mm. Os corpos de prova foram pesados e identificados, em seguida colocados em sacos plásticos e fechados sem contato com o ar e armazenados em caixas

hermeticamente fechadas; isso é essencial para assegurar que as peças apresentem condições uniformes de umidade nos ensaios posteriores.

5.2.2 Estudo das composições

As composições foram submetidas a diferentes etapas de caracterização, com a finalidade de compreender seu comportamento ao longo do processamento cerâmico. Entre os parâmetros fundamentais avaliados nos itens anteriores, destacam-se o índice de plasticidade (IP), descrito no item 2.1.2.2, e a análise granulométrica por peneiramento, apresentada no item 2.1.2.4. Esses ensaios foram repetidos para as formulações sem tratamento térmico, uma vez que fornecem dados essenciais para a interpretação de propriedades críticas das massas cerâmicas.

O índice de plasticidade fornece informações sobre a trabalhabilidade e a capacidade de conformação da argila, aspectos diretamente relacionados à estabilidade dimensional das peças durante a secagem e queima. Já a análise granulométrica é determinante para avaliar o grau de empacotamento das partículas, influenciando diretamente propriedades como retração linear, permeabilidade e resistência mecânica. Tais características serão analisadas nas etapas subsequentes do estudo, sendo indispensáveis para a correlação entre a composição da massa e seu desempenho.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CPS SECOS (OE 3)

Após a conformação e secagem em ciclos rápidos de secagem das formulações cerâmicas, os corpos de prova foram submetidos a uma série de ensaios com o objetivo de avaliar suas propriedades no estado seco para a compreensão de aspectos como estabilidade dimensional, resistência mecânica inicial. A avaliação desses parâmetros é essencial para prever eventuais defeitos que possam surgir durante o processamento, como trincas ou deformações, bem como para a otimização das condições de secagem.

5.3.1 Secagem artificial de característica rápida

Nesta etapa do trabalho foram efetuadas 20 secagens de ciclo rápido, correspondendo à quantidade de uma (01) peça de cada formulação por secagem, totalizando 20 corpos de prova por amostragem. O ciclo rápido corresponde a 60 min operando com temperatura inicial de 50 °C com rampa de aquecimento de 2 °C/min, até atingir temperatura máxima de 170 °C. em um secador rápido de laboratório, modelo Natreb STL (experimento de secagem) conforme ilustrado na Figura 20.

O princípio de funcionamento do equipamento de secagem laboratorial consiste em uma secagem com os corpos de prova estáticos e a variação do gradiente de temperatura e umidade relativa necessários na secagem simulam o movimento contracorrente por convecção. Este é constituído por um túnel retangular que integra um sistema de vaporização de água Figura 20 (b) e uma fonte geradora de calor, utilizando gás butano (C_4H_{10}) como combustível Figura 20 (c).

Figura 20: Fotografia secador rápido de laboratório Natreb, modelo STL (experimento de secagem): a) câmara de secagem; b) tanque de vapor; c) fonte geradora de calor



Fonte: Nandi (2022).

O secador possui um exaustor de insuflamento de pequeno porte Figura 20 (a), acionado por um motor de 1,5 cv, controlado por um inversor de frequência operando em sua potência máxima, proporcionando uma velocidade constante de 1,8 m/s no interior do secador. Na parte traseira do equipamento, encontram-se dois

exaustores menores responsáveis pela remoção do ar úmido, cada um equipado com um motor de 0,5 cv. Para cada ensaio, foram utilizados 10 corpos de prova, sendo 1 de cada formulação, dispostos aleatoriamente para evitar qualquer tipo de tendenciosidade. O equipamento possui um termopar fixo e devidamente calibrado (Estática – certificado 354252 – data 15/08/23 – MVF 001), utilizado para identificar a temperatura, registrada a cada 15 min e controlada de acordo com o critério estabelecido por Nandi (2022).

Durante o experimento, a umidade relativa do ar foi monitorada a intervalos regulares de 15 min, utilizando um higrômetro digital da marca AKSO, modelo AK625, posicionado na saída dos gases do secador. No mesmo intervalo de tempo, foram realizadas medições sistemáticas de massa e dimensões de cada corpo de prova, a fim de acompanhar as variações ao longo do processo. O procedimento experimental foi repetido em vinte réplicas independentes, totalizando 200 corpos de prova ao final da etapa. Após a coleta dos dados iniciais, todas as amostras foram destinadas às análises complementares subsequentes.

5.3.2 Curva de Bigot

A curva de Bigot nesta etapa da pesquisa foi conduzido com o propósito de avaliar a perda de massa em comparação com a retração durante o processo de secagem de ciclo rápido. O ensaio foi conduzido durante o teste de secagem de ciclo rápido, com medições de massa (g) e comprimento (mm) a cada 15 min. Cada peça foi medida em aproximadamente 15 s, totalizando 150 s para as 10 peças, o que equivale a 2,5 min. Dessa forma, a primeira peça era medida a cada 15 min e a última a cada 17,5 min.

As leituras sempre seguiram a ordem da direita para a esquerda, garantindo a sequência correta. Para evitar perdas na eficiência da secagem, a porta de acesso era aberta apenas para a retirada e recolocação imediata da peça, repetindo-se esse processo para todas as medições em todas as réplicas. Essas medições foram realizadas ao longo de um ciclo de 60 min, resultando em quatro medições por réplica.

5.3.3 Perda de água (U)

A determinação da perda de água foi executada mediante a medição da massa (g) (balança Marte, modelo AC 10K, com precisão de 0,1 g) dos corpos de prova em intervalos regulares. Esse procedimento resultou na quantificação da perda de massa em relação ao tempo de secagem e desempenha um papel crucial na elaboração do gráfico representativo da curva de Bigot. O ensaio estabelecerá a relação entre a massa inicial e as leituras obtidas durante o procedimento, com a avaliação de um (01) corpo de prova de cada formulação em cada teste. Considerando a realização de 20 réplicas, o total será de 20 corpos de prova para cada formulação e, conseqüentemente, 200 corpos de prova.

Posteriormente, as peças foram mantidas a um período de secagem em estufa por 24 h a 110 ± 5 °C para a completa remoção da água, seguido por uma nova pesagem (balança Marte, modelo AC 10K, com precisão de 0,1 g). O objetivo foi calcular a umidade residual, com a aplicação dos resultados conforme apresentado na Equação 4.

$$U = \frac{(m_i - m_n)}{m_i} \times 100 \quad [4]$$

Onde:

U = Umidade (%);

m_i = massa inicial (g);

m_n = massa durante processo de secagem (g).

5.3.4 Retração Térmica linear de secagem (RTLS)

Durante o processo de secagem, ocorre a evaporação da água dos capilares da peça, resultando em uma retração do produto devido à desidratação dos argilominerais presentes, o que provoca alterações em suas dimensões. Este próximo ensaio implica a realização de medições na peça verde (após o processo de

extrusão) por meio de um paquímetro Manual UNIVERSAL, com precisão de 0,02 mm. Foram analisados um (01) corpo de prova para cada formulação em cada ensaio, totalizando 20 réplicas e, conseqüentemente, 20 corpos de prova para cada formulação e um total de 200 corpos de prova. Posteriormente, as peças foram mantidas a um período de secagem em estufa por 24 h a 110 ± 5 °C, seguido por novas medições utilizando o paquímetro Manual UNIVERSAL, com precisão de 0,02 mm. A retração de secagem foi calculada por meio da aplicação da Equação 5.

$$RTL_S = \frac{(L_i - L_f)}{L_i} \times 100$$

[5]

Onde:

RTL_S = Retração térmica linear de secagem (%);

L_i = comprimento das peças cruas recém extrudadas (mm);

L_f = comprimento das peças cruas pós-secagem (mm).

5.3.5 Densidade aparente

Durante o processo de fabricação cerâmica, diversos fatores exercem influência na densidade do produto. Entre esses fatores, destacam-se as características das matérias-primas utilizadas, o método de conformação empregado e a quantidade de água adicionada ao processo. A avaliação da densidade das peças cruas desempenha um papel crucial na análise do grau de compactação das argilas presentes nas formulações, conforme destacado por Maia (2018).

O ensaio de densidade baseia-se no princípio de Arquimedes, o qual descreve o volume de um líquido deslocado quando um corpo é imerso total ou parcialmente. Esse volume deslocado corresponde ao próprio volume do corpo, e as forças que atuam sobre o corpo imerso são conhecidas como empuxo. Para realizar o ensaio, foram utilizados quatro (04) corpos de provas, as amostras foram limpas e secas para garantir que não houvesse interferência de resíduos superficiais ou umidade na determinação da massa. Foi utilizado o álcool isopropílico (isopropanol 99,8 % de

pureza), devido ao corpo cerâmico não solubilizar e comprometer a integridade das amostras. Para a determinação da densidade, a massa das amostras foi medida em três etapas. Primeiramente, cada amostra foi pesada em uma balança analítica com precisão de 0,01 g no seu estado seco. Em seguida, a mesma amostra foi totalmente imersa em álcool isopropílico, e mantido por 24 h garantindo a ausência de bolhas de ar aderidas à superfície, e sua massa aparente no líquido. E por último foi obtido os valores massivos do empuxo, correspondente à diferença entre as massas no ambiente e no líquido, desta forma foi possível determinar o volume da amostra deslocado no líquido, com base na densidade do álcool. A densidade aparente das amostras foi então calculada utilizando a Equação 6. Esse procedimento expressa o resultado em g/cm³, pois a diferença entre a massa seca e a massa imersa (empuxo) representa a quantidade de líquido deslocado, a qual, quando relacionada à densidade do líquido, fornece o volume da amostra em cm³. Assim, ao dividir a massa da amostra em gramas pelo volume obtido em centímetros cúbicos, obtém-se diretamente a densidade aparente expressa em g/cm³, unidade usual na caracterização de materiais cerâmicos.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{(m_s - m_i)} \quad [6]$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

m = massa inicial (g);

$m_s - m_i = V$ = correspondente à diferença entre a massa seca (m_s) e a massa imersa; (m_i) no líquido, compatível com o volume do corpo em imersão (cm³).

5.3.6 Porosidade aparente

A determinação das porosidades fora conduzida também conforme o fundamento do princípio de Arquimedes. Inicialmente, as amostras secas foram devidamente pesadas para obtenção da massa seca e imersas em álcool

isopropílico (isopropanol 99,8 % de pureza) para poder determinar a massa imersa sem que ocorra qualquer variação dos corpos de prova. Para os valores de massa saturada será considerado o peso da peça pesada após saturação em álcool. Por fim com esses dados em mãos, foi possível calcular o valor do volume aparente e o volume dos poros, conforme as Equações 7 e 8.

$$V_{aparente} = \frac{m_u - m_i}{\rho_{C_3H_8O}} \quad [7]$$

$$V_{poros\ aberto} = \frac{m_u - m_s}{\rho_{C_3H_8O}} \quad [8]$$

Onde:

$V_{aparente}$ = volume aparente da amostra (cm³), inclui os volumes do sólido, dos poros abertos e dos poros fechados;

$V_{poros\ abertos}$ = volume de poros abertos (cm³);

m_u = massa da amostra saturada (g);

m_i = massa da amostra imersa (g);

m_s = massa da amostra seca (g);

C_3H_8O = densidade do álcool isopropílico (g/cm³).

Para definir o volume de poros fechados e o volume total de poros é necessário calcular o volume da fração de sólidos (livre de poros) conforme Equação 9:

$$V_{sólido} = \frac{m_u}{\rho_{(amostra)}} \quad [9]$$

Onde:

$V_{sólido}$ = volume da fração de sólidos (livre de poros);

m_u = massa da amostra saturada (g);

ρ (*amostra*) = densidade do álcool isopropílico (g/cm³).

Desta forma pode-se calcular o volume total de poros abertos ($V_{\text{poros totais}}$) e o volume de poros fechados (V_{fechado}) representadas nas Equações 10 e 11.

$$V_{\text{poros totais}} = V_{\text{aparente}} - V_{\text{sólido}} \quad [10]$$

$$V_{\text{poros fechados}} = V_{\text{poros totais}} - V_{\text{poros abertos}} \quad [11]$$

Onde conhecendo o valor de cada um dos volumes a quantidade relativa deles é dada pela razão entre cada volume e o volume aparente (V_{aparente}).

5.3.7 Permeabilidade

A avaliação da permeabilidade dos corpos cerâmicos extrudados a vácuo no estado seco, foram conduzidas, utilizando-se um sistema de ensaio composto por um permeâmetro desenvolvido pelo curso de Engenharia Química, Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP) / SP. Os ensaios de permeabilidade ao ar das amostras cerâmicas serão realizados pelo método de escoamento em regime estacionário, no qual aproximadamente 10 conjuntos de valores de pressão do ar na entrada da amostra (P_e), pressão absoluta do ar na saída da amostra (P_s) e de velocidade superficial do ar (v_s) são coletados. A equação de Forchheimer para fluidos compressíveis é utilizada para ajuste das constantes de permeabilidade (k_1 e k_2) pelo método dos mínimos quadrados:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad [12]$$

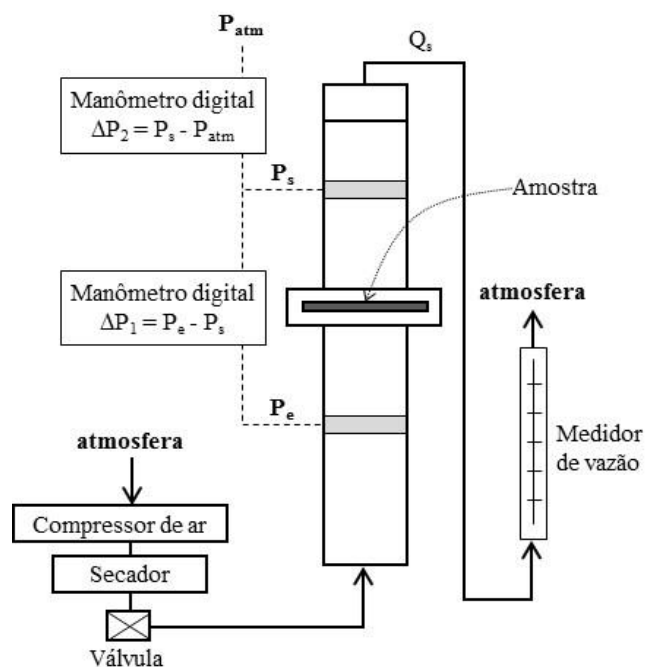
ΔP é obtido por:

$$\Delta P = \frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_s} \quad [13]$$

O equipamento usado nos ensaios é esquematizado na Figura 21. Inicialmente, para evitar vazamentos laterais durante o ensaio de permeação, cada amostra tem sua borda lateral vedada com adesivo. Para o ensaio, a amostra é fixada entre dois anéis de borracha flexível e comprimida no interior de um porta-amostras cilíndrico.

As condições típicas dos ensaios de permeabilidade são descritas a seguir utilizando ar seco como fluido, em condições de temperatura entre 21 e 25 °C e pressão atmosférica de 712 mmHg. A densidade do ar considerada foi de aproximadamente 1,1 kg/m³ e sua viscosidade dinâmica em torno de 1,84 × 10⁻⁵ Pa·s. A pressão aplicada variou de 0 a 3 bar. O escoamento ocorreu através de um diâmetro útil de 2,75 cm, correspondente a uma área útil de 5,94 cm². Para cada ensaio, foram coletados 8 pontos de medição.

Figura 21: Esquema do permeâmetro utilizado nos ensaios



Fonte: Das D. *et al.* (2019).

O diâmetro útil de escoamento no ensaio é de 2,75 cm, correspondente a uma área de escoamento de 5,94 cm². Após a vedação, ar proveniente de um compressor e previamente seco em um cilindro de sílica-gel é forçado a passar através da amostra. A vazão volumétrica resultante é controlada por válvula e medida em um bolhômetro após a passagem pela amostra. A queda de pressão do ar é medida por transmissor de pressão com tomadas antes e depois da amostra. Para cada vazão fixada, há a leitura da queda de pressão resultante. São coletados vários pares de dados de vazão e pressão. A vazão (Q) é convertida para velocidade superficial do ar (v_s) por divisão pela área de escoamento (A) ($v_s = Q/A$). Os dados de vazão e queda de pressão são tratados segundo a equação de Forchheimer Equação 12 para fluidos compressíveis. Através do ajuste da Equação 13 são obtidos os valores das constantes de permeabilidade k_1 e k_2 , que são propriedades do meio poroso e não dependem do tipo de fluido ou da velocidade de escoamento.

5.3.8 Resistência mecânica à compressão a seco (RMCS)

O ensaio de resistência mecânica à compressão a seco foi realizado com o objetivo de investigar o comportamento mecânico das formulações em relação ao processo de secagem com ciclo rápido. O método de teste implica a aplicação de força de compressão por meio de uma máquina universal de ensaios. A comparação dos resultados obtidos entre diferentes amostras oferece informações importantes sobre a influência da composição da argila na resistência a seco das peças cerâmicas, contribuindo para a otimização do processo de formulação e produção. O ensaio foi realizado em peças já secas que não apresentavam defeitos visíveis. Para cada formulação, foram testados cinco corpos de prova, utilizando uma prensa hidráulica universal Pavitest, modelo I3001C, com capacidade máxima de 100 toneladas e taxa de aplicação de força de 50 N/s. Os resultados obtidos foram comparados entre si. O teste foi conduzido no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha (LABCER).

Com o objetivo de garantir maior qualidade e eficiência no processo produtivo, também foi realizada uma análise visual das peças de cada formulação após a secagem rápida.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CPS QUEIMADOS (OE 4)

As características tecnológicas das formulações foram avaliadas com o propósito de determinar a adequação das formulações investigadas e das condições testadas para futuras aplicações industriais. Para a condução dos testes, as peças (constituídas por dez (10) corpos de prova) que foram submetidas ao processo de secagem no secador de ciclo rápido foram posteriormente, sinterizadas em um forno mufla (JUNG, J200) a 900 °C. O aquecimento ocorreu a uma taxa de 1,5 °C/min, com um patamar de queima de 120 min. Com base nos estudos direcionados ao tema de secagem rápida, conforme abordado por Nandi (2022), os ensaios de perdas de massa, retração de queima, resistência mecânica à compressão, absorção de água serão considerados requisitos essenciais para o processo de cerâmica vermelha pós-queima.

5.4.1 Absorção de água (AA)

A absorção de água ocorre devido às forças capilares quando a amostra é imersa em água, levando à penetração nos poros e resultando em um aumento de massa, expresso em percentual. Conforme preconizado pela norma ABNT NBR 15270-3, (ABNT, 2017), o ensaio de absorção de água é fundamental e estabelece limites mínimos e máximos (entre 8 e 25 %) para garantir a conformidade do produto com as normas vigentes.

É importante destacar que elevados índices de absorção de água podem estar associados a alta porosidade e baixa densidade, resultando em possíveis problemas de resistência mecânica. Para peças de cerâmica vermelha, em particular, o desempenho é especialmente afetado pela umidade, amplificando a relevância do ensaio em questão.

O ensaio compreende a pesagem das amostras queimadas, seguida pela imersão em banho, podendo ser realizada de duas maneiras: (i) imersão em água fria por 24 h, ou (ii) imersão em água fervente por 2 h. Para esse estudo foi utilizado imersão em água fria por 24 h. Após o período de imersão, o excesso de umidade é removido com o auxílio de um pano seco. O teor de absorção de água foi calculado utilizando a Equação 13.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$
[14]

Onde:

AA = Absorção de água (%);

m_u = massa das peças pós-queima úmidas (g);

m_s = massa das peças pós-queima (g).

5.4.2 Retração Térmica linear de queima (RTLQ)

Da mesma forma que ocorre durante o processo de secagem, as peças cerâmicas têm propensão à retração durante a queima, devido à liberação de gases de decomposição e à densificação do material. Esses fenômenos podem ser esclarecidos por meio da análise térmica. O ensaio compreende a realização de medições na peça em seu estado seco, seguidas por uma nova medição após o processo de queima (utilizou-se dez (10) corpos de prova). Os resultados obtidos foram calculados conforme a Equação 14. A análise da retração durante a queima não apenas fornece informações sobre a estabilidade dimensional das peças cerâmicas, mas também é crucial para o controle de processos industriais, garantindo a conformidade com padrões de qualidade específicos e contribuindo para o desenvolvimento de produtos cerâmicos com propriedades desejadas.

$$RTL_Q = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} \times 100$$
[15]

Onde:

RTL_Q = Retração térmica linear de queima (%);

L_s = comprimento das peças cruas pós-secagem (mm);

L_q = comprimento das peças pós-queima (mm).

O ensaio de resistência mecânica à compressão das peças cerâmicas queimadas assume uma relevância crítica, uma vez que é requisitado por norma técnica ABNT NBR 15270-3 (2005), a qual determina que o produto deve apresentar uma resistência mínima de 1,5 MPa para elementos de vedação e 3 a 5 MPa para estruturais. Adicionalmente, é importante ressaltar que a resistência mecânica à compressão é um parâmetro crucial para avaliar a capacidade das peças cerâmicas em suportar cargas externas. A obtenção de resultados nesse ensaio é fundamental não apenas para garantir a conformidade com normas, mas também para assegurar a integridade estrutural e o desempenho adequado das peças em suas aplicações práticas. Para a realização deste ensaio utilizou cinco (05) corpos de prova e foi usada uma prensa hidráulica Universal da marca Pavitest modelo I3001C com capacidade máxima de 100 t a uma taxa de aplicação de força de 50 N/s e os resultados foram comparados entre si.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados, analisados e discutidos detalhadamente os resultados experimentais obtidos, com ênfase nos aspectos quantitativos e qualitativos que fundamentam as deduções e conclusões propostas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA MATÉRIAS PRIMAS (OE 1)

6.1.1 Determinação da umidade *in natura*

A umidade *in natura* reflete o teor de água presente na argila bruta após o processo de extrusão. A Tabela 3 apresenta os valores de umidade em base úmida determinados nas amostras estudadas.

Tabela 3: Teor de umidade *in natura* das matérias-primas utilizadas no estudo (% em massa)

Matéria-prima	Umidade <i>in natura</i> (% em massa)
AV	31,02 ± 0,43
AZ	22,94 ± 0,51
TM	10,21 ± 0,82

Fonte: Autor (2024).

Verifica-se que a argila AV apresenta o maior teor de umidade em seu estado natural. Esse comportamento é atribuído à sua origem em uma superfície com vegetação e à constante exposição à água. Em contrapartida, as argilas AZ e TM, apesar de serem provenientes de cavas que frequentemente sofrem alagamentos, apresentam menor teor de umidade.

Contudo, o teor de umidade mais elevado entre essas últimas é observado na argila AZ, o que está associado às características do material. A amostra de argila TM possui uma estrutura significativamente mais rígida e compacta em comparação às demais, o que dificulta a penetração de água em seu interior. Por outro lado, as

argilas AV e AZ apresentaram valores de umidade típicos de materiais com maior conteúdo argiloso, conforme descrito por Oliveira (2011).

6.1.2 Plasticidade

Com base nos valores obtidos para os Limites de Atterberg, que estão apresentados na Tabela 4 foi possível identificar diferentes níveis de plasticidade entre as argilas analisadas, conforme a classificação de Burmister (1949). A argila AV apresenta limite líquido (LL) de 56,81 % e limite plástico (LP) de 39,88 %, resultando em um índice de plasticidade (IP) de 16,93 %, classificada como de plasticidade moderada ($15 \% < IP \leq 30 \%$). Esse comportamento indica maior capacidade de deformação e retenção de água, características típicas de materiais mais argilosos. Já a argila AZ, com LL de 28,07 % e LP de 21,71 %, apresenta IP de 6,33 %, sendo classificada como de baixa plasticidade ($IP \leq 15 \%$), com menor capacidade de deformação e maior estabilidade em variações de umidade. De forma semelhante, a argila TM, com LL de 24,29 % e LP de 19,74 %, tem IP de 4,56 %, também sendo classificada como de baixa plasticidade. Assim, a argila AV se destaca por ser mais moldável, enquanto AZ e TM são mais indicadas para situações que requerem maior estabilidade estrutural. As três argilas se mostraram com características distintas quando utilizadas separadamente, porém quando misturadas podem vir a apresentar resultados promissores como argilas complementares entre formulações.

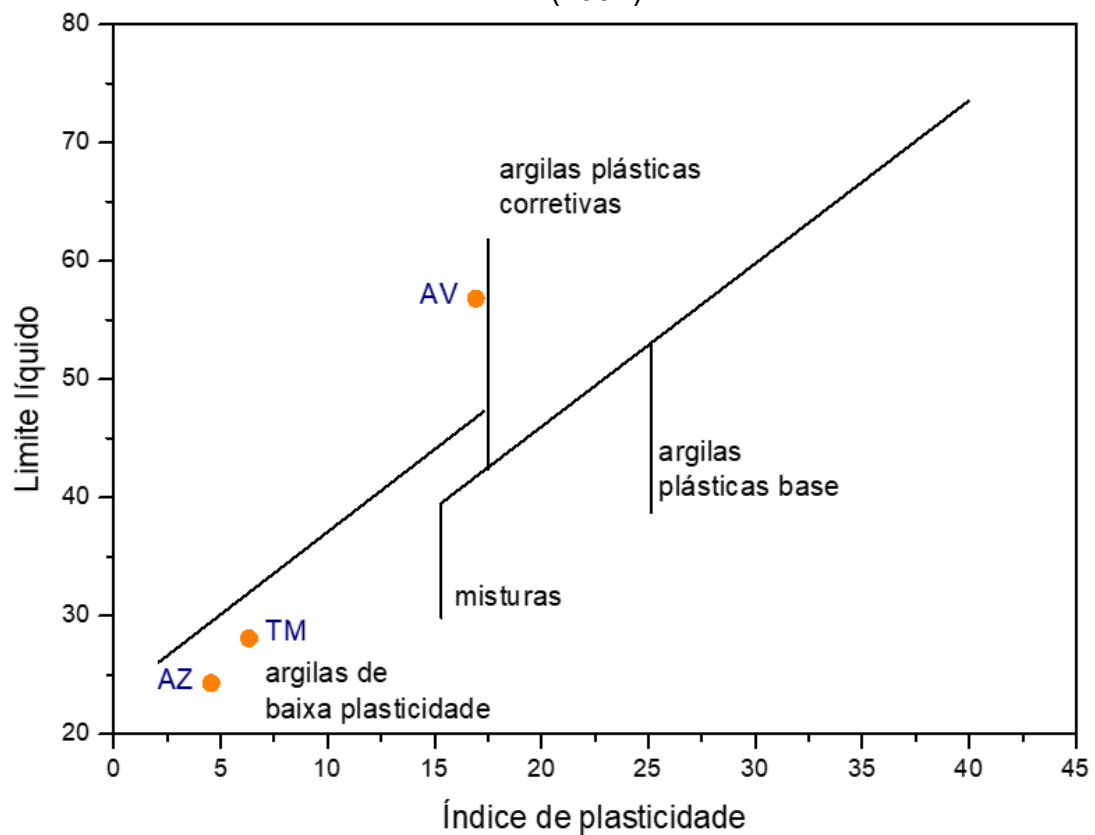
Tabela 4: Limites de Atterberg das matérias primas estudadas

Matéria-prima	Limite Líquido (LL)	Limite Plástico (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
AV	56,81	39,88	16,93
AZ	28,07	21,71	6,33
TM	24,29	19,74	4,56

Fonte: Autor (2024).

Com base nos resultados obtidos no estudo da plasticidade, foi possível desenvolver o índice de trabalhabilidade das argilas Figura 22 conforme estabelecido por Marsigli e Dondi (1997).

Figura 22: Classificação das matérias-primas com base no limite líquido e índice de plasticidade segundo o diagrama de trabalhabilidade desenvolvido por Marsigli e Dondi (1997)



Fonte: Autor (2024).

AZ e TM localizam-se na região das argilas de baixa plasticidade, caracterizadas por baixo índice plástico e limite líquido. Essa classificação destaca esses materiais como de baixa plasticidade, com pouca capacidade de moldagem e maior estabilidade em variações de umidade. Por outro lado, AV encontra-se na faixa das argilas plásticas corretivas, com valores mais elevados de limite líquido, indicando maior plasticidade, deformabilidade e capacidade de retenção de água. Esses atributos tornam o material mais adequado para aplicações que exigem maior moldabilidade (Alves; Baldo, 1997).

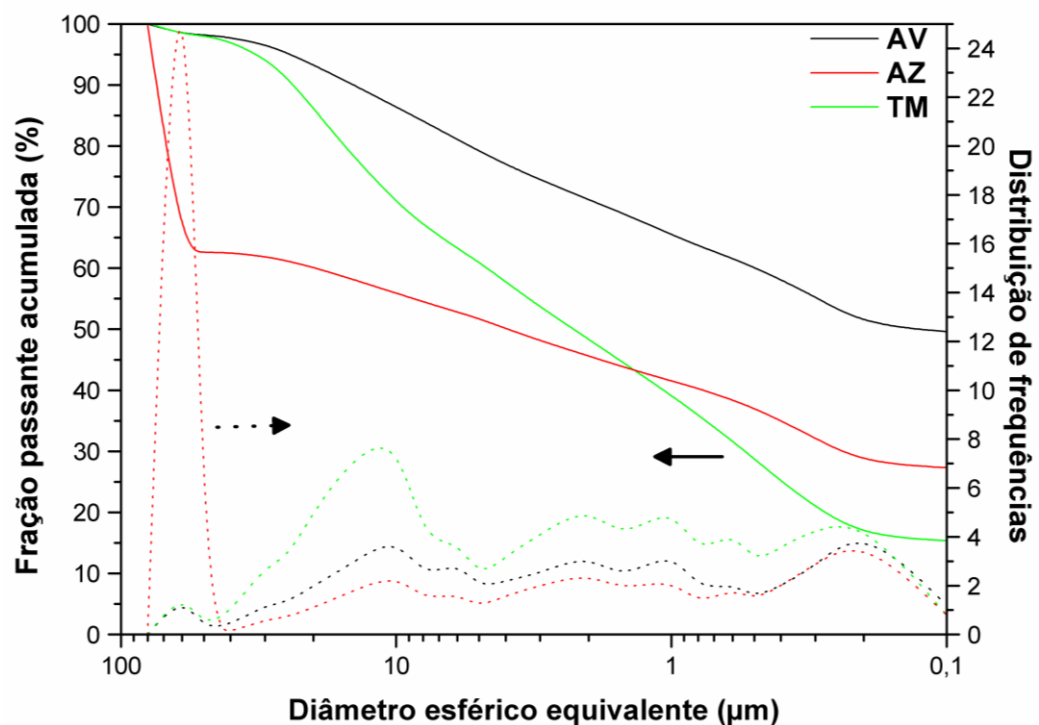
6.1.3 Distribuição de tamanhos de partículas por sedimentação

A análise da distribuição de tamanhos de partículas por sedimentação permite avaliar o comportamento das argilas em relação à plasticidade, compactação e estabilidade dimensional durante o processo produtivo. Essa técnica fornece dados

sobre a proporção de partículas finas, médias e grossas presentes na composição, possibilitando compreender suas influências nas etapas de conformação, secagem e queima. Argilas com maior concentração de partículas finas ($< 2 \mu\text{m}$) apresentam alta plasticidade e capacidade de compactação, essenciais para a moldagem eficiente e a formação de peças densas. No entanto, essas características podem aumentar a retração linear durante a secagem e queima, exigindo maior controle nos parâmetros do processo. Por outro lado, frações mais altas de partículas médias (2 a $20 \mu\text{m}$) e grossas ($> 20 \mu\text{m}$) contribuem para maior estabilidade dimensional, reduzindo o risco de fissuras, mas podem diminuir a plasticidade e dificultar a conformação (Monteiro, 2004).

É possível observar na Figura 23 que a argila AV apresenta a maior fração de partículas abaixo de $2 \mu\text{m}$, conferindo maior plasticidade ao material, o que favorece a moldagem e a conformação.

Figura 23: Distribuição cumulativa e de frequência do tamanho de partículas por sedimentação das matérias-primas, (seta tracejada) regiões de Maior Concentração de Finos e (seta contínua) frações granulométricas maiores.



(—) Valores cumulativos; (---) Distribuição de densidade.

Fonte: Autor (2024).

A distribuição de partículas intermediárias (2 a $20 \mu\text{m}$) contribui para a estabilidade após a queima, enquanto as partículas maiores (acima de $20 \mu\text{m}$)

ajudam na rigidez e resistência mecânica. A argila AZ, com maior fração de partículas acima de 20 μm , é menos plástica, o que pode impactar a moldagem. No entanto, a concentração de partículas intermediárias pode proporcionar maior resistência mecânica. A argila TM apresenta um equilíbrio entre partículas finas e intermediárias, oferecendo boas propriedades tanto para conformação quanto para resistência mecânica (Conceição, 2011).

Os dados obtidos de DTP das argilas AV, AZ e TM conforme apresentados na Tabela 5, apresentam suas particularidades e potencialidades. A argila AV apresenta predominância de partículas finas, com alta porcentagem de partículas inferiores a 2 μm e uma distribuição concentrada em tamanhos menores que 10 μm .

Tabela 5: Distribuição granulométrica das matérias-primas: Faixas de tamanho, parâmetros estatísticos e quantificação das partículas finas

Matéria-prima	< 2 μm (%)	2 a 20 μm (%)	> 20 μm (%)	< 4 μm (%)	4 a 63 μm (%)	> 63 μm (%)
AV	71,20	22,10	6,70	77,00	21,40	1,60
AZ	45,60	14,50	39,90	50,40	12,50	37,10
TM	48,40	37,90	13,70	57,70	40,60	1,70
Matéria-prima	D₉₀ (μm)	D₅₀ (μm)	D₂₀ (μm)	D₁₀ (μm)	% < 10 μm	% < 1 μm
AV	14,54	0,13	< 0,10	< 0,10	86,40	65,60
AZ	73,51	3,90	0,18	0,18	55,90	41,50
TM	23,81	2,26	0,27	0,18	70,90	39,20

Resultado referente à amostra bruta.

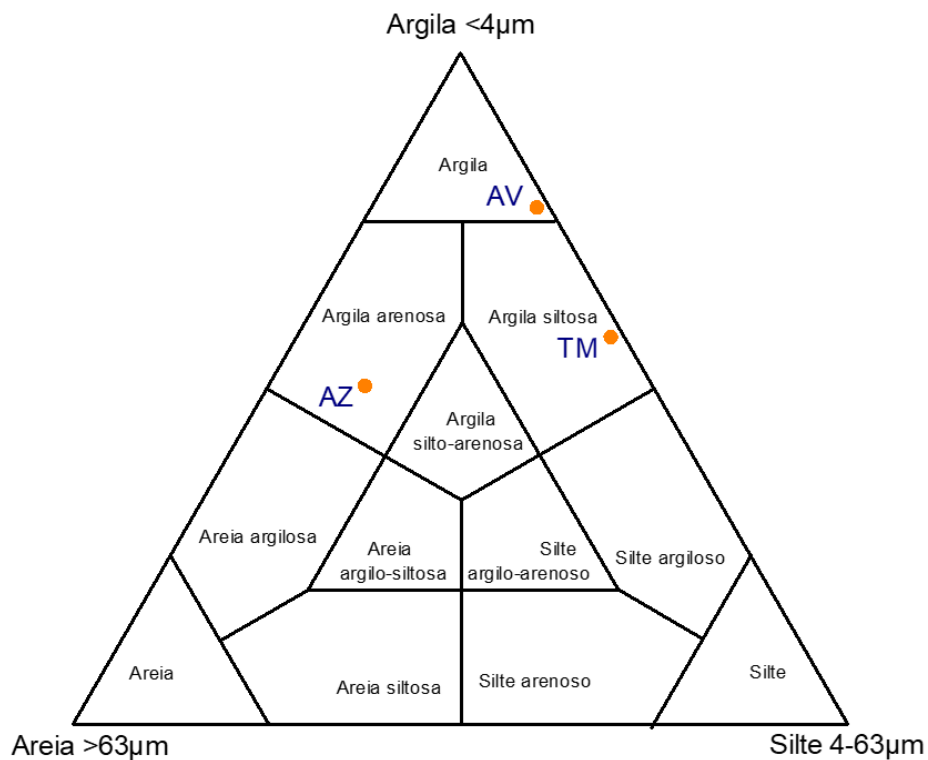
Fonte: Autor (2024).

Essa característica confere maior plasticidade e compactação à massa cerâmica, facilitando a moldagem e promovendo uma estrutura mais densa após a queima. No entanto, pode aumentar o risco de retração durante a secagem e queima. Já a argila AZ apresenta uma distribuição mais ampla, com uma fração significativa de partículas maiores que 20 μm e menores porcentagens na faixa de partículas finas. Essa granulometria favorece um comportamento mais estável durante a secagem, com menor propensão à retração, mas pode reduzir a plasticidade da massa, exigindo ajustes no processo para alcançar a densidade desejada. Por sua vez, a argila TM demonstra uma distribuição intermediária, com

presença de partículas finas e médias. Essa configuração equilibra as propriedades plásticas e a estabilidade dimensional, oferecendo flexibilidade na formulação de massas cerâmicas.

Os valores de D90, D50 e D10 reforçam as diferenças granulométricas entre as matérias-primas, destacando a maior uniformidade da AV e a maior heterogeneidade da AZ. A caracterização de textura das argilas AV, AZ e TM, com base no triângulo de textura do solo USDA Figura 24 explica que a argila AV, classificada como "argila", apresenta alta plasticidade e coesão, características ideais para moldagem e extrusão.

Figura 24: Classificação das matérias-primas AV, AZ e TM com base no diagrama triangular do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), utilizando as frações granulométricas de argila ($<4\ \mu\text{m}$), silte ($4\text{--}63\ \mu\text{m}$) e areia ($>63\ \mu\text{m}$)

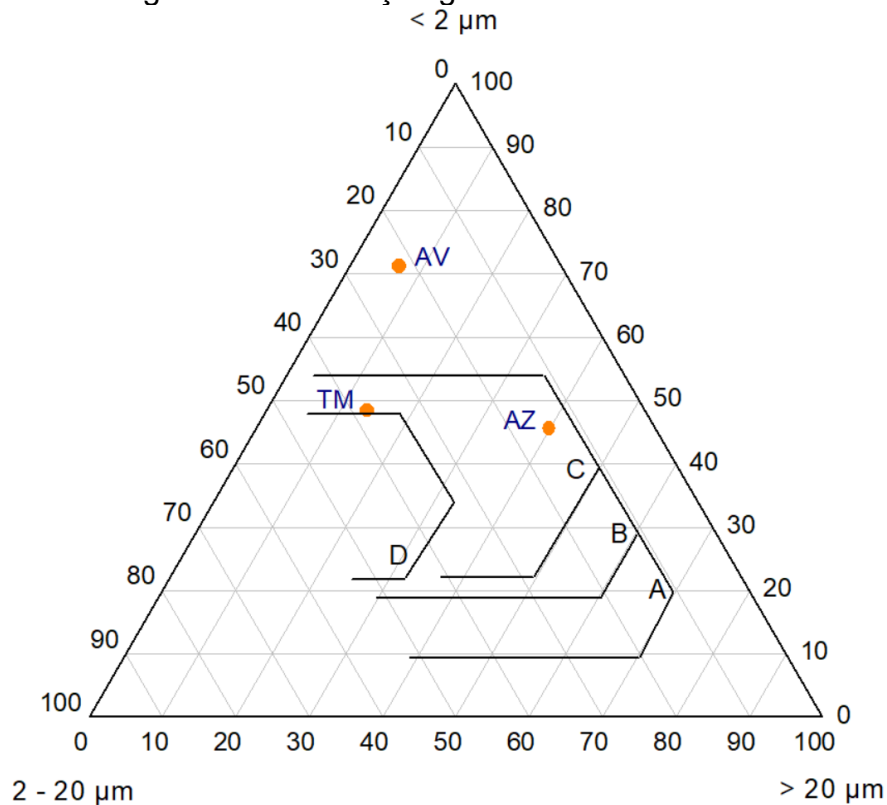


Fonte: Autor (2024).

Essas diferenças texturais destacam a importância da seleção e do balanceamento das matérias-primas para otimizar o desempenho e a qualidade dos produtos cerâmicos, como blocos e telhas, no setor de cerâmica vermelha.

A análise das três argilas para o setor de cerâmica vermelha estrutural, classificadas pelo diagrama de Winkler (Winkler, 1954). A Figura 25 destaca diferenças significativas entre elas.

Figura 25: Classificação das matérias-primas AV, AZ e TM segundo o diagrama triangular de distribuição granulométrica de Winkler.



A: tijolos maciços; B: tijolos de vedação perfurados verticalmente; C: telhas, blocos de alvenaria estrutural e pisos; D: cerâmicas especiais.

Fonte: Autor (2024).

A amostra AV, localizada próximo às argilas com partículas inferiores a 2 µm, apresenta alta plasticidade, características ideais para moldagem, mas que exigem cuidado devido à elevada retração que para essa análise não se enquadra nas classificações apresentada pelo diagrama de Winkler. A amostra AZ, na categoria C, exibe equilíbrio granulométrico, conferindo boa plasticidade e estabilidade dimensional, adequada para produtos como tijolos e telhas. Já a amostra TM, posicionada no limite da categoria D, possui maior teor de partículas grosseiras, resultando em baixa plasticidade, mas pode ser combinada com argilas mais plásticas, como AV, para desenvolvimento de formulações que atendam as especificações desejadas.

6.1.4 Resíduo bruto e granulometria por peneiramento

A análise do resíduo bruto e da granulometria por peneiramento é essencial para avaliar a adequação das matérias-primas. O resíduo bruto fornece uma indicação da presença de partículas maiores ou de aglomerados não desagregados, que podem influenciar negativamente as propriedades físicas e mecânicas (Barba, 2002). A análise de resíduo bruto Tabela 6 por peneiramento em malha 325 mesh revelou diferenças significativas.

Tabela 6: Teor de resíduo bruto das matérias-primas AV, AZ e TM, obtido por peneiramento a úmido em malha de 325 Mesh/44 μm

Matéria-prima	Resíduo bruto (%)
AV	4,07 $\pm$ 0,31
AZ	52,20 $\pm$ 0,94
TM	4,59 $\pm$ 0,47

Fonte: Autor (2024).

A amostra AV apresentou 4,07 % de resíduo retido, indicando baixo teor de material inerte (minerais não argilosos) presente na amostra, característica típica de argilas com elevada plasticidade e boa trabalhabilidade. A argila AZ, com 52,20 % de resíduo, demonstrou elevada presença de materiais inertes, conferindo-lhe menor plasticidade, maior estabilidade dimensional. A argila TM, por sua vez, apresentou 4,59 % de resíduo, valor próximo ao da amostra AV, sugerindo comportamento físico semelhante em termos de plasticidade e trabalhabilidade. No entanto, a argila TM difere das demais por apresentar características típicas de um argilite, rocha composta por partículas finas de minerais argilosos. Essa composição confere à TM uma estrutura mais compacta e coesa, o que, em seu estado natural, dificulta o processamento direto. Por esse motivo, a amostra passou por um processo de moagem a seco, fundamental para a desagregação das partículas e a obtenção de uma granulometria compatível com os requisitos necessários.

A análise granulométrica por peneiramento em diferentes malhas conforme apresentado na Tabela 7 permitiram identificar que nas malhas mais grossas, como

30 mesh (595 μm), os resíduos retidos foram baixos para as amostras AV (0,03 %), TM (0,13 %) e relativamente maior para AZ (0,42 %), indicando que a AZ possui maior proporção de grânulos grosseiros.

Tabela 7: Distribuição granulométrica do resíduo bruto obtido na peneira 325 Mesh/44 μm das matérias-primas AV, AZ e TM, indicando a fração retida em diferentes malhas

Peneira		Retido (% em massa)		
MESH	μm	AV	AZ	TM
30	595	0,03 $\pm$ 0,09	0,42 $\pm$ 0,03	0,13 $\pm$ 0,10
50	297	0,09 $\pm$ 0,05	8,38 $\pm$ 0,05	0,41 $\pm$ 0,09
70	210	0,32 $\pm$ 0,03	14,52 $\pm$ 0,03	0,46 $\pm$ 0,05
100	149	0,21 $\pm$ 0,03	11,75 $\pm$ 0,05	0,33 $\pm$ 0,10
140	88	0,5 $\pm$ 0,06	12,41 $\pm$ 0,08	0,49 $\pm$ 0,08
200	74	0,74 $\pm$ 0,08	3,63 $\pm$ 0,05	0,55 $\pm$ 0,07
270	53	1,59 $\pm$ 0,11	1,68 $\pm$ 0,10	1,25 $\pm$ 0,07
Finos	-	0,53 $\pm$ 0,06	0,26 $\pm$ 0,03	0,68 $\pm$ 0,09
Total grosso		4,01 $\pm$ 0,12	53,05 $\pm$ 1,09	4,30 $\pm$ 0,31
< 44 μm		95,99 $\pm$ 0,08	46,95 $\pm$ 1,08	95,70 $\pm$ 0,04

Fonte: Autor (2024).

Esse padrão foi reforçado nas malhas 50 mesh (297 μm), onde os resíduos retidos aumentaram para AV (0,09 %), TM (0,41 %) e AZ (8,38 %), sendo a AZ a que apresentou maior concentração de grânulos nesse intervalo. Na faixa intermediária (70 a 140 mesh), a amostra AZ apresentou os maiores resíduos, alcançando 11,75 % na malha 70 mesh (210 μm) e 12,41 % na malha 140 mesh (88 μm), sugerindo uma composição com maior proporção de grânulos médios. Por outro lado, as amostras AV e TM apresentaram valores menores nessa faixa, com 0,32 e 0,46 % na malha 70 mesh, e 0,50 e 0,49 % na malha 140, respectivamente.

Nas malhas mais finas, como 200 mesh (74 μm) e 270 mesh (53 μm), a AZ apresentou o maior acúmulo de grânulos, com resíduos de 3,63 e 1,68 %, indicando uma maior proporção de partículas finas. A AV também mostrou concentração relevante, com 0,74 e 1,59 % nas respectivas malhas, enquanto a TM teve menores resíduos nessa faixa, com 0,55 e 1,25 %, respectivamente. Por fim, no prato (<44

μm), que representa as partículas mais finas, a amostra TM apresentou a maior proporção (0,68 %), seguido de AV (0,53 %) e AZ (0,26 %), confirmando que a AV possui uma fração considerável de partículas muito finas, enquanto a AZ é composta predominantemente por partículas médias a grossas.

Esses resultados destacam a diversidade granulométrica entre as amostras, o que pode influenciar diretamente suas propriedades cerâmicas. A AV, com maior proporção de partículas finas, apresenta maior plasticidade e moldabilidade, mas com maior retração. A AZ, rica em partículas médias e grossas, possui menor plasticidade, mas maior estabilidade dimensional. Já a TM apresenta características intermediárias, sendo potencialmente útil em combinações para balancear plasticidade e estabilidade no processamento cerâmico (Oliveira, 2011).

6.1.5 Análise química quantitativa (FRX)

Conforme apresentado na Tabela 8, a análise química das matérias-primas cerâmicas permitiu identificar os principais óxidos presentes nas amostras avaliadas.

Tabela 8: Composição química das matérias-primas TM, AZ e AV, obtidos por Fluorescência de Raios X

Óxidos	Matérias-primas (%)		
	AV	AZ	TM
SiO₂	65,50	74,66	61,28
Al₂O₃	14,97	15,95	16,73
K₂O	1,09	1,89	3,20
Na₂O	0,09	0,10	0,82
Fe₂O₃	8,49	1,70	6,21
TiO₂	1,40	0,53	0,81
CaO	0,28	0,05	0,13
MgO	0,54	0,11	1,25
Mn₂O₃	0,01	0,01	0,01
P₂O₅	0,12	0,06	0,08
SO₃	<0,05	<0,05	0,08
*PF	7,50	4,92	9,39

*P.F.: Perda ao fogo.

Fonte: Autor (2024).

A caracterização química, amplamente adotada na área cerâmica, destaca-se por sua praticidade, rapidez na obtenção de resultados e aplicabilidade direta na avaliação da qualidade das argilas. Sua utilização torna-se ainda mais relevante quando combinada com outros métodos de análise, como caracterizações térmicas, físicas e estruturais, possibilitando uma abordagem mais robusta do material (Meunier, 2005; Pinto, 2015).

Além de contribuir para o entendimento técnico do desempenho das matérias-primas, essa caracterização auxilia na detecção de óxidos com potencial impacto no processamento, seja por favorecerem reações desejadas como fundentes e estabilizantes, seja por representarem possíveis contaminantes que possam comprometer a qualidade do produto ou oferecer riscos ambientais.

A análise química das argilas utilizadas nesse estudo, Tabela 8, revela que as matérias-primas são predominantemente compostas por SiO_2 (Sílica), sendo este componente de grande importância no processo de secagem. A quantidade identificada de SiO_2 é um indicativo da presença de quartzo livre e do silício estrutural presente nos argilominerais, os quais, juntamente com outros óxidos, influenciam diretamente no processo produtivo. Especificamente, na etapa de conformação, atuando como desplastificante, favorecendo a extrusão, além de contribuir como formador de capilares durante a secagem (Junior, 2016).

A argila AZ apresenta o maior teor de sílica, superior a 74 %, seguida pela AV e TM, com aproximadamente 65 e 61 %, respectivamente. Tais valores são consistentes com os padrões comumente encontrados em matérias-primas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha (Maciel *et al.*, 2023).

Em todas as amostras de argila, são observados valores significativos de Fe_2O_3 (óxido de ferro), variando de 1,70 a 8,49 %. Essa presença irá conferir uma coloração avermelhada ao produto após a queima. Vale ressaltar a presença de óxidos fundentes, principalmente Na_2O e K_2O , nas matérias-primas. A argila TM se destaca, com valores em torno dos 3 % na soma desses óxidos, seguida pela AZ, com 1,89 %, e pela argila AV, com uma porcentagem menor, porém acima de 1 %. Esses óxidos desempenham um papel significativo na formação de fase líquida durante a sinterização, contribuindo para a redução da porosidade e, conseqüentemente, para o aumento da resistência mecânica (Pinto *et al.*, 2021).

Quanto à perda ao fogo (PF), geralmente associada à decomposição de minerais argilosos e carbonatos durante a sinterização, os valores observados variam de 4 a 9 %, dentro dos limites comumente aceitos para o processo de cerâmica estrutural. No entanto, valores abaixo de 5 %, como os encontrados na argila AZ, indicam uma predominância de compostos não plásticos em maior quantidade, como a sílica na forma de quartzo (Motta *et al.*, 2001).

6.1.6 Caracterização Mineralógica (DRX)

A interpretação dos difratogramas de Raios X das argilas estudadas permitiu identificar, conforme apresentado na Tabela 9 e Figura 26, que as argilas AV e AZ contêm valores expressivos de quartzo (SiO_2 cartão JCPDS 01-079-1906), 50 % e 68 % respectivamente, enquanto em TM o teor de quartzo (SiO_2 cartão JCPDS 01-079-1906) é mais baixo (43 %).

Tabela 9: Composição mineralógica das matérias-primas determinada por difração de Raios X com quantificação pelo método Rietveld.

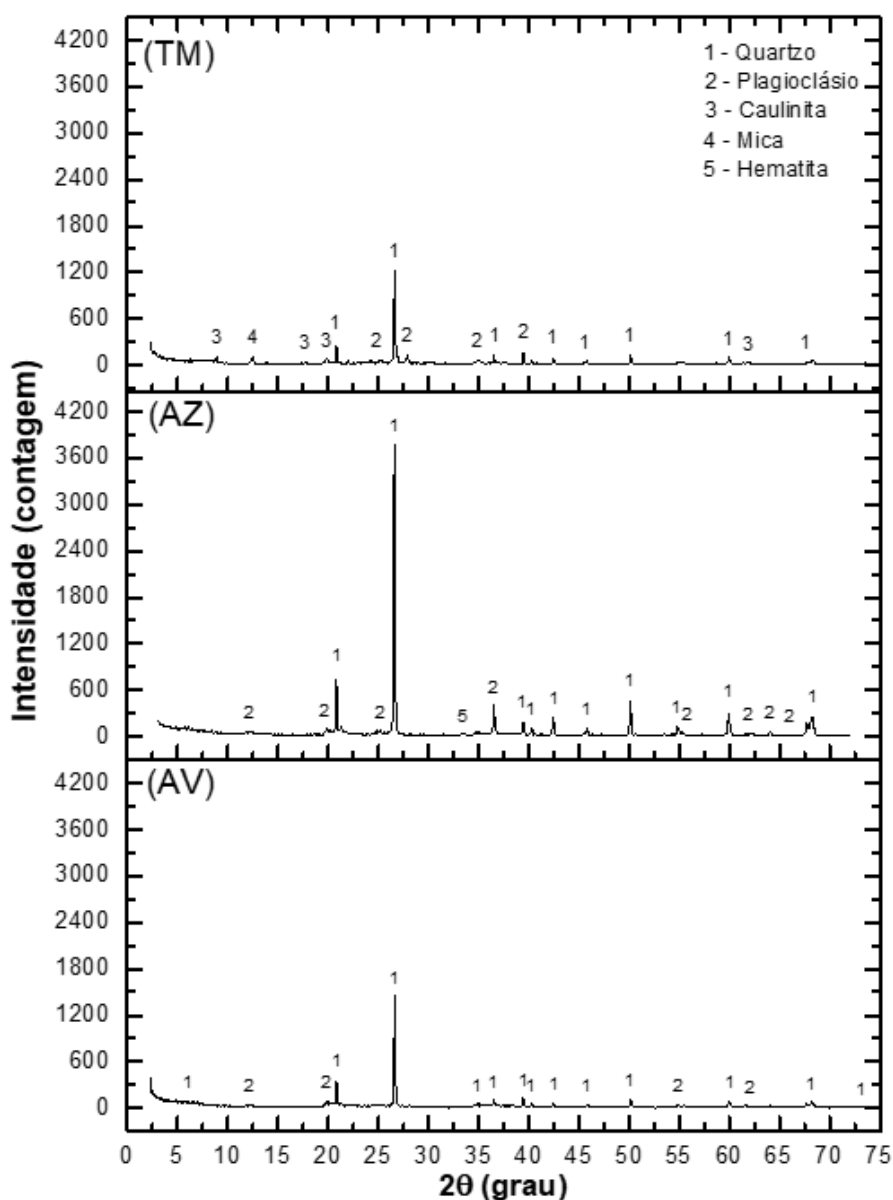
Matérias-primas	Composição mineralógica (%)				
	Q	P	K	M	H
TM	43	4	45	1	7
AZ	68	-	26	-	6
AV	50	-	41	-	9

Q: Quartzo; P: Plagioclase; K: Caulinita; M: Mica; H: Hematita
Fonte: Autor (2025).

Por último, a argila TM, além do teor de quartzo já apresentado, revelou a presença de plagioclásio ($(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$, cartão JCPDS 00-009-0466), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, cartão JCPDS 01-083-0971) e mica ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, cartão JCPDS 01-083-0771). O plagioclásio, pertencente ao grupo dos feldspatos, atua como fundente durante a queima, promovendo reações de liquefação parcial que facilitam a sinterização, o fechamento dos poros e, conseqüentemente, uma maior densificação e resistência mecânica do material cerâmico. A presença de feldspatos também contribui para a redução da temperatura de queima, tornando o processo mais eficiente energeticamente.

A caulinita, uma argila do tipo caulinítica, é fundamental para a plasticidade e moldabilidade da matéria-prima, favorecendo a conformação do corpo cerâmico. Durante a queima, essa fase se decompõe formando metacaulinita e, posteriormente, mullita e fases vítreas, que são responsáveis por conferir coesão, resistência mecânica e estabilidade dimensional ao produto final.

Figura 26: Difratomogramas de Raios X das matérias-primas TM, AZ e AV, evidenciando os principais minerais presentes nas amostras



Fonte: Autor (2025).

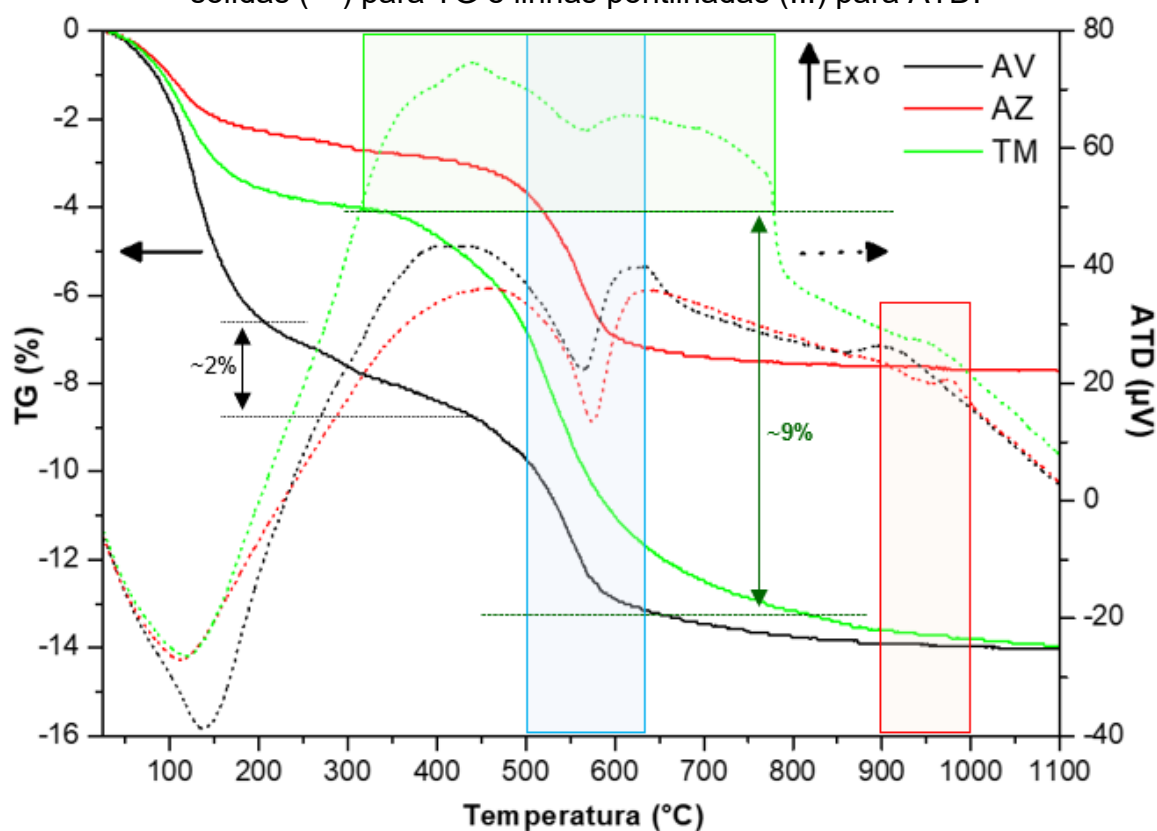
A mica, por sua vez, é um silicato em camadas que pode atuar positivamente na resistência ao choque térmico devido à sua estrutura lamelar, que acomoda

tensões térmicas. Contudo, seu conteúdo deve ser controlado, pois em concentrações elevadas pode levar à expansão térmica excessiva e formação de microtrincas, comprometendo a integridade do material após o resfriamento (Ituma, 2018). Portanto, o equilíbrio entre essas fases minerais é essencial para o desempenho técnico da argila TM em aplicações cerâmicas estruturais.

Análise Térmica (ATD/TG)

Dos resultados obtidos em termos de análises térmicas, observa-se na Figura 27 que da temperatura ambiente até cerca dos 200 °C ocorrem as reações de eliminação da água fisicamente adsorvida na superfície das partículas argilosas das três amostras estudadas. Em termos de perda de massa registaram-se valores de aproximadamente 6,5%, 3,5% e 2,0%, respectivamente para as amostras AV, TM e AZ por Ferreira et al. (2012).

Figura 27: Resultados das análises ATD e TG das amostras estudadas, com linhas sólidas (—) para TG e linhas pontilhadas (...) para ATD.



Fonte: Autor (2025).

Entre 200 °C e 600 °C surgem, tipicamente, as eventuais reações de oxidação da matéria orgânica, notando-se neste caso perdas assinaláveis na amostra AV (cerca de 2%, ver pormenor na Figura 27) relativamente às restantes duas amostras (AZ e TM) que indicam reduzida queima de matéria orgânica nessa gama de temperaturas.

A partir de 500 °C até cerca dos 640 °C, zona assinalada com sombreado azul na Figura 27, observam-se os picos endotérmicos característicos da eliminação das águas de constituição nas partículas de caulinita (grupos OH dos argilominerais), também confirmadas pelas respetivas perdas de massa nas curvas TG (cerca de 3% para AZ, 4% para AV e 5% para TM), e que correspondem no fundo às reações de transformação da caulinita em metacaulinita. Cabe destacar ainda, para a amostra TM, a queima tardia de matéria orgânica bem registrada pela inflexão exotérmica entre os 300 °C e os 800 °C (zona com sombreado verde) e pela grande perda de massa registada nesse intervalo de temperatura (cerca de 9%), relativa à perda de massa conjunta da água de constituição da caulinita e da queima de matéria orgânica.

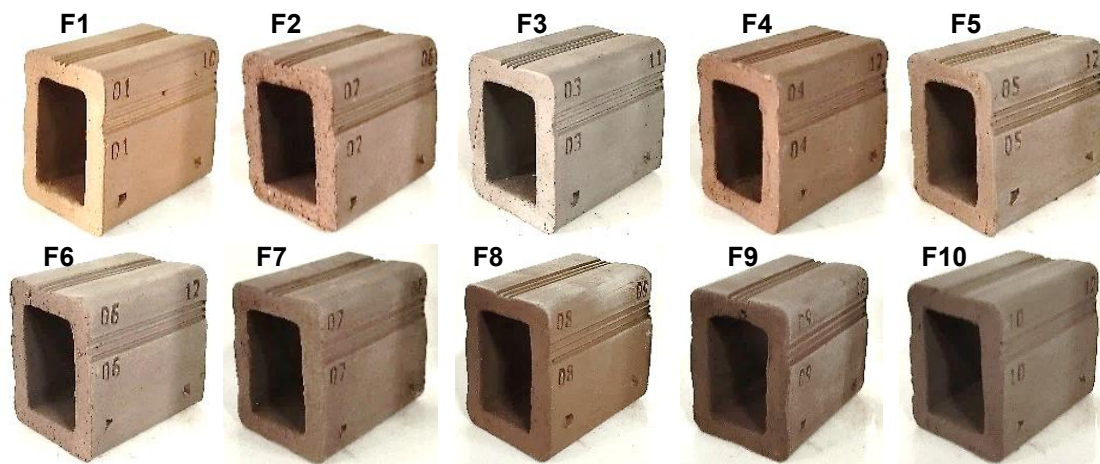
É importante ressaltar que as matérias-primas AV e TM, em sua constituição química apresentaram maiores teores de caulinita, foram as que registraram as maiores perdas de massa total entre as amostras analisadas, com valores próximos a 14 %, devido às maiores perdas por eliminação das águas de constituição desse argilomineral e ao efeito conjunto da maior presença de matéria orgânica.

Finalmente, no intervalo de 900 e 1000 °C (zona com sombreado vermelho), aparecem os picos exotérmicos característicos da cristalização do espinélio, também denominado por mulita I, que ocorre a partir da metacaulinita previamente formada pela decomposição da caulinita como evidenciado nos estudos de Medeiros et al. (2016).

6.2 DETERMINAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (OE 2)

Nesta etapa do estudo, são apresentados Figura 28 os resultados referentes ao comportamento das composições formuladas por meio do método de delineamento de misturas (simplex centroide), utilizando diferentes proporções das argilas AV, AZ e TM.

Figura 28: Fotografia das peças referente as 10 formulações conformadas



Fonte: Autor (2025).

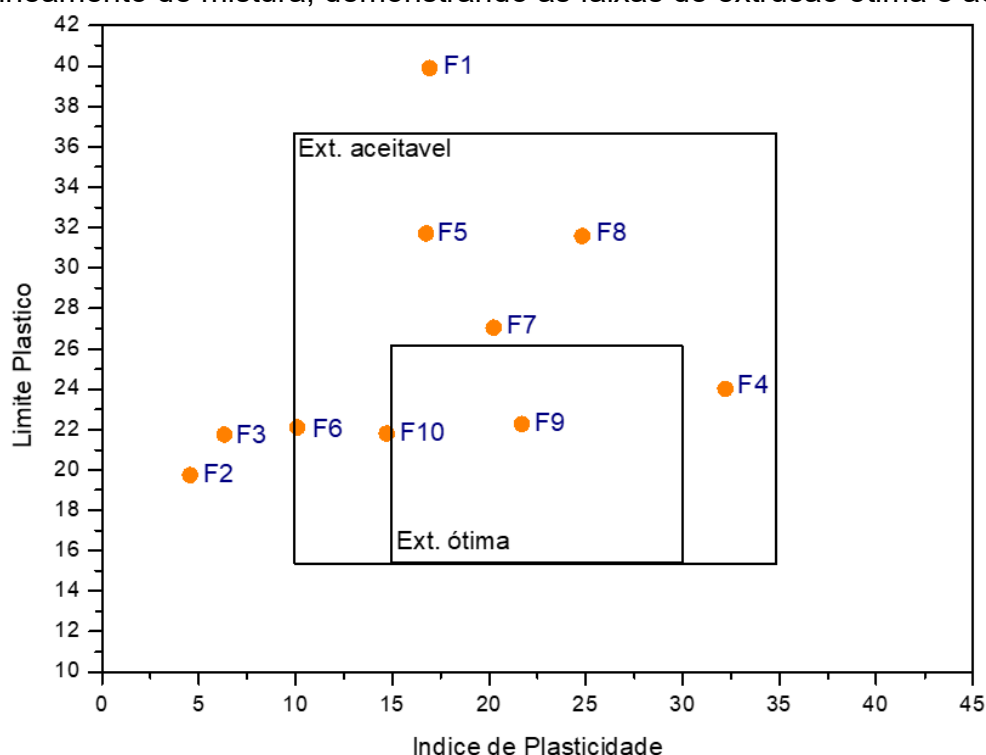
6.2.1 Plasticidade

A avaliação do índice de trabalhabilidade das dez formulações cerâmicas Figura 29, compostas por combinações de três argilas, foi realizada com base nos critérios estabelecidos por Marsigli e Dondi (1997), que correlacionam o limite plástico e o índice de plasticidade. Os resultados demonstraram diferentes níveis de adequação das formulações para o processo de extrusão, refletindo diretamente nas características de conformação.

As formulações F9 e F10 apresentaram índices que as classificaram na categoria de extrusão ótima. Essa classificação indica que essas formulações possuem uma combinação ideal entre limite plástico e índice de plasticidade, favorecendo ao processo de conformação por extrusão, diminuindo a possibilidade de defeitos como trincas ou fissuras.

As formulações F4, F5, F6, F7 e F8 foram classificadas como de extrusão aceitável. Embora apresentem propriedades que permitem o processamento cerâmico com desempenho satisfatório, essas formulações podem requerer pequenos ajustes no controle de umidade ou na composição das matérias-primas. Por outro lado, as formulações F1, F2 e F3 foram classificadas como fora dos padrões estabelecidos. Esse resultado sugere que essas formulações apresentam limitações na relação entre limite plástico e índice de plasticidade, o que pode comprometer a trabalhabilidade durante o processo de extrusão.

Figura 29: índice de trabalhabilidade estabelecidos por Marsigli e Dondi (1997) entre o limite de plasticidade e índice de plasticidade das dez formulações determinada por delineamento de mistura, demonstrando as faixas de extrusão ótima e aceitável



Fonte: Autor (2025).

Tais limitações podem resultar em baixa coesão, dificuldade na moldagem e maior suscetibilidade a defeitos. Vale salientar que as formulações F1, F2 e F3 correspondem a 100 % de AV, AZ e TM e não é recomendável trabalhar apenas com uma argila no processo produtivo, já que qualquer iniciativa de correção de defeitos que possam surgir no decorrer do processo devido a matéria-prima é dificultada.

6.2.2 Granulometria

A granulometria das matérias-primas cerâmicas exerce influência direta sobre o desempenho no processamento, especialmente nas etapas de conformação e secagem. A caracterização granulométrica por peneiramento em faixas progressivamente mais finas permite compreender o comportamento das partículas de diferentes tamanhos ao longo da produção (Oliveira, 2011).

A distribuição granulométrica das dez formulações analisadas está apresentada na Tabela 10. Os ensaios foram realizados por peneiramento com aberturas variando de 595 μm a partículas inferiores a 44 μm . Nas faixas mais grossas, correspondentes a aberturas de 595 e 297 μm , a retenção de partículas foi baixa na maioria das formulações, indicando baixo teor de partículas grosseiras.

Tabela 10: Análise granulométrica do resíduo bruto em malha 325 Mesh / 44 μm obtido por peneiramento das diferentes formulações proposta nesse estudo, apresentando a quantidade retida em diferentes aberturas de malhas

Peneira		Retido (% em massa)				
MESH	μm	F1	F2	F3	F4	F5
30	595	0,03 $\pm$ 0,09	0,42 $\pm$ 0,03	0,13 $\pm$ 0,10	0,16 $\pm$ 0,12	0,19 $\pm$ 1,22
50	297	0,09 $\pm$ 0,05	8,38 $\pm$ 0,05	0,41 $\pm$ 0,09	3,41 $\pm$ 0,08	0,52 $\pm$ 0,45
70	210	0,32 $\pm$ 0,03	14,52 $\pm$ 0,03	0,46 $\pm$ 0,05	7,75 $\pm$ 0,05	0,38 $\pm$ 0,08
100	149	0,21 $\pm$ 0,03	11,75 $\pm$ 0,05	0,33 $\pm$ 0,10	6,16 $\pm$ 0,08	0,3 $\pm$ 0,22
140	88	0,5 $\pm$ 0,06	12,41 $\pm$ 0,08	0,49 $\pm$ 0,08	7,26 $\pm$ 0,10	0,46 $\pm$ 0,09
200	74	0,74 $\pm$ 0,08	3,63 $\pm$ 0,05	0,55 $\pm$ 0,07	2,55 $\pm$ 0,11	0,62 $\pm$ 0,15
270	53	1,59 $\pm$ 0,11	1,68 $\pm$ 0,10	1,25 $\pm$ 0,07	1,82 $\pm$ 0,11	1,33 $\pm$ 0,10
Finos	-	0,53 $\pm$ 0,06	0,26 $\pm$ 0,03	0,68 $\pm$ 0,09	0,43 $\pm$ 0,85	0,53 $\pm$ 0,87
Total grosso		4,01 $\pm$ 0,12	53,05 $\pm$ 1,09	4,3 $\pm$ 0,31	29,54 $\pm$ 0,54	4,33 $\pm$ 0,18
< 44 μm		95,99 $\pm$ 0,08	46,95 $\pm$ 1,08	95,7 $\pm$ 0,04	70,46 $\pm$ 1,10	95,67 $\pm$ 0,11

Peneira		Retido (% em massa)				
MESH	μm	F6	F7	F8	F9	F10
30	595	0,38 $\pm$ 1,10	0,21 $\pm$ 0,55	0,1 $\pm$ 0,79	0,27 $\pm$ 0,65	0,4 $\pm$ 0,54
50	297	4,27 $\pm$ 0,88	2,79 $\pm$ 0,18	1,6 $\pm$ 0,02	5,12 $\pm$ 0,98	2,27 $\pm$ 0,04
70	210	7,35 $\pm$ 0,18	5,51 $\pm$ 0,45	3,08 $\pm$ 0,10	10,46 $\pm$ 0,29	2,74 $\pm$ 0,22
100	149	6,31 $\pm$ 0,87	4,35 $\pm$ 0,18	2,48 $\pm$ 0,91	8,27 $\pm$ 0,55	2,68 $\pm$ 0,09
140	88	6,4 $\pm$ 0,10	4,41 $\pm$ 1,12	2,92 $\pm$ 0,15	8,23 $\pm$ 0,74	2,67 $\pm$ 0,48
200	74	2,07 $\pm$ 0,10	1,65 $\pm$ 0,19	1,42 $\pm$ 1,45	2,86 $\pm$ 0,54	1,12 $\pm$ 0,02
270	53	1,4 $\pm$ 0,05	1,58 $\pm$ 0,98	1,5 $\pm$ 0,28	1,61 $\pm$ 0,01	1,41 $\pm$ 0,87
Finos	-	0,33 $\pm$ 0,74	0,44 $\pm$ 0,14	0,42 $\pm$ 0,16	0,41 $\pm$ 0,09	0,37 $\pm$ 0,98
Total grosso		28,51 $\pm$ 0,54	20,94 $\pm$ 0,11	13,52 $\pm$ 0,54	37,23 $\pm$ 1,23	13,66 $\pm$ 0,54
< 44 μm		71,49 $\pm$ 0,98	79,06 $\pm$ 0,76	86,48 $\pm$ 1,01	62,77 $\pm$ 0,70	86,34 $\pm$ 0,80

Fonte: Autor (2025).

A formulação F3 apresentou a maior quantidade retida em 595 μm (3,02 %), seguida por F10 (2,93 %), enquanto as demais ficaram abaixo de 1 %. Na peneira de 297 μm , observou-se maior variação, com F10 (16,61 %) e F2 (15,79 %) apresentando os maiores teores de partículas maiores, enquanto F1 (2,24 %) e F4 (11,54 %) exibiram os menores. Na faixa intermediária, entre 210 e 105 μm , destacaram-se as formulações F6, F7 e F9, que apresentaram altos teores de partículas em 210 μm (22,13, 20,77 e 22,21 %, respectivamente) e em 149 μm (25,78, 26,31 e 28,09 %, respectivamente).

Em contraponto, F5 e F3 apresentaram menores concentrações nessa faixa, indicando reduzida presença de partículas médias. Nas faixas finas, entre 74 e 53 μm , F1 apresentou a maior retenção em 53 μm (39,65 %), evidenciando uma elevada proporção de partículas finas, seguida por F3 (29,06 %) e F5 (30,71 %).

Essas formulações, com maior conteúdo de partículas finas, tendem a apresentar maior plasticidade, devido à maior suscetibilidade à retração ou ao surgimento de microfissuras. Na fração mais fina, com partículas inferiores a 44 μm , correspondente ao material retido no prato coletor, F3 apresentou maior quantidade (15,81 %), seguida por F1 (13,21 %) e F5 (12,24 %).

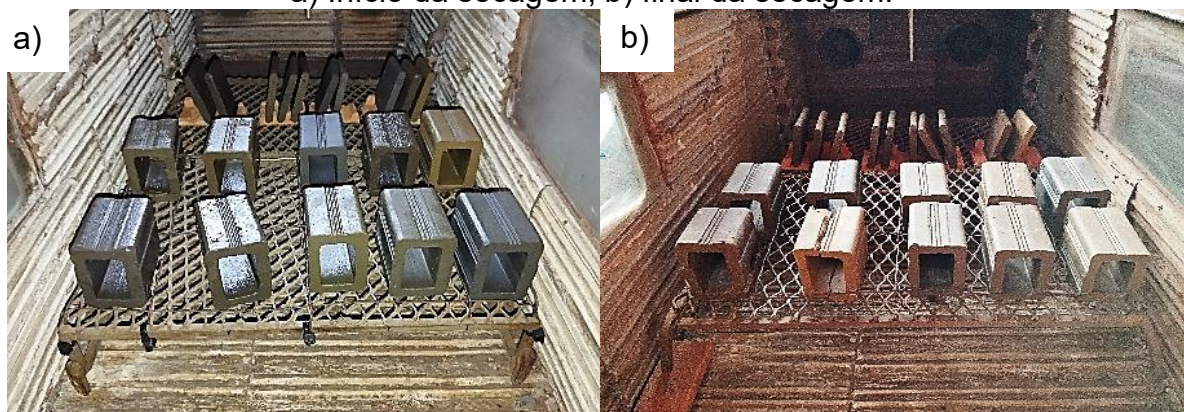
Esse alto teor de partículas ultrafinas contribui para a plasticidade da massa cerâmica, mas pode demandar cuidados adicionais para evitar falhas durante o processamento térmico. De forma geral, formulações como F6, F7 e F9, com maior concentração de partículas médias, apresentaram comportamento favorável à moldagem e à estabilidade dimensional, sendo mais indicadas para processos cerâmicos que exigem controle da retração. Por outro lado, as formulações F1, F3 e F5, com predominância de partículas finas, oferecem maior plasticidade, mas requerem maior atenção durante a secagem.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CPS SECOS (OE 3)

As caracterizações realizadas nos corpos de prova conformados Figura 30 (a) e submetidos ao processo de secagem em ciclo rápido de 60 minutos Figura 30 (b) forneceram informações para avaliar o desempenho das formulações. Esse ciclo acelerado permitiu identificar o comportamento das peças em condições de

secagem mais agressivas, possibilitando uma análise detalhada da influência da composição mineralógica e granulométrica das argilas no processo.

Figura 30: Fotografia das amostras durante o processo de secagem em ciclo rápido: a) Início da secagem, b) final da secagem.



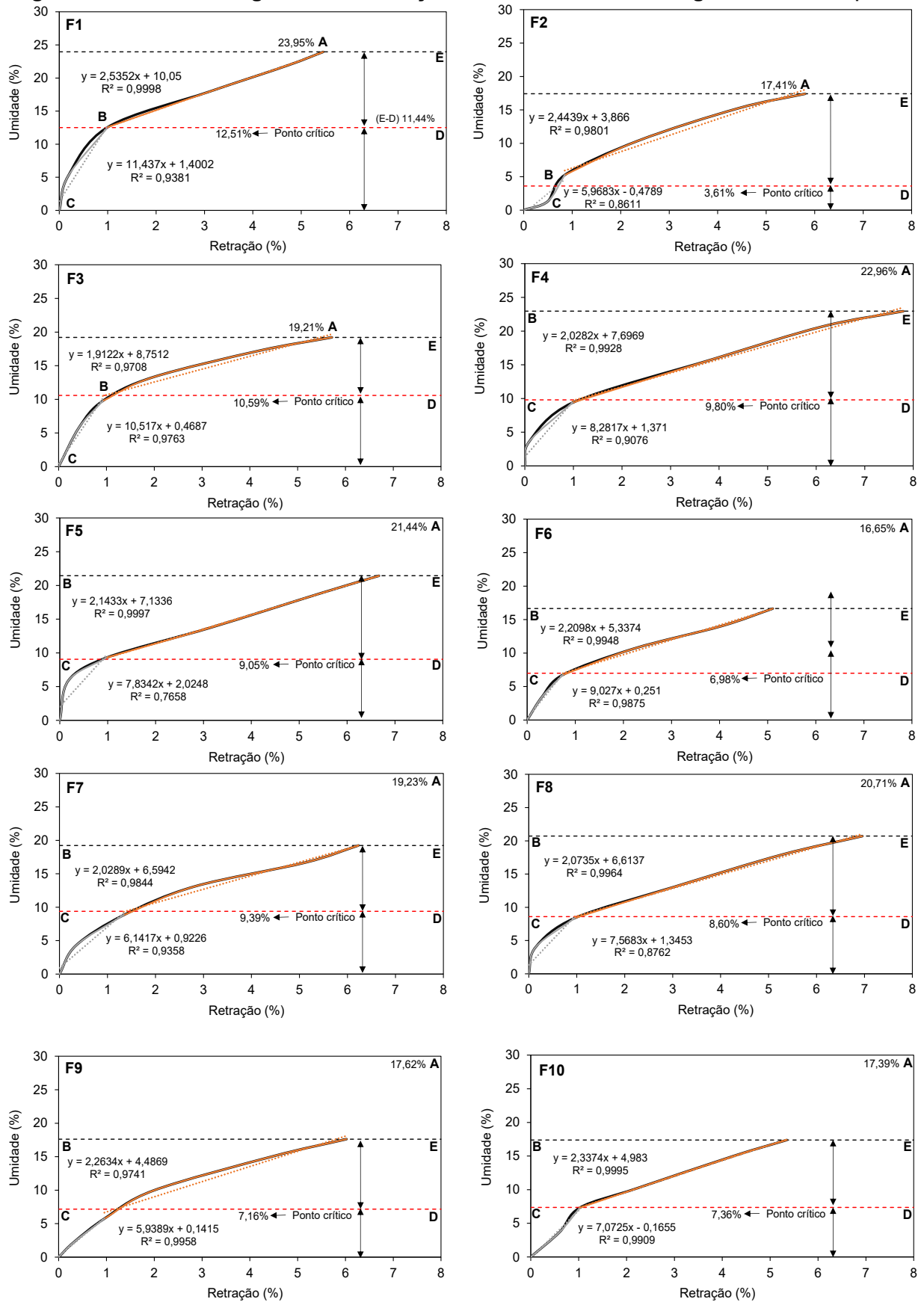
Fonte: Autor (2025).

6.3.1 Curva de Bigot

A análise da curva de Bigot (Figura 31) revelou padrões distintos entre as formulações avaliadas, permitindo agrupá-las com base em suas características de retração e sensibilidade ao processo de secagem. A curva de Bigot é uma ferramenta clássica na caracterização do comportamento de secagem de materiais cerâmicos, pois relaciona a variação dimensional com o teor de umidade ao longo do tempo. Essa análise permite identificar regiões críticas, como a zona de retração máxima e os pontos de transição entre retração plástica e higroscópica. Além disso, a inclinação da curva está diretamente relacionada à sensibilidade do material à velocidade de secagem. Formulações com maior inclinação tendem a ser mais sensíveis à secagem rápida, exigindo controle rigoroso de parâmetros como temperatura, umidade relativa e ventilação.

As formulações F2 e F6 se destacaram pela menor umidade (16,65 e 17,41 %, respectivamente) e pontos críticos reduzidos (3,61 e 6,98 %), sugerindo menor risco de fissura e maior eficiência na secagem. As formulações F3, F5, F7, F8, F9 e F10 apresentaram retração entre 5,35 e 6,96 %, com umidade variando de 17,39 a 21,44 % e pontos críticos entre 7,16 e 9,39 %, caracterizando-se por uma contração significativa, mas ainda dentro de um comportamento estável.

Figura 31: Curva de Bigot das formulações estudadas, sob secagem de ciclo rápido.

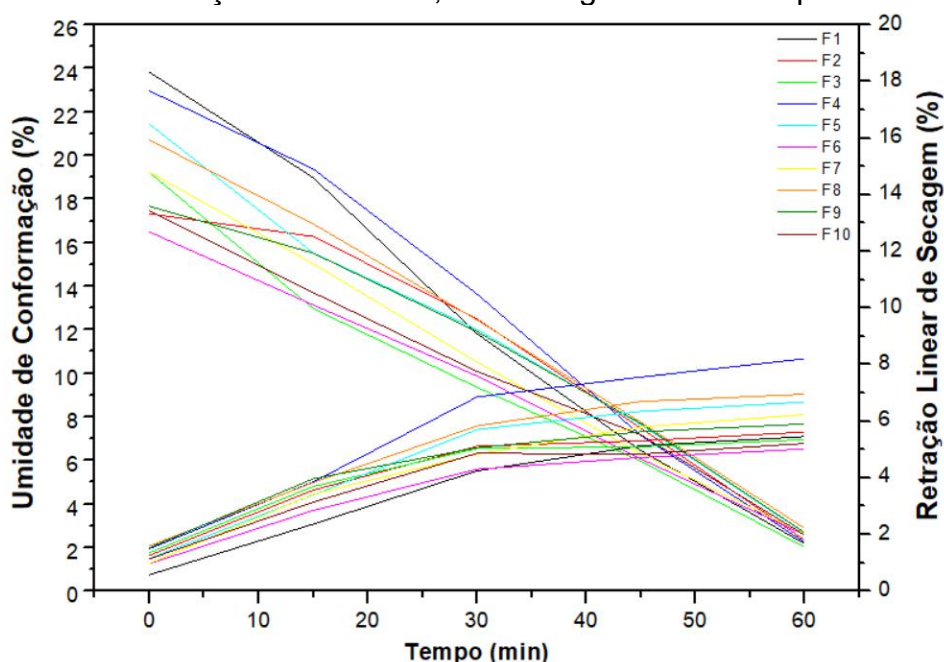


Fonte: Autor (2025).

As formulações F2 e F6 se destacaram pela menor umidade (16,65 e 17,41 %, respectivamente) e pontos críticos reduzidos (3,61 e 6,98 %), sugerindo menor risco de fissura e maior eficiência na secagem. As formulações F3, F5, F7, F8, F9 e F10 apresentaram retração entre 5,35 e 6,96 %, com umidade variando de 17,39 a 21,44 % e pontos críticos entre 7,16 e 9,39 %, caracterizando-se por uma contração significativa, mas ainda dentro de um comportamento estável. Já as formulações F1 e F4 apresentaram as maiores retrações totais (5,45 e 7,79 %, respectivamente) e umidade elevada (23,95 e 22,96 %), com pontos críticos de 12,51 e 9,80 %, indicando maior sensibilidade à secagem. Esses resultados demonstram que F2 e F6 possuem menor sensibilidade à secagem rápida, enquanto F1 e F4 exigem maior atenção devido ao alto potencial de deformação.

Com base no comportamento de perda de umidade e retração térmica linear durante o ciclo rápido de secagem, foi possível avaliar a adequação das formulações conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32: Perda de umidade e retração térmica linear em função do tempo para as formulações estudadas, sob secagem de ciclo rápido



Fonte: Autor (2025).

A formulação F1 apresentou rápida liberação de água, com redução de umidade de 23,82 para 2,17 % em 60 min e retração linear máxima de 5,45 %, indicando maior impacto dimensional nas etapas finais de secagem. A F2, com

umidade inicial de 17,32 %, exibiu retração máxima de 5,61 %, demonstrando um perfil de secagem mais estável e proporcional à perda de umidade. A F3, por sua vez, apresentou retração final de 5,35 %, com redução de umidade de 19,21 para 2,01 %, confirmando boa compatibilidade entre secagem e estabilidade dimensional.

Já a amostra F4 destacou-se pelos maiores valores de retração linear (8,2 %) e pela significativa perda de umidade, de 22,96 para 2,24 %, o que reflete uma massa com elevada plasticidade e elevada capacidade de retenção de água. Esse comportamento, embora favorável à conformação, pode aumentar o risco de fissuração durante a secagem, especialmente em ciclos rápidos, devido à contração acentuada e às tensões internas geradas pela rápida perda de água livre e interlamelar.

A F5 apresentou um comportamento intermediário, com retração final de 6,67 % e perda de umidade de 21,44 para 2,66 %. Esses valores indicam uma plasticidade moderada, que favorece boa trabalhabilidade sem comprometer a integridade dimensional da peça durante a secagem. Esse equilíbrio entre retração e perda de umidade torna a F5 compatível com ciclos de secagem controlados, com menor propensão à geração de trincas ou deformações.

A F6, por sua vez, evidenciou retração máxima de 5,01 % e menor plasticidade inicial (16,48 %), o que indica um comportamento mais rígido da massa. Essa menor plasticidade contribui para uma secagem mais uniforme e estável, reduzindo a ocorrência de falhas estruturais. O mesmo efeito foi observado nas amostras F7, F8 e F9, cujas retrações finais variaram entre 5,9 e 6,95 %, valores considerados adequados para processos com ciclos rápidos de secagem, nos quais a estabilidade dimensional e o baixo grau de deformação são essenciais para garantir a qualidade do produto.

Por fim, a F10 apresentou retração de 5,21 %, associada à perda de umidade de 17,46 para 2,57 %, indicando um comportamento favorável em termos de estabilidade volumétrica e menor propensão a defeitos como empenamentos e trincas. Essa combinação de baixa retração e redução moderada de umidade sugere boa compatibilidade com processos industriais otimizados, nos quais há necessidade de equilíbrio entre eficiência produtiva e desempenho mecânico.

Figura 33: Fotografia das 10 formulações após o processo de secagem rápida em ciclo de 60 min



Fonte: Autor (2025).

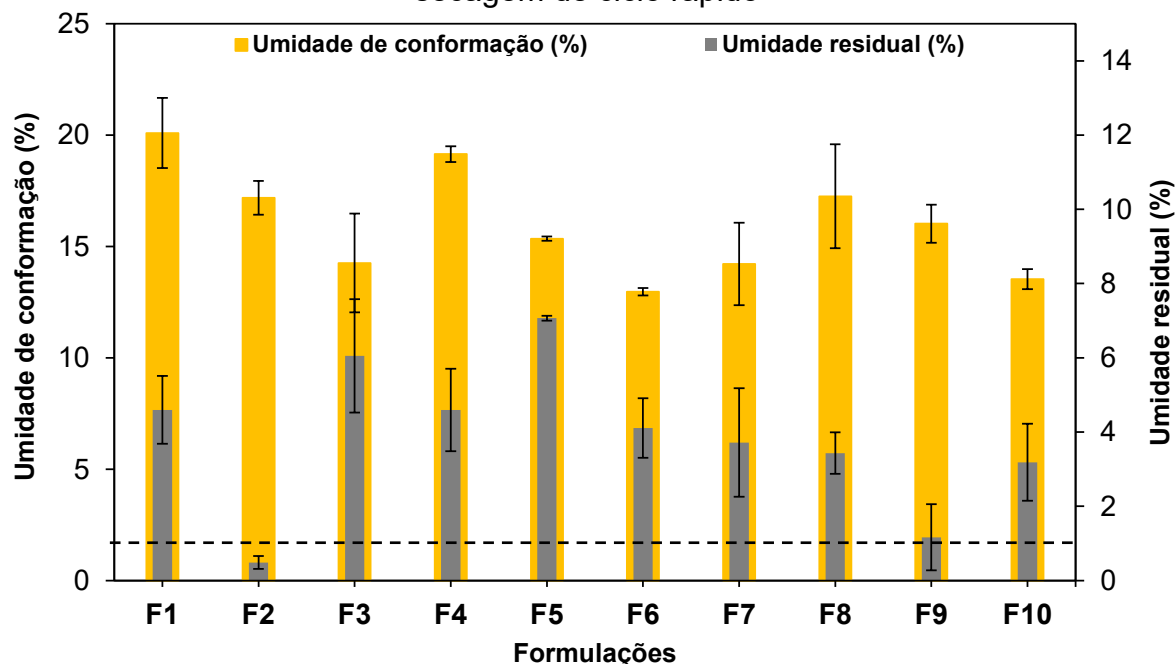
6.3.2 Umidade Residual de Secagem Rápida.

A umidade residual Figura 34 após a secagem rápida é um parâmetro crítico no processo de produção, pois influencia diretamente a qualidade das peças conformadas e sua integridade durante as etapas subsequentes, como a queima. Durante a secagem, a água presente nas argilas é eliminada, reduzindo a plasticidade do material e promovendo a estabilização dimensional das peças. Contudo, uma secagem inadequada pode resultar em tensões internas, causando defeitos como fissuras ou deformações (Avelino, 2018).

No presente estudo é importante mencionar que as umidades de conformação não foram padronizadas entre as formulações, pois optou-se por preservar as condições originais de coleta das argilas. Essa escolha buscou refletir de forma mais fiel o comportamento natural das matérias-primas, assegurando uma avaliação realista de sua viabilidade.

O controle da umidade residual é particularmente desafiador em processos de secagem rápida, onde o tempo limitado exige um equilíbrio entre a remoção eficiente de água e a preservação da integridade das peças. Manter um nível adequado de umidade residual é essencial para evitar problemas como retração excessiva, fragilidade mecânica e defeitos superficiais (Facincani, 1993).

Figura 34: Umidade de conformação e residual das formulações após o processo de secagem de ciclo rápido



Fonte: Autor (2025).

A relação entre a umidade de conformação e a umidade residual é um fator determinante para a eficiência do processo de secagem e a qualidade final das peças cerâmicas. As formulações F2 e F9 apresentaram as menores umidades residuais (0,495 e 1,16 %, respectivamente), indicando maior eficiência na remoção da água durante a secagem. Esse comportamento sugere menor risco de defeitos associados à retenção de umidade. Já as formulações F3 e F5, com umidades residuais de 6,05 e 7,07 %, respectivamente, indicam uma maior retenção de água, o que pode demandar ajustes no tempo e nas condições do ciclo de secagem para evitar tensões internas e fissuração.

Vale salientar que estas formulações iniciaram com umidades de conformação menor que a F9 e a F2, ou seja, a água é um fator primordial no quesito de secagem, porém mesmo com maior umidade a F9 e F2 demonstraram ter maior facilidade de remoção de água. As formulações F1 e F4 apresentaram comportamento similar, com umidade de conformação elevada (20,09 e 19,15 %) e umidade residual de 4,60 %. As demais formulações (F6, F7, F8 e F10) apresentaram valores intermediários de umidade residual, variando entre 3,19 e 4,11 %, indicando um equilíbrio entre a umidade inicial e a remoção de água durante a secagem. A linha tracejada no valor de 2 % de umidade se trata da umidade residual

adotada normalmente como referência no processo produtivo (este valor pode ser ajustado dependendo do tipo de sistema de queima) e é possível perceber que a F2 e a F9 foram as únicas que alcançaram este valor. Esses resultados demonstram que formulações com menor umidade residual, como F2 e F9, apresentam maior potencial para ciclos de secagem mais rápidos e eficientes, enquanto formulações com maior retenção de água, como F3 e F5, podem exigir um controle mais rigoroso para minimizar defeitos.

6.3.3 Retração linear de secagem rápida

A retração linear de secagem rápida reflete as alterações dimensionais das peças durante a perda de umidade em ciclos de secagem acelerada. Essa etapa é crítica, pois retrações excessivas ou desuniformes podem gerar tensões internas, levando à formação de defeitos como fissuras e trincas (Oliveira, 2011).

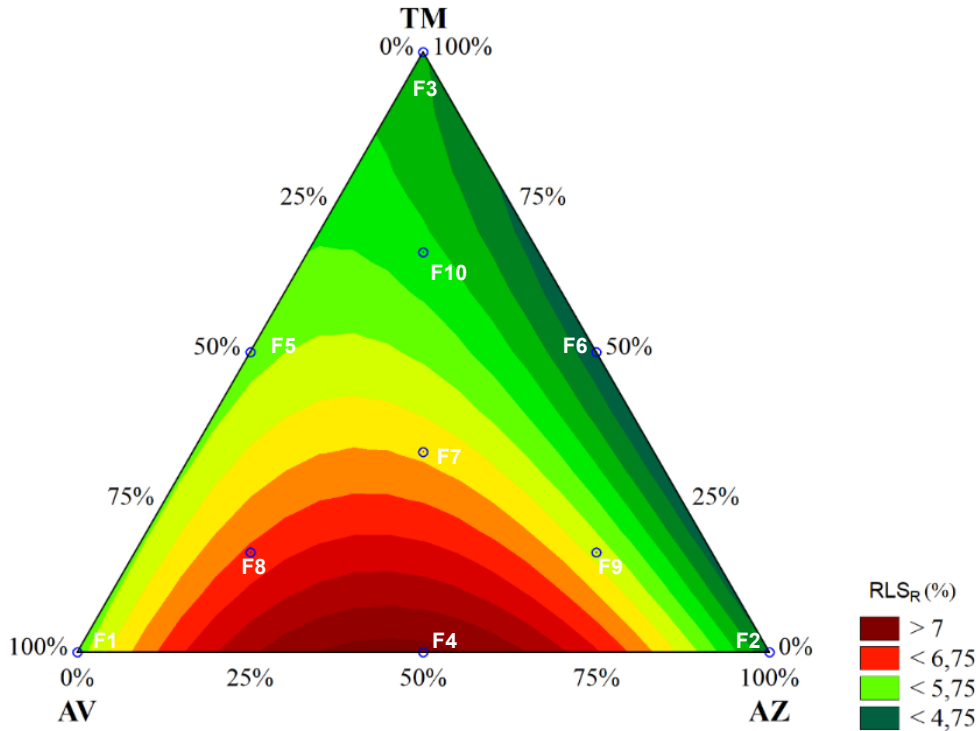
Os valores de retração linear obtidos para as formulações foram representados na Figura 35 em um gráfico de superfície de resposta, permitindo a visualização das interações sobre a retração linear de secagem.

Observou-se que as formulações F4, F5, F8 e F9 apresentaram os maiores valores de retração linear, com destaque para a formulação F4 (7,70 %), resultado que pode ser atribuído à maior proporção da argila AV em sua composição, caracterizada por elevada plasticidade e maior capacidade de absorção de água. Por outro lado, as formulações F2 e F10 exibiram os menores valores de retração, sendo o menor registrado na formulação F10 (4,71 %).

Este desempenho inferior em retração linear sugere uma combinação de menor plasticidade e distribuição granulométrica mais favorável, fatores que contribuem para um menor encolhimento durante a secagem e, conseqüentemente, para uma maior estabilidade dimensional das peças.

Para validar estatisticamente Tabela 11 os resultados, foi utilizada a análise de variância (ANOVA) baseada em um modelo quadrático. O valor de p obtido (0,006) indicou uma significância estatística expressiva ($p < 0,05$), confirmando a adequação do modelo para explicar as variações observadas na retração linear de secagem das formulações.

Figura 35: Superfície de resposta da retração linear de secagem (RLSR) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas



Fonte: Autor (2025).

Tabela 11: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a retração linear de secagem rápida (RLSR) avaliadas por delineamento de misturas

Modelo	F	p	R ²
Linear	2,842	0,075	0,112
Quadrática	0,914	0,006	0,395
Especial cúbica	0,910	0,307	0,398
Cúbica	0,835	0,155	0,447

Em que: F: F-valor; p: p-valor; R²: ajuste.

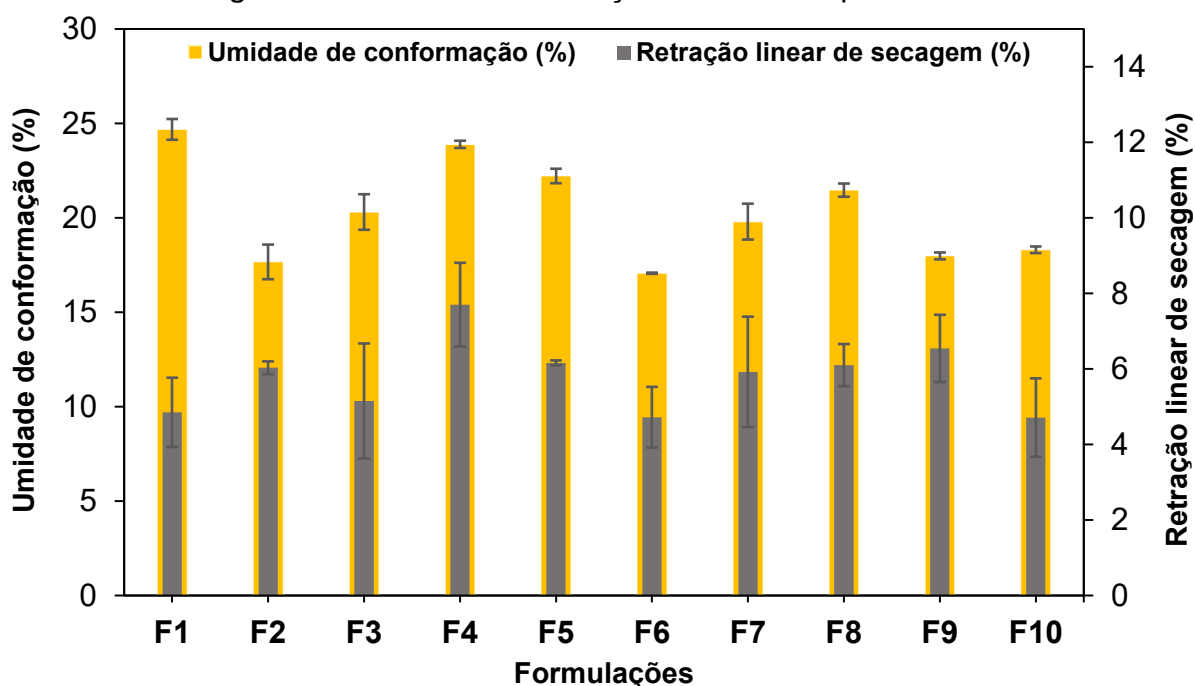
Fonte: Autor (2025).

A relação entre a umidade de conformação e a retração linear de secagem é demonstrada na Figura 36 que em maneira geral, espera-se que formulações com maior umidade de conformação apresentem retração linear de secagem mais acentuada, devido à maior quantidade de água eliminada durante o processo de secagem (Avelino, 2018).

Os resultados obtidos demonstram uma tendência coerente com essa afirmação que de fato as formulações F1 e F4 destacam-se por apresentar os

maiores teores de umidade, sendo que F4 também apresentou a maior retração linear de secagem, confirmando a influência do teor de umidade na variação dimensional das peças. As formulações F2 e F9 apresentaram valores relativamente baixos de umidade, mas ainda assim com retração considerável, o que pode estar associado à composição mineralógica das argilas, especialmente ao teor de argilominerais expansivos. Já as formulações F6 e F10 exibiram os menores valores de retração linear de secagem, indicando um menor grau de reorganização estrutural durante a remoção da umidade, o que pode ser um fator positivo para minimizar defeitos durante a secagem. Embora não exista um padrão estabelecido para a retração linear, é amplamente reconhecido que valores reduzidos favorecem uma secagem mais eficiente, minimizando significativamente o risco de defeitos, como trincas e variações dimensionais.

Figura 36: Análise comparativa da umidade de conformação e da retração linear de secagem em diferentes formulações em ciclo rápido de 60 min



Fonte: Autor (2025).

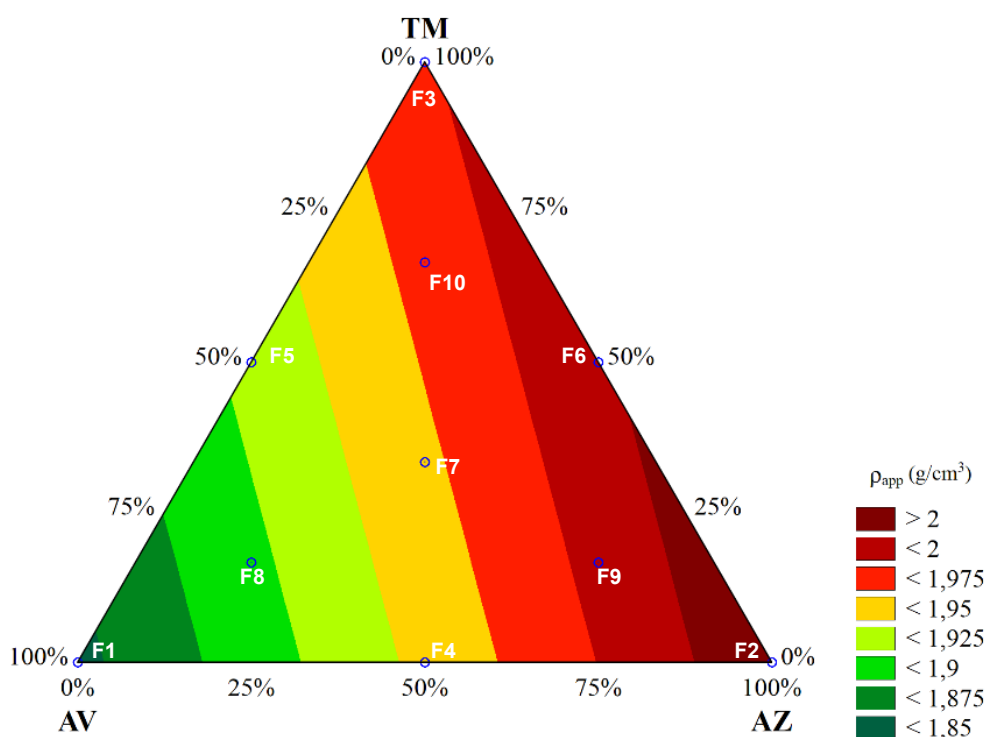
6.3.4 Densidade aparente

A densidade aparente, reflete a relação entre a massa seca e o volume total da amostra, incluindo os poros abertos, é influenciada pela composição

mineralógica, granulometria das partículas e condições de processamento. Em geral, formulações que promovem uma maior compactação apresentam maior densidade aparente, o que contribui para a redução da porosidade e melhora das propriedades mecânicas. A densidade relativa, por sua vez, está relacionada à massa seca e ao volume ocupado apenas pelas partículas sólidas, desconsiderando os poros. Esse parâmetro é determinado principalmente pela composição química e mineralógica das argilas utilizadas. Argilas com maior proporção de minerais densos, como quartzo, feldspato e óxidos de ferro, tendem a elevar a densidade relativa das formulações, indicando matérias-primas de maior qualidade para aplicações cerâmicas (Yang *et al.*, 2003).

A análise dos resultados apresentado na Figura 37 revela que as formulações que utilizaram a argila AZ (F2) e suas combinações (F6 e F10) apresentaram os maiores valores de densidade aparente.

Figura 37: Superfície de resposta da densidade aparente (ρ_{app}) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas



Fonte: Autor (2025).

Por outro lado, a formulação F1, composta exclusivamente pela argila AV, apresentou o menor valor de densidade aparente (1,82 g/cm³). Essa variação sugere

que as características mineralógicas e granulométricas específicas da argila AZ proporcionam maior compactação das partículas, resultando em um aumento da densidade das formulações. Em contraste, a argila AV parece contribuir para misturas menos densas.

Para validar os resultados na Tabela 12, foi utilizado o método de análise de variância (ANOVA) baseada em um modelo linear, que permite avaliar se as médias de diferentes grupos são estatisticamente diferentes. O teste F realizado apresentou um valor de 6,804, enquanto o p-valor foi de 0,004, indicando significância estatística ($p < 0,05$), ou seja, há evidências para rejeitar a hipótese nula de que todas as médias são iguais. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,335, sugerindo que aproximadamente 33 % da variação observada nos dados é explicada pelo modelo linear ajustado. Esse valor de R^2 indica um efeito moderado, sugerindo que outros fatores não incluídos no modelo podem estar contribuindo para a variabilidade dos dados.

Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a densidade aparente (ρ_{app}) avaliadas por delineamento de misturas

Modelo	F	p	R^2
Linear	6,804	0,004	0,335
Quadrática	1,619	0,211	0,447
Especial cúbica	0,171	0,682	0,451
cúbico	0,374	0,692	0,470

Em que: F: F-valor; p: p-valor; R^2 : ajuste.

Fonte: Autor (2025).

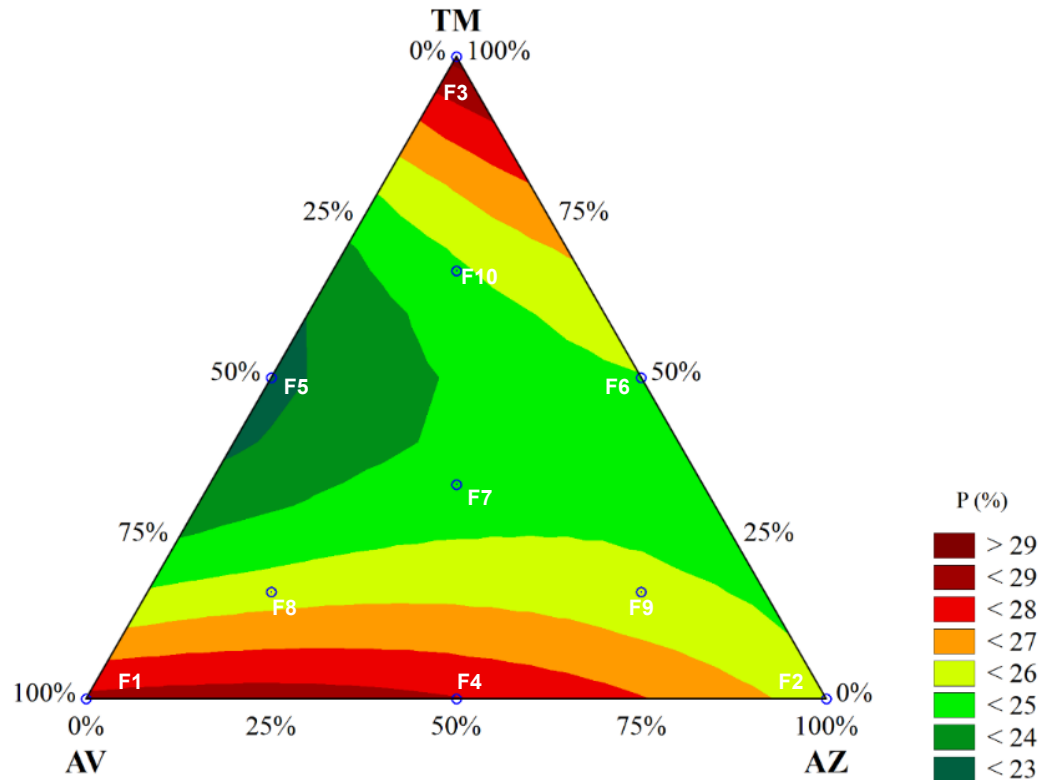
6.3.5 Porosidade aparente

A presença de porosidade é uma característica comum em materiais cerâmicos, manifestando-se em diferentes tamanhos, formatos e distribuições. Durante a secagem, a remoção da umidade livre e da água adsorvida pode levar à formação de tensões internas, resultando no surgimento de microfissuras e aumento da porosidade se o processo não for devidamente controlado (Andrade *et al.*, 2011). Assim, os poros costumam comprometer significativamente a resistência do material cerâmico, pois, além de diminuir a área de suporte da carga aplicada, também

funcionam como pontos de concentração de tensão e podem causar variações dimensionais. (Facincani, 1993).

Os valores de porosidade aparente, representados na Figura 38, mostram que a formulação F1 e F3, composta exclusivamente pela argila AV e argila TM respectivamente, apresentaram os maiores valores de porosidade, indicando menor compactação da matriz cerâmica e maior volume de espaços vazios na estrutura podendo observar os valores obtidos na densidade aparente confirmando menores valores para F1 e F4 Tabela 13.

Figura 38: Superfície de resposta da porosidade aparente (P) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas



Fonte: Autor (2024).

Tabela 13: Valores de densidade aparente (g/cm³) das formulações desenvolvidas a partir de mistura das argilas AV, AZ e TM

Formulações	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Densidade aparente (g/cm³)	1,82	2,01	1,91	1,92	1,94	2,03	1,96	1,91	1,97	2,00

Fonte: Autor (2024).

Em contrapartida, as formulações circundantes a formulações F5 e F6, apresentaram os menores valores de porosidade, sugerindo que esta argila favorece a maior densificação das partículas e consequentemente, menor presença de poros, o que pode estar relacionado ao preenchimento dos espaços entre as partículas, podendo ser evidenciada essa afirmativa na Tabela 13 com os valores da densidade aparente. De modo geral, formulações contendo a argila AZ (como F2, F6 e F10) apresentaram valores de porosidade relativamente baixos, reforçando sua contribuição positiva para a redução de poros e melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade das peças cerâmicas.

A análise estatística Tabela 14 realizada por meio de análise de variância (ANOVA) utilizando um modelo quadrático, resultou em um valor de F de 2,197 e p de 0,114. Apesar de o modelo não apresentar significância estatística ($p > 0,05$), o coeficiente de determinação (R^2) de 0,219 indica que 21,9 % da variação observada nos valores de porosidade pode ser explicada pelo modelo.

Tabela 14: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a porosidade (P) avaliadas por delineamento de misturas

Modelo	F	p	R ²
Linear	0,078	0,924	0,005
Quadrática	2,196	0,114	0,219
Especial cúbica	0,375	0,545	0,232
Cúbica	0,474	0,628	0,265

Em que: F: F-valor; p: p-valor; R²: ajuste.

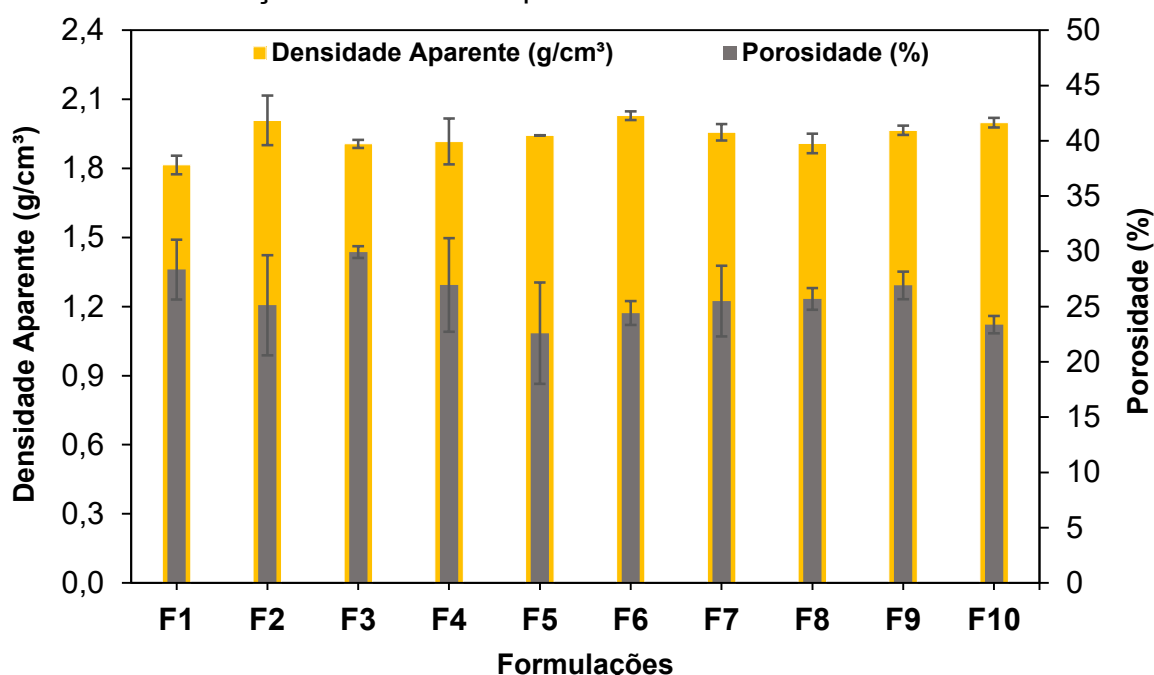
Fonte: Autor (2024).

Embora os resultados estatísticos apontem para uma influência limitada das variáveis analisadas, os dados experimentais fornecem subsídios importantes para a compreensão do comportamento das misturas. A relação entre densidade aparente e porosidade aparente dos materiais após secagem rápida segue um comportamento esperado, onde maior densidade tendem a apresentar menor porosidade, refletindo maior grau de compactação conforme Figura 39.

As formulações F2, F6 e F10 apresentaram as maiores densidades aparentes e, consequentemente, valores reduzidos de porosidade, indicando uma melhor compactação das partículas e menor volume de vazios internos. Esse

comportamento favorece a uma maior resistência mecânica, que é uma característica desejável na cerâmica vermelha, pois o material após secagem ainda sofre diversas movimentações até o processo final de queima. Por outro lado, as amostras F1 e F3 apresentaram os maiores índices de porosidade, confirmando a relação inversa entre densidade aparente e volume de vazios. Esse aumento na porosidade pode comprometer a resistência mecânica do material, tornando-o mais suscetível a fraturas e deformações. No entanto, essa característica também pode representar uma vantagem em processos como a secagem, pois a maior quantidade de poros melhora a permeabilidade e facilita a difusão da umidade, contribuindo para uma evaporação mais eficiente e homogênea.

Figura 39: Avaliação da densidade aparente a seco e porosidade a seco de diferentes formulações: Análise Comparativa das Características Microestruturais



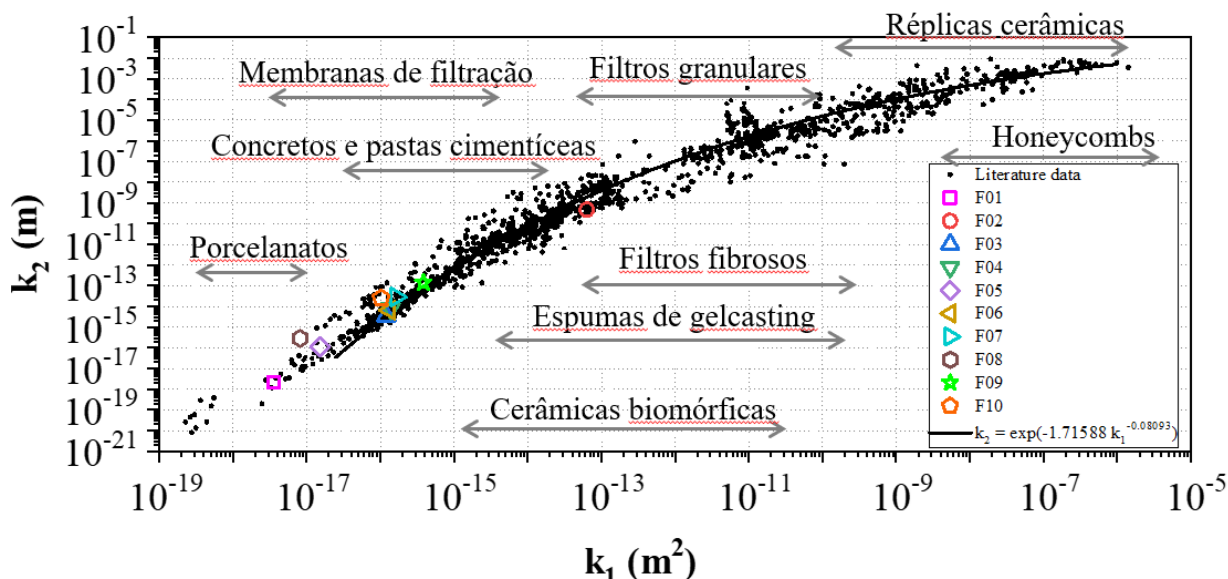
Fonte: Autor (2025).

6.3.6 Permeabilidade

A Figura 40 mostra um mapa de permeabilidade para uma ampla gama de materiais com diferentes níveis de porosidade, desde cerâmicas densas até cerâmicas celulares (Luza *et al.*, 2022; Jaramillo Nieves *et al.*, 2022), bem como a relação entre os coeficientes de permeabilidades k_1 e k_2 das formulações de

cerâmicas vermelhas extrudadas e submetidas ao processo de secagem rápida (F01 a F10). A distribuição geral segue a tendência descrita pela equação ajustada $k_2 = \exp(-1,71588k_1^{-0,8093})$, evidenciando a correlação típica entre os coeficientes.

Figura 40: Mapa de permeabilidade com dados obtidos neste trabalho.



Fonte: Adaptado de Luza *et al.*, (2022).

As amostras analisadas apresentam valores de permeabilidade compatíveis com materiais cerâmicos relatados em literatura, localizando-se em regiões que se aproximam de aplicações como porcelanato, membranas de filtração e filtros fibrosos. Isso demonstra que as formulações processadas por extrusão e submetidas à secagem rápida mantêm uma rede porosa interconectada, mesmo sob condições de eliminação acelerada da umidade.

Entre as formulações avaliadas, destaca-se a F1, que apresentou o menor valor de permeabilidade ($k_1 = 3,57 \times 10^{-18} \text{ m}^2$), posicionando-se em região próxima à dos porcelanatos, caracterizada por microestruturas densas e de baixa conectividade porosa. Em contraste, a formulação F2 apresentou o maior valor de permeabilidade ($k_1 = 6,36 \times 10^{-14} \text{ m}^2$), situando-se nos intervalos característicos de filtros granulares e espumas obtidas por gelcasting. Esse comportamento sugere que a microestrutura da F2 favorece tanto a abertura quanto a interconexão dos poros, o que resulta em maior potencial de transporte de fluidos através da matriz cerâmica.

Tais resultados indicam que a formulação F2 é a mais promissora quando o objetivo é obter elevada permeabilidade em cerâmicas vermelhas submetidas à secagem rápida. Esse comportamento pode ser atribuído à maior proporção de partículas grosseiras observada nessa composição, correspondente a aproximadamente 53% das frações acima de 44 μm , conforme apresentado na Tabela 10, as quais contribuem para a formação de canais porosos mais amplos e interligados, intensificando a permeabilidade global do material.

As demais formulações (F3 a F10) apresentaram valores intermediários de permeabilidade, variando de $k_1 = 1,21 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ (F3) até $k_1 = 1,03 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (F10). Esse intervalo corresponde a microestruturas com porosidade moderada e conectividade parcial comparadas entre si, que podem equilibrar fluxo de fluidos e resistência mecânica.

É relevante ressaltar que a formulação F2 (100% de argila Zulma), além de apresentar-se isoladamente como a mais permeável, também integra diferentes composições geradas pelo delineamento de misturas (Tabela 2). Nesses casos, sua contribuição é determinante para o desempenho das composições, uma vez que a presença dessa argila tende a elevar a permeabilidade do sistema. Tal efeito pode ser observado, por exemplo, nas formulações F4 e F6, que contêm 50% de Argila Zulma, e na formulação F9, com 66% em sua composição, todas apresentando valores de k_1 superiores em comparação com aquelas em que a fração de Argila zulma (F2) foi reduzida ou ausente.

6.3.7 Resistência Mecânica à Compressão a Seco

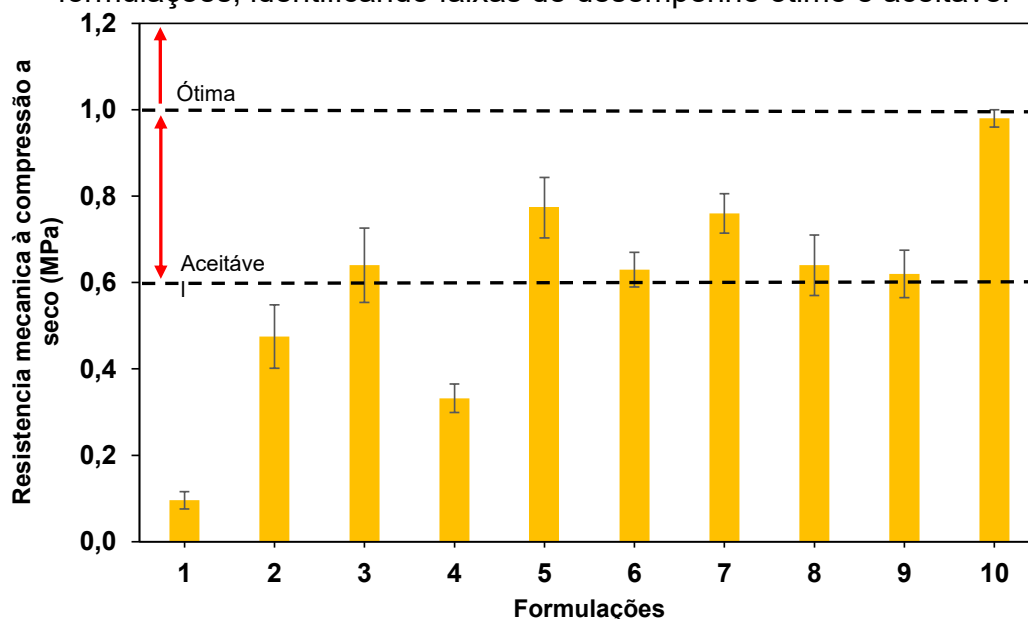
A resistência mecânica à compressão no estado seco, conforme ilustrado na Figura 41, não é regulada por normas específicas. Entretanto, sua avaliação é fundamental para assegurar o adequado manuseio das peças cerâmicas antes da queima, podendo também indicar o potencial de qualidade do produto. De acordo com Oliveira *et al.* (2021), valores superiores a 1,0 MPa são desejáveis para o processo descrito no gráfico como (Ótima) para aplicações mais exigentes, enquanto a faixa entre 0,6 e 1,0 MPa é considerada (aceitável) para usos menos rigorosos.

O desempenho extremamente baixo da F1 (0,10 MPa) pode ser atribuído à sua alta plasticidade e tendência à formação de microfissuras durante a secagem,

devido ao elevado teor de finos e à dificuldade no empacotamento eficiente das partículas. Esta combinação resulta em uma estrutura com alta porosidade aberta, baixa densidade e, conseqüentemente, resistência mecânica insuficiente. Assim, a utilização da F1 como única matéria-prima é inadequada para processos que envolvam secagem rápida ou que exijam elevada resistência no estado seco.

As formulações F5, F7 e F10 alcançaram valores superiores a 0,6 MPa, posicionando-se dentro da faixa aceitável. Essas formulações demonstraram resistência suficiente para suportar o manuseio e a secagem rápida, indicando que, apesar de algumas composições incorporarem frações significativas de argilas menos resistentes, como a F1, a combinação de outros materiais mais coesivos e a adequada distribuição granulométrica permitiram o alcance de uma microestrutura suficientemente densa para a resistência necessária.

Figura 41: Avaliação da resistência mecânica à compressão a seco de diferentes formulações, identificando faixas de desempenho ótimo e aceitável



Fonte: Autor (2025).

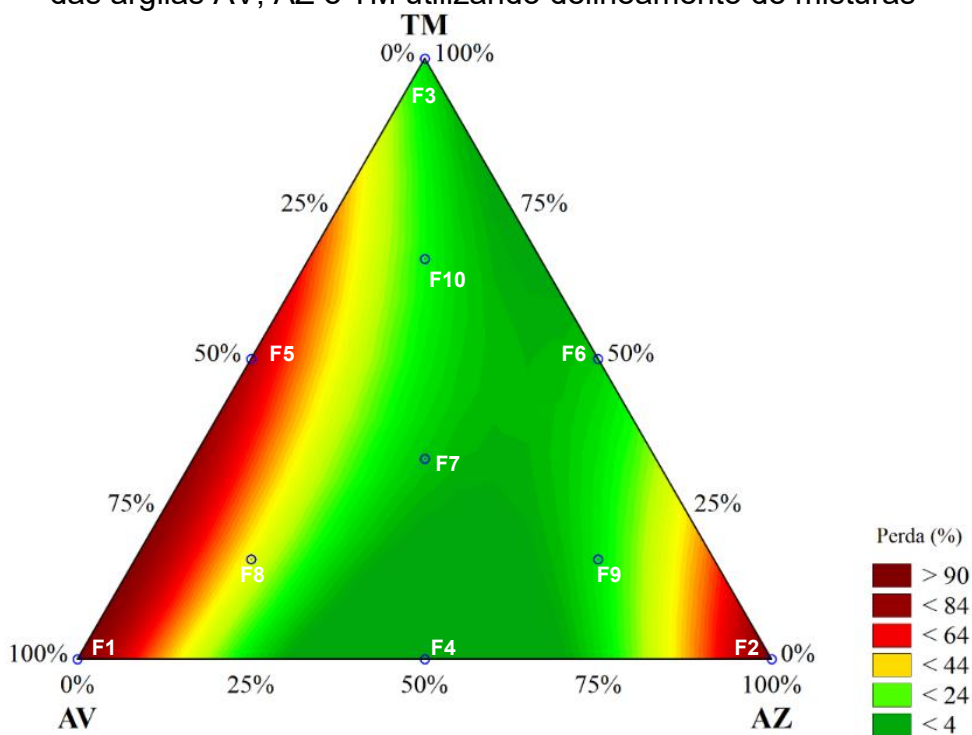
Revelou também que a formulação F10 obteve o melhor desempenho, atingindo resistência próxima ao limite ótimo (≥ 1 MPa), evidenciando uma boa coesão das partículas e elevada compactação do material. Tal desempenho está diretamente relacionado à baixa porosidade e à densidade aparente elevada, características que também explicam seus bons resultados de permeabilidade e de absorção de água reduzida.

Particularmente, a formulação F8 merece destaque, pois, embora contenha 66 % da argila plástica F1 que isoladamente apresentou o pior desempenho (0,10 MPa) e foi altamente resistente a fissuras, obteve resistência mecânica satisfatória no estado seco. Este resultado sugere que a adição de componentes de menor plasticidade e com granulometria adequada compensou o excesso de plasticidade e a tendência à formação de porosidade excessiva da F1. Ou seja, o ajuste da composição favoreceu um melhor empacotamento das partículas e reduziu o volume de poros críticos, melhorando a densidade aparente da peça e, conseqüentemente, sua resistência.

6.3.8 Perdas de secagem

As perdas observadas durante as etapas de caracterização das formulações, fornecem informações sobre a viabilidade técnica e a qualidade das peças Figura 42. Essas perdas podem ser associadas a defeitos como trincas, fissuras, empenamentos, que ocorrem principalmente durante as etapas de secagem.

Figura 42: Superfície de resposta das perdas (Δ) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas



Fonte: Autor (2025).

As perdas de processo são indicadores críticos no setor cerâmico, pois impactam diretamente a eficiência produtiva e a viabilidade econômica das formulações e podem ter diversas origens, sendo intensificadas durante a etapa de secagem, com destaque para as condições do processo de conformação.

No processo de conformação por extrusão, a velocidade de extrusão foi controlada, porém a regulação da matriz (boquilha) não, uma vez que o equipamento utilizado era de escala laboratorial, impossibilitando ajustes nesse parâmetro. Assim, todas as amostras foram conformadas sob as mesmas condições operacionais. As perdas observadas na etapa de secagem podem estar relacionadas ao processo de extrusão, conforme indicado por Oliveira (2011), mas tornaram-se mais evidentes durante a secagem forçada em ciclo rápido. Além disso, verificou-se que a incidência de trincas foi reduzida com a menor incorporação de argila AV (F1), indicando que formulações com granulometria fina e baixo teor de resíduo apresentaram maior susceptibilidade à formação de trincas sob as condições do ciclo adotado.

Consequentemente a F4 se enquadra nesse perfil de maiores perdas por possuir em sua composição quantidade considerável de argila AV. Em contraste as formulações como F5 F7 e F10, que combinaram proporções mais equilibradas de argilas AZ e TM, registraram as menores taxas de perda, evidenciando maior estabilidade dimensional e menor propensão a defeitos durante o processo produtivo.

A análise de variância Tabela 15 revelou que o modelo quadrático aplicado explicou adequadamente a variação dos dados, com um valor de F de 6,592, um valor de p de 0,050 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,852.

Tabela 15: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados as perdas (Δ) avaliadas por delineamento de misturas

Modelo	F	p	R^2
Linear	0,533	0,608	0,132
Quadrática	6,529	0,050	0,852
Especial cúbica	2,677	0,200	0,922
Cúbica	0,383	0,752	0,955

Em que: F: F-valor; p: p-valor; R^2 : ajuste.

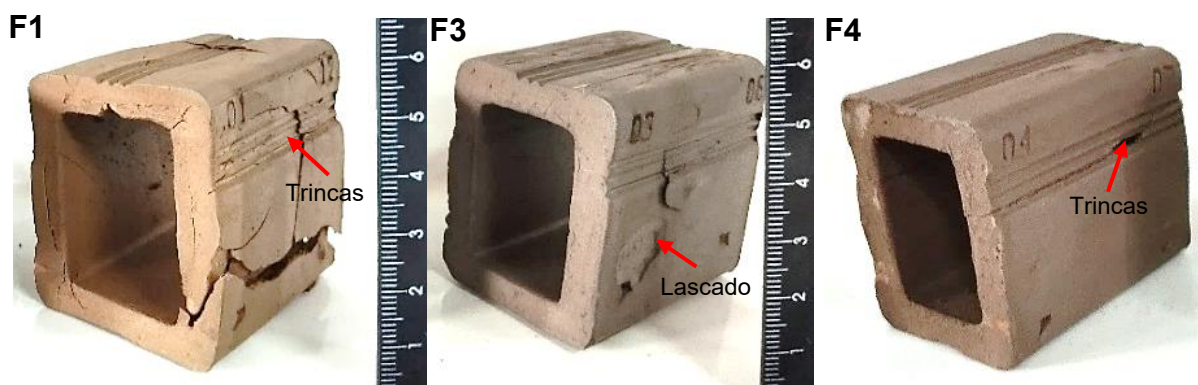
Fonte: Autor (2025).

6.3.9 Análise visual de defeitos a seco

A análise visual de defeitos Figura 43 das peças produzidas no processo de secagem rápida revelou que algumas formulações (F1 e F4), foram identificadas trincas cuja origem pode estar associada a diferentes fatores. Segundo Oliveira (2011), essas trincas podem resultar de problemas mecânicos relacionados à extrusão e à regulação da matriz (boquilha), muitas vezes tornando-se perceptíveis apenas durante a secagem. Essa etapa, especialmente quando realizada de forma forçada, também pode contribuir para a formação de trincas. A ausência de uma preparação adequada da massa cerâmica, aliada a uma regulação inadequada dos secadores, pode intensificar essas falhas, comprometendo a qualidade do processo e aumentando as perdas na produção. A ocorrência de trincas também pode estar associada a uma retração excessiva e desigual durante a perda de umidade, o que gera tensões internas e compromete a integridade estrutural das peças.

Já a formulação F3 apresentou lascados em sua superfície, esse fenômeno ocorre porque, ao submeter um material com umidade residual a um ambiente de rápida elevação de temperatura, a água presente em sua estrutura porosa inicialmente aquece, reduzindo sua viscosidade e facilitando seu deslocamento para a superfície por capilaridade (Scherer, 1990).

Figura 43: Fotografias das formulações F1, F3 e F4 após ciclos rápidos que apresentaram defeitos visuais de secagem



Fonte: Autor, (2025).

No entanto, quando a temperatura atinge níveis excessivamente elevados, a pressão de vapor da água se intensifica a ponto de promover a mudança de fase do

estado líquido para o gasoso, resultando em um aumento significativo de volume. Esse aumento dificulta a passagem da água pelos capilares, gerando elevadas forças internas de pressão que podem levar à ruptura das paredes do material, causando fissuras ou até mesmo escamações localizadas (Facincani, 1993).

Por outro lado, as formulações F9 e F10 não apresentaram nenhum tipo de defeito visível após a secagem e queima, evidenciando um desempenho superior em relação à resistência à formação de trincas. Dentre elas, a formulação F10 destacou-se como a mais adequada para a continuidade do estudo. A capacidade da F10 de manter sua integridade estrutural mesmo sob condições de conformação com umidade elevada reforça a conclusão de que a umidade inicial de extrusão, embora importante, não é o único fator determinante para a formação de trincas.

Esse comportamento superior da F10 pode ser explicado pela combinação de vários fatores, a formulação apresentou excelente resistência mecânica no estado seco, indicando uma estrutura coesa e uniformizada. Além disso, a F10 apresentou uma retração linear de secagem 4,31 % a menor entre todas as formulações que minimizou tensões internas e evitou a geração de defeitos. A permeabilidade reduzida da F10, associada à uma matriz com porosidade suficiente para permitir a evaporação de água durante a secagem, mas sem formar caminhos excessivos para o bloqueio do líquido no interior do material o que favorece o escoamento facilitando a secagem.

Outro fator crucial para o bom desempenho da F10 é sua composição mineralógica e granulométrica. A formulação contém maior fração de minerais fundentes como plagioclásio proveniente da argila TM que corresponde mais de 60% a composição da F10) que facilita a formação de fases líquidas durante a queima, promovendo maior densificação.

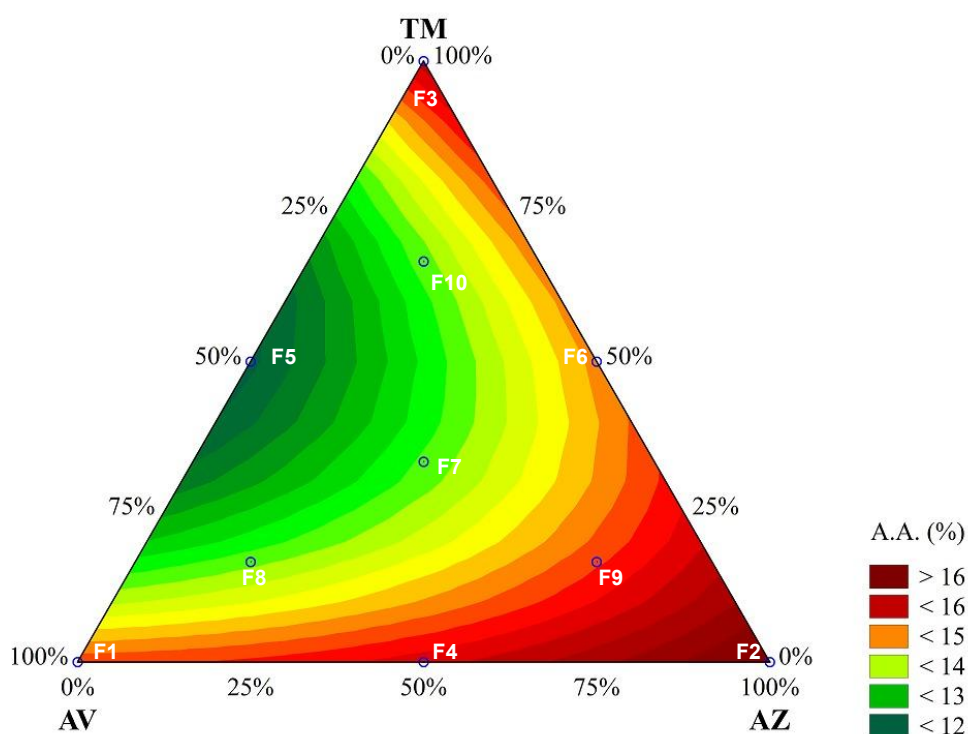
6.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CPS QUEIMADOS (OE 4)

Nesta etapa, são apresentados os resultados relacionados aos parâmetros de controle para produtos acabados de cerâmica vermelha, conforme estabelecido por Dondi (2006). Esses parâmetros incluem a retração linear de queima, a resistência mecânica à compressão e a absorção de água, características fundamentais para avaliar a qualidade e o desempenho do material após sua queima.

6.4.1 Absorção de Água

A absorção de água é um parâmetro essencial na avaliação da qualidade dos produtos cerâmicos, especialmente na cerâmica vermelha, por estar diretamente relacionada à porosidade das peças e à resistência contra umidade e intempéries que serão discutidos na Figura 44.

Figura 44: Superfície de resposta para absorção de água (AA) em função da composição ternária das argilas AV, AZ e TM utilizando delineamento de misturas



Fonte: Autor, (2025).

Conforme a NBR 15270-3 (ABNT, 2005), que regula os blocos cerâmicos, há limites específicos de absorção de água entre 8% e 22% para assegurar a qualidade e durabilidade das peças. Os valores de absorção de água variaram de 12,07 % (F5) a 16,83 % (F2), destacando diferenças significativas entre as formulações. Considerando os resultados individuais, todas as formulações avaliadas atenderam ao intervalo normativo: F1 (15,33%), F2 (16,83%), F3 (15,97%), F4 (15,66%), F5 (12,07%), F6 (14,79%), F7 (14,06%), F8 (13,08%), F9 (15,25%) e F10 (13,31%). Essa conformidade demonstra que, apesar das variações observadas, possuem absorção adequada, sendo os valores influenciados principalmente pela composição

mineralógica das argilas, pelo grau de vitrificação alcançado durante a queima e pela distribuição granulométrica das formulações.

A argila AV, por exemplo, possui uma composição mineralógica rica em caulinita e esmectita, minerais hidratados que apresentam elevada capacidade de retenção de água. Durante a queima, a desidroxilação desses minerais ocorre em faixas de temperatura relativamente baixas (300–600 °C), promovendo a formação de poros devido à liberação de água estrutural.

Esse fenômeno pode resultar em uma maior porosidade residual na matriz cerâmica, aumentando a absorção de água. Por outro lado, a argila TM apresenta uma maior proporção de plagioclases e mica, minerais que possuem temperaturas de fusão mais baixas e contribuem para a formação de uma fase líquida durante a sinterização, especialmente acima de 900 °C. A presença dessas fases líquidas favorece a vitrificação da matriz cerâmica, reduzindo a quantidade de poros interconectados e, conseqüentemente, diminuindo a absorção de água em formulações onde essa argila predomina.

A análise de variância (ANOVA) revelou na Tabela 16 que o modelo quadrático utilizado apresentou significância estatística elevada, com valor de F igual a 37,806, $p < 0,001$ e coeficiente de determinação R^2 de 0,877. Esses dados indicam que 87,7 % da variabilidade nos resultados de absorção de água foi explicada pelo modelo, reforçando a consistência dos dados obtidos.

Tabela 16: Análise de variância (ANOVA) dos modelos estatísticos aplicados a absorção de água (AA) avaliadas por delineamento de misturas.

Modelo	F	p	R ²
Linear	5,730	0,008	0,297
Quadrática	37,806	0,000	0,877
Especial cúbica	0,227	0,637	0,878
Cúbica	1,076	0,359	0,889

Em que: F: F-valor; p: p-valor; R²: ajuste.

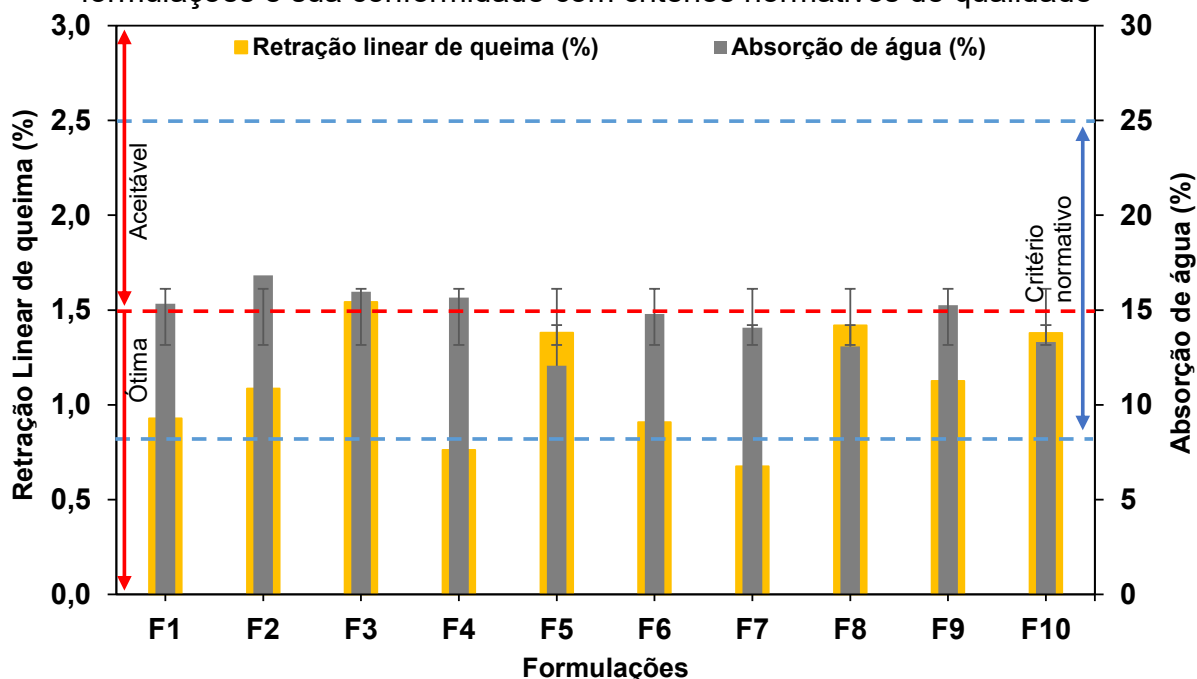
Fonte: Autor, (2025).

Retração Linear de Queima e Absorção de Água

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos para a retração linear de queima e a absorção de água das amostras, as quais foram submetidas a um processo de secagem rápida a 160 °C por 60 min, seguido de queima em forno mufla a 930 °C. A etapa de queima foi realizada com uma taxa de aquecimento controlada de 1,5 °C/min e mantida a um patamar térmico de 120 min.

As formulações cerâmicas para blocos estruturais são consideradas de retração linear de queima ótima quando apresentam valores inferiores a 1,5 %, e aceitável entre 1,5 e 3,0 %, conforme Dondi (2006). Esses limites estão indicados pelas linhas vermelhas tracejadas na Figura 44. Todos os resultados atendem aos critérios ótimos de qualidade, exceto a formulação F3, que se enquadra na faixa aceitável, com 1,54 %.

Figura 45: Avaliação da retração linear de queima e absorção de água em diferentes formulações e sua conformidade com critérios normativos de qualidade



Fonte: Autor (2025).

As formulações F3, F5, F8 e F10 apresentaram os maiores valores de retração, próximos de 1,54, 1,38, 1,42 e 1,38 %, respectivamente, associados ao alto teor de óxidos fundentes (como K_2O), que favorecem a formação de fase líquida na sinterização (Facincani, 1993). A presença de minerais fundentes, como albita e ortoclásio, e menores teores de quartzo também influenciam esse comportamento.

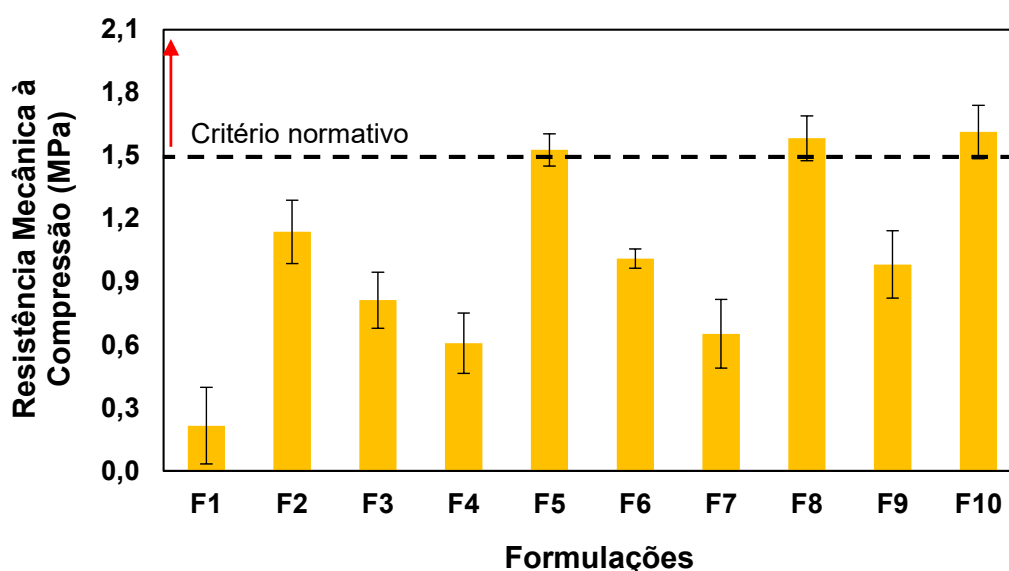
A distribuição granulométrica teve influência significativa, formulações como F2, F4 e F7, mesmo com óxidos fundentes, apresentaram menor retração linear devido à maior presença de partículas grosseiras e resíduo bruto da argila AZ, dificultando o empacotamento e reduzindo a retração.

Quanto à absorção de água (AA), fenômeno regido por forças capilares nos poros abertos da matriz cerâmica, todas as formulações ficaram dentro dos limites da NBR 15270-1/2017 (8 a 25 %), com valores entre 12 e 17 %, conforme ilustrado pelas barras cinzas na Figura 44.

6.4.2 Resistência Mecânica à Compressão Queimado

A resistência mecânica à compressão pós-queima é uma propriedade essencial no setor de cerâmica vermelha Figura 46, pois define a capacidade das peças de suportarem cargas aplicadas em uso, garantindo segurança e durabilidade.

Figura 46: Avaliação da resistência mecânica à compressão após queima (σ_q) das formulações em relação a um critério normativo de desempenho



Fonte: Autor (2025).

A NBR 15270-3 (ABNT, 2005) estabelece um valor mínimo de resistência mecânica à compressão para os blocos cerâmicos, 1,5 MPa, representada pela linha preta tracejada na Figura 45. Os resultados obtidos indicam que a maioria das

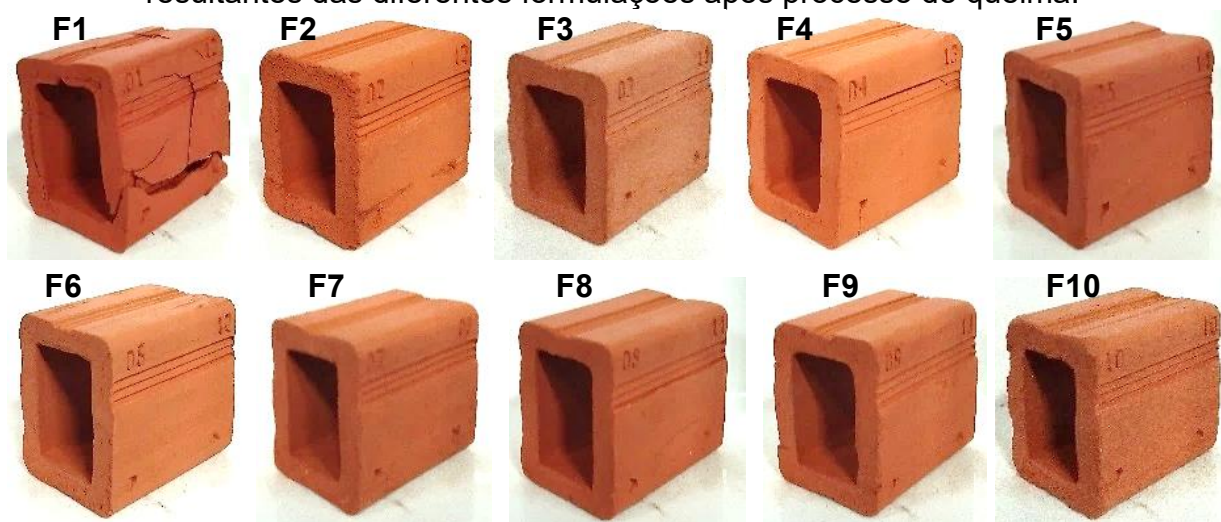
formulações apresentaram resistência abaixo do valor de referência. Embora as formulações F5 (1,53 MPa) e F8 (1,58 MPa) tenham apresentado médias superiores a 1,5 MPa, a análise dos desvios padrão mostra que seus intervalos de variação incluem valores inferiores ao critério normativo, não atendendo integralmente à exigência. Dessa forma, apenas a formulação F10 (1,61 MPa) apresentou resistência efetivamente acima do limite, mesmo considerando a dispersão dos resultados, sendo a única que atendeu plenamente ao requisito normativo.

Já as formulações F2 (1,14 MPa), F6 (1,01 MPa) e F9 (0,98 MPa) obtiveram resistências inferiores ao recomendado, indicando a necessidade de ajustes na composição ou nos parâmetros de queima. A formulação F1 (0,22 MPa), F3 (0,81 MPa), F4 (0,61 MPa) e F7 (0,65 MPa) apresentou o menor valor de resistência o que está associado a problemas oriundos do processo de secagem rápida que comprometeram as amostras na secagem etapa antes a queima.

6.4.3 Cor de Queima

A análise visual das formulações queimadas a 930 °C, conforme ilustrado na Figura 47, evidencia variações que se distribuem entre diversas tonalidades de marrom claro e marrom escuro. Essas diferenças de coloração estão relacionadas às transformações físico-químicas ocorridas durante o processo de queima.

Figura 47: Fotografia da análise comparativa de tonalidade das peças cerâmicas resultantes das diferentes formulações após processo de queima.



Fonte: Autor (2025).

A intensidade das cores pode ser influenciada, pela presença de óxidos de ferro, manganês e outros elementos de transição, que atuam como agentes corantes no material cerâmico (Facincani, 1993).

As formulações F1, F3, F5, F7, F8 e F10 apresentaram as tonalidades mais intensas após a queima, resultado diretamente associado ao elevado teor de Fe_2O_3 , conforme indicado na Tabela 9. Esse óxido é proveniente das argilas AV e TM, que representam as argilas com maior concentração de ferro na composição 8,49 % para argila AV e 6,21 % para a argila TM. A presença significativa de óxido de ferro contribui para o desenvolvimento de cores mais escuras durante o processo de queima, uma vez que o Fe_2O_3 , ao ser oxidado, gera matizes avermelhados a marrons intensos. Em contrapartida, as formulações F2, F4, F6 e F9, que incorporam menores proporções das argilas AV e TM e utiliza a Argila AZ que representa apenas 1,7 % Fe_2O_3 presente em sua composição. Resultou em materiais com tonalidades mais claras. Essa diferença reforça a influência da composição mineralógica, especialmente do teor de óxidos de ferro, sobre a estética final dos produtos cerâmicos.

7 CONCLUSÃO

Este estudo investigou a viabilidade técnica e científica da aplicação da tecnologia de secagem rápida na produção de cerâmica vermelha estrutural na região do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-MF). O foco foi na valorização de recursos minerais alternativos (jazidas abandonadas) para promover a sustentabilidade no setor. O trabalho envolveu desde a caracterização das matérias-primas até o desempenho final das formulações após a queima, demonstrando o potencial de tecnologias inovadoras para a indústria local.

A caracterização tecnológica das argilas da região (Argila Verde - AV, Argila Zulma - AZ e Argila Taguá Moído - TM), provenientes de jazidas com limitações para uso industrial, revelou diferentes propriedades compatíveis com aplicações cerâmicas, representando alternativas sustentáveis. A argila AV demonstrou alta plasticidade (IP 16,93 %) e predominância de frações finas, enquanto a AZ apresentou maior teor de granulometria mais grosseira, conferindo maior permeabilidade ($k_1 = 6,36 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) e menor retração na secagem (RLS 4,51 %). A argila TM destacou-se pela boa resistência mecânica após queima (RMPQ 0,81 MPa), combinando características de moldabilidade com menor propensão a fissuras. A análise mineralógica confirmou suas composições, com AV e AZ ricas em quartzo e caulinita, e TM contendo quartzo, plagioclásio, caulinita e mica, minerais importantes para a sinterização e plasticidade. Baixos teores de resíduo as matérias-primas AV e TM (RB 4,01% e 4,30%), em contraste com AZ (RB 53,03%), indicaram diferenças na presença de impurezas.

Com base na caracterização das argilas, dez formulações foram desenvolvidas utilizando delineamento de misturas para otimizar propriedades para secagem rápida (ciclo de 60 min). A análise do comportamento na secagem demonstrou que umidade de conformação acima de 21 % foi compatível com a integridade das peças. A formulação F2 apresentou a menor umidade residual (0,49 %), indicando alta eficiência na remoção de água. As formulações F8, F9 e F10 demonstraram desempenho superior na secagem rápida, sem a formação de trincas ou defeitos visíveis. A retração linear de secagem rápida foi influenciada pela composição, com a F10 registrando o menor valor (RLSR 4,71 %), o que é desejável

para minimizar defeitos. A análise de permeabilidade dos corpos secos foi crucial para entender o transporte de vapor durante o ciclo rápido. A formulação F8 apresentou umas das menores permeabilidade ($k_1 = 8,17 \times 10^{-18} \text{ m}^2$), entre as 10 formulações, porém a mistura entre as matérias-primas utilizadas facilitou a saída do vapor durante a secagem rápida, o que está diretamente relacionado ao seu desempenho superior sem defeitos visíveis. Em contraste, a baixa permeabilidade da F1 ($k_1 = 3,57 \times 10^{-18} \text{ m}^2$) contribuiu para a formação de fissuras, ressaltando que necessariamente a baixa permeabilidade não é um fator crítico que inviabiliza a secagem rápida. A resistência mecânica a seco (RMCS) foi avaliada pela sua importância no manuseio. A F10 (0,98 MPa) obteve o melhor desempenho (próximo ao limite ótimo de 1 MPa), enquanto F7, F8, F9 apresentaram RMCS satisfatória (na faixa aceitável de 0,6-1 MPa). A notável RMCS da F8, mesmo contendo uma alta proporção da argila AV (0,10 MPa) de baixa resistência isolada, evidenciou a importância do ajuste composicional. As baixas perdas por defeitos de secagem, especialmente em F7, F8, F9, confirmaram a viabilidade do ajuste composicional para a secagem rápida.

A caracterização dos materiais após secagem rápida e queima (a 930 °C) focou em propriedades essenciais para cerâmica vermelha estrutural. As formulações F8, F9 e F10 destacaram-se. A resistência mecânica à compressão pós queima (RMCQ) é um parâmetro crucial. A F5 (1,53 MPa), F8 (1,58 MPa) e F10 (1,61 MPa) superou o requisito mínimo da NBR 15270 ($\geq 1,5 \text{ MPa}$) para elementos de vedação. A retração linear de queima (RLQ) ideal é $< 1,5 \%$. F8 (1,42 %) e F10 (1,38 %) apresentaram valores nessa faixa ótima, enquanto a F3 (1,54 %) foi aceitável. A absorção de água (AA) para todas as formulações ficou dentro dos limites da NBR 15270-1/2017 (8-25 %). Estes resultados confirmam que as massas formuladas com recursos minerais alternativos locais são compatíveis com ciclos de secagem rápida.

Contudo, a formulação F10 se mostrou a mais adequada, pois, além de atender plenamente aos limites normativos de absorção de água (13,31 %) e resistência mecânica à compressão pós-queima (1,61 MPa), superando de forma consistente o requisito mínimo estabelecido pela NBR 15270. Dessa forma, a F10 reúne simultaneamente os requisitos técnicos e normativos necessários, configurando-se como a melhor escolha para aplicação prática no contexto da cerâmica vermelha e adequação em ciclos rápidos de secagem.

Além do desempenho técnico, o estudo, válida a secagem rápida como uma alternativa viável para aumentar a eficiência energética e a produtividade do setor cerâmico, reduzindo significativamente os tempos de ciclo (60 min vs. 12-48 h tradicionais). Assim, este trabalho reforça a conexão entre inovação tecnológica (secagem rápida), aproveitamento de recursos locais (argilas alternativas) e sustentabilidade (circularidade mineral) na indústria de cerâmica vermelha, contribuindo para posicionar o APL-MF como um polo de referência nacional.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15270-3. **Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação-Métodos de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- ABNT NBR 6459. Solo — **Determinação do limite de liquidez**, 2016.
- ABNT NBR 7180. Solo — **Determinação do limite de plasticidade**, 2016.
- ABNT NBR NM 27. **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**, 2001.
- ROCHA A.F.; PALMA, M.A.M. **Gestão da inovação e capacidade competitiva: uma análise não paramétrica no setor cerâmico de Campos dos Goytacazes, RJ**. Laboratório de Engenharia de Produção - LEPROD, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2012.
- ALBERS, A. P. F. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de Raios-X**. Cerâmica Industrial, v. 48, n. 305, p. 34–37, mar. 2002.
- ALVARENGA, R.; MATOS, F.; MACHADO, D.; SOBREIRA, M.; MATOS, L. **Arranjo produtivo local e desenvolvimento sustentável: uma relação sinérgica no município de Marco (CE)**. RAM. Revista de Administração Mackenzie, v. 14, n. 5, p. 15–43, out. 2013.
- ALVAREZ, F.B. **Cerâmicas: Secado. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**. Universidad de Oviedo - UNIOVI, Oviedo, España. 15p., 2013.
- ALVES, W. A.; BALDO, J. B. **O Potencial de Utilização de um Resíduo Argiloso na Fabricação de Revestimento Cerâmico Parte I - Caracterização**. Cerâmica Industrial, 1997.
- AMARAL, J. D. DO L.; DIAS, T. G. F.; ZORZI, E. J.; CRUZ, C. D. R. **Extrusão em altas pressões**. Caxias do Sul – RS: Universidade de Caxias do Sul, 2011.
- AMARAL, L. F. **Formulação de massa cerâmica para fabricação de telhas**. Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais—Campos dos Goytacazes - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 2016.
- ANDRADE, F. L. F. **Estudo da formulação de massas cerâmicas provenientes da região do Seridó-RN para fabricação de telhas**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- ANDRADE, R.A., MEDEIROS, R.R., CAMPOS, L.F.A., FERREIRA, H.S., MENEZES, R.R., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. **Influência da expansão por umidade no**

comportamento mecânico de argilas para uso em blocos de cerâmica vermelha – revisão. Cerâmica, 57, p.329- 337, 2011.

ASTM B962-13. **Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle 1.** ASTM International, 2013.

AVELINO, D. O. **Transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados.** Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2018.

BALDOVINO, J. D. J. A. **Influência da porosidade e do coeficiente de permeabilidade saturado na ascensão capilar de um solo arenoso.** Curitiba – PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

BARBA, A. **Matérias-Primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas.** Em: Tecnologia Cerámica, 2002.

BARRETO, A.; FORTES, M.; FERREIRA, W.; LUIZ, E.; CRESPO, C. **Transport coefficients for low and high-rate mass transfer along a biological horizontal cylinder.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v. 2006.

BARROS, M. P. DE. **Resfriamento evaporativo da água em um refrigerador de vaso cerâmico: estudo experimental da transferência de calor e massa.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, 2020.

BATISTA, V. R.; LIMA, J. J. S.; DE, A. G. B. **Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental.** n. 4, p. 1088–1100, 2009.

BELLO, L. H. A. D.; VIEIRA, A. F. DE C. **Tutorial for mixture-process experiments with an industrial application.** Pesquisa Operacional, v. 31, n. 3, p. 543–564, dez. 2011. BOGAS, J. A. Materiais de construção. 2013.

BOGAS, J. A. **Materiais Cerâmicos.** IFT – Técnico Lisboa Materiais de Construção, 2013.

BOULOS, T. R.; IBRAHIM, S. S.; YEHA, A. **Differential Flotation of Some Egyptian Feldspars for Separation of Both Silica and Iron Oxides Contaminants.** Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, v. 03, n. 06, p. 435–443, 2015.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos – 3ª edição.** Bookman editora. 2013.

BROSNAN, D. A.; ROBINSON, G. C. **Introduction to drying ceramics.** The American Ceramic Society, 2003.

BURMISTER, D. M. **Principles and techniques of soil identifications.** Proceedings of Highway Research Board, 1949.

CABRAL, M.; TANNO, L.; SINTONI, A.; MOTTA, J.; COELHO, J. **indústria de cerâmica vermelha e o suprimento mineral no Brasil: Desafios para o aprimoramento da competitividade.** Cerâmica Industrial, v. 17, n. 1, p. 36–42, 2012.

CALLEJAS, A. I. J.; NOGUEIRA, C. J. A. M.; BIUDES, S. M.; DURANTE, C. L.; **Variação sazonal do balanço de energia em cidade localizada na região central do Brasil.** n. 3, p. 85–106, 2016.

CAMPOS, J. R. DA C. **Aspectos da confiabilidade metrológica na indústria de cerâmica vermelha em Pernambuco.** Recife - PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 7o Edição ed. Rio de Janeiro - RJ: v. Volume 2, 2015.

CASTRO, F. F. DE; PEITER, C. C.; GÓES, G. S. **Minerais estratégicos e críticos: Uma visão internacional e da política mineral brasileira.** Texto para Discussão, p. 1–40, 26 maio 2022.

COELHO, DE A. M.; AMARAL, L. F.; DELAQUA, G. C. G.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. **Desenvolvimento de massa cerâmica utilizando resíduos de rocha ornamental.** São Paulo - SP: Contribuição técnica ao 73o Congresso Anual da ABM, 2012.

CONCEIÇÃO, E.S. **Influência da distribuição granulométrica no empacotamento de matérias-primas na formulação de porcelânicos.** Dissertação, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2011.

CONSTANTINO, A. DE O.; ROSA, S. E. S. DA; ABIDACK RAPOSO CORRÊA. **Panorama do setor de revestimentos cerâmicos.** p. 1–15, 2005.

CORRÊA, M. R. S. **The evolution of the design and construction of masonry buildings in Brazil.** Gestão & Tecnologia de Projetos, v. 7, n. 2, 21 dez. 2012.

COZZER, E.; SAQUETTO, T. C. **Fatores e problemas organizacionais que influenciam na indústria de cerâmica e vermelha de Colatina e São Roque do Canaã-ES.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2019.

COZZOLINO, S. M. F. **Biodisponibilidade de minerais.** Revista de Nutrição, v. 10, n. 2, p. 87–98, jun. 1997.

CRUZ, R. C. D. **Comportamento reológico de suspensões de misturas de pós cerâmicos.** Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

DA SILVA, V. S. **Transferência de calor e massa em materiais com forma complexa via método da análise concentrada. estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos.** Pós-Graduação em Engenharia de Processos—Campina Grande - SP: Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

DAS, D.; KAYAL, N.; MARSOLA, G. A.; DAMASCENO, L. A.; INNOCENTINI, M. D. **M. Permeability behavior of silicon carbide-based membrane and performance study for oily wastewater treatment.** International Journal of Applied Ceramic Technology, 2019.

DELAVI, D. G. G. **Defloculação de suspensões aquosas de argila e sua correlação caracterizações químicas e de superfície.** Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

DIAS, L. G.; JOÃO, S.; REI, D. **Estudo do processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito.** São João Del Rei - MG: Universidade Federal de São João Del Rei, 2013.

DONADEL, K. **Processamento e caracterização de filtros cerâmicos catalíticos obtidos a partir de fibras naturais de sílica amorfa.** Florianópolis – SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. A. **Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico.** 2002.

FACINCANI, E. **Tecnologia cerâmica: Los ladrillos.** Faenza Editrice Iberica, 1993.

FALCÃO, S. M. P. **Modelo de avaliação de desempenho ambiental em indústria de cerâmica vermelha de Pernambuco.** Recife - PE: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

FERNANDES, F. R. C. **Tendências tecnológicas Brasil: geociências e tecnologia mineral.** SGB/CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2007.

FERRAZ, E. J. M. DE O. **Caulinos de Alvarães: propriedades e aplicações cerâmicas.** Aveiro - Portugal: Universidade de Aveiro, 2004.

FERREIRA, M. M.; VARAJÃO, A. F. D. C.; MORALES-CARRERA, A. M.; PERALTA-SÁNCHEZ, M. G.; COSTA, G. M. DA. **Transformações mineralógicas e cristal químicas decorrentes dos ensaios termais em argilas cauliníticas ferruginosas.** Cerâmica, v. 58, n. 345, p. 105–110, mar. 2012.

FERREIRA, T.R. **Propriedades físicas de um cambissolo submetido à calagem usando espectroscopia de fluorescência e microtomografia de Raios-X.** Ponta Grossa – PR: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2018.

FIGUEIREDO S. C. **Estudo exploratório de incorporação da lama de filtros rotativos a vácuo (LFRV) gerada na millennium inorganic chemicals em uma**

matriz cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFBA, Salvador, 2008.

FIOCCHI, A. A. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidorretificação Ua de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria.** São Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2014.

FLORENTINO, G.; MARTORANO, L.; MIRANDA, Í.; DE MORAES, J.; BELDINI, T. **Dynamics of Space and Time of the Production Chain of the Ceramic Industry Production Center of Iranduba, Amazonas, Brazil.** Sustainability, v. 11, n. 20, p. 5576, 10 out. 2019.

FURSZYFER, DEL R. D.; SOVACOO, B.; FOLEY, A.; GRIFFITHS, S.; BAZILIAN, M.; KIM, J.; ROONEY, D. **Decarbonizing the ceramics industry: A systematic and critical review of policy options, developments, and sociotechnical systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 157, p. 112081, abr. 2022.

GALINDO-AIRES, R.; LARA-GALERA, A.; GUILLÁN-LLORENTE, G. **Contribution to the knowledge of early geotechnics during the twentieth century: Arthur Casagrande.** History of Geo- and Space Sciences, v. 9, n. 2, p. 107–123, 13 ago. 2018.

GARCIA-VALLES, M.; ALFONSO, P.; MARTÍNEZ, S.; ROCA, N. **Mineralogical and Thermal Characterization of Kaolinitic Clays from Terra Alta (Catalonia, Spain).** Minerals, v. 10, n. 2, p. 142, 7 fev. 2020.

GAVRONSKI, J. D.; ALEGRE, P. **Carvão mineral e as energias renováveis no Brasil.** UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

GOMEZ, R.; MAGALHÃES, H.; PORTO, T.; LIMA, E.; SANTANA, R.; GOMES, K.; LIMA, W.; LIMA, A. **Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos.** Research, Society and Development, v. 9, n. 11, p. e78591110300, 3 dez. 2020.

IBGE - **Cadastro central de empresas. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA.**

INNOCENTINI, M. D. M.; PADRO, A. R. F.; PANDOLFELLI, V. C. **Avaliação da porosidade permeável de concretos refratários auto-escoantes de ultra-baixo teor de cimento.** Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2000.

ITUMA, C.G.; ETUKUDOH, A.B.; ABUH, M.A.; AKPOMIE, K.G.; OBIOHA, C.I. **Utilization of Nkpuma-Akpatakpa clay in ceramics: characterization and microstructural studies.** Journal of Applied Sciences and Environmental Management, v. 22, n. 1, p. 47, 7 fev. 2018.

JORDAN, M.M.; MONTERO, M.A.; GARCÍA-SÁNCHEZ, E.; MARTÍNEZ-POVEDA, A. **Firing behaviour of Tertiary, Cretaceous and Permo-Triassic clays from Castellon ceramic cluster (Spain)**. *Applied Clay Science*, v. 198, p. 105804, nov. 2020.

JUNIOR, R. A. **Efeito de variáveis e tipos de secagem na eficiência de secagem de blocos cerâmicos de vedação**. Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais—João Pessoa - PA: Universidade Federal da Paraíba, 2016.

KILLER, R. A.; ROTTA, I. S. **A evolução e as estratégias do setor cerâmico no contexto brasileiro**. Ponta Grossa - PR: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2019.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.

KURIAN, M.; THANKACHAN, S. **Introduction: ceramics classification and applications**. Em: *Ceramic Catalysts*. Elsevier, 2023.

LI, L.; NING, Z.; HUANG, W.; LIAO, L.; ZHEN, Y.; ZHUANG, K.; LAN, S.; ZHANG, Y.; YAO, R. **In-situ fabrication of lightweight SiC(Al, rGO) bulk ceramics derived from silicon oxycarbide for aerospace components**. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 869, p. 159297, jul. 2021.

LIMA, L. A. DE. **A representação das múltiplas dimensões paradigmáticas no estudo da administração: um ensaio sobre os limites contidos nas defesas paradigmáticas excludentes**. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 15, n. 2, p. 198–208, abr. 2011.

LOT, A. V.; NASTRI, S.; NIEVES, L. J. J.; MELCHIADES, F. G.; INNOCENTINI, M. D. M.; SILVA, V.C.M.; BOSCHI, A. O. **A permeabilidade e suas relações com as características dos poros em porcelanatos: Parte I**. *Cerâmica Industrial*, 2018.

LUZA, A.L.; SIMÃO, L.; CORDI, J. A.; RAUPP-PEREIRA, F.; INNOCENTINI, M.D.M.; MONTEDO A, O.R.K. **Synthesis of chemically bonded porous ceramics from MgO–C refractory bricks waste**. *Ceramics International*, Elsevier, 2022.

MACHADO, C. C.; FERNANDES, D. C. DE M.; PEREIRA, R. S.; SANTANNA, G. L.; LIMA, D. C. DE.; PIRES, J. M. M. **Classificação tecnológica de solos e resíduos industriais, com e sem tratamento térmico, para fins rodoviários**. *Revista Árvore*, v. 27, n. 5, p. 657–668, out. 2003.

MACHADO, I. F. **Indústria mineral**. *Estudos Avançados*, v. 12, n. 33, p. 41–65, ago. 1998.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. DE F. C. **Mecânica dos Solos I: conceitos introdutórios**. p. 1–113, 1997.

MACEDO, R.S.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha**. Cerâmica, v.54, n.332, p. 411-417, 2008.

MACIEL, K.; COSTA, A.; ANDRADE, H.; GONÇALVES, J. **Valorization of oil well drilling cuttings as a raw material in ceramic manufacturing**. Applied Clay Science, v. 239, p. 106953, jul. 2023.

MAGIONI, A. Q.; OLIVEIRA, H. J.; SILVA, D. B. R.; AROUCA, F.O.; DAMASCENO, J. J. R. **Obtenção da permeabilidade de meios porosos em testes de percolação em altas pressões, Florianópolis – SC: Fenômenos de Transporte e Sistemas Particulados**. COBEQ - XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

MAIA, F. A. M. **Análise das propriedades físicas das misturas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha**. Fortaleza - CE: Universidade Federal do Ceará, 2018.

MAIELLO, A.; BRITTO, A. L. N. DE P.; VALLE, T. F. **Implementação da política nacional de resíduos sólidos**. Revista de Administração Pública, v. 52, n. 1, p. 24–51, jan. 2018.

MARSIGLI, M.; DONDI, M. **Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura**. L'Industria dei Laterizi, 1997.

MARTINS, A. A. A. **Fenômenos de transporte em meios porosos – Escoamento monofásico e transporte de massa**. Universidade do Porto, Laboratório de Processos de Separação e Reações, Departamento de Engenharia Química, 2006

MARTINS, P. F.; BOSCH NETO, C. J.; SILVA, J. O. A.; SIQUEIRA, M. DE O. A. **Secagem: uma revisão**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 6, n. 4, p. 0600–0607i, 20 out. 2020.

MARTINS, I. O. **Modelagem da secagem convectiva em contracorrente de cerâmica vermelha: Aspectos fenomenológicos e de consumo de energia**. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

MATENCIO, T. **Importância dos materiais cerâmicos na nossa sociedade**. Rio de Janeiro – RJ: Matéria, v. 25, n. 1, 2020.

MEDEIROS, S. G.; DUTRA, R. P. S.; GRILO, J. P. F.; MARTINELLI, A. E.; MARTINELLI, A. E.; PASKOCIMAS, C. A.; MACEDO, D. A. **Preparação de compósitos alumina-mulita de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulínica da Paraíba e hidróxido de alumínio**. Cerâmica, v. 62, n. 363, p. 266–271, set. 2016.

MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. **Sinterização de cerâmicas em microondas**. Parte I: aspectos fundamentais. Cerâmica Industrial, v. 53, n. 325, p. 1–10, mar. 2007.

MEUNIER, A. **Clays**. Scientifiques GB ed. Poitiers - França: Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.

MIYAZAKI, D. **In-situ Observation and Differential Thermal Analysis of MnBi in High Magnetic Fields**. Physics Procedia, v. 75, p. 1324–1331, 2015.

MOLINA JUNIOR, W. F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. **Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil**. Applied Clay Science, 2004.

MOREIRA, B. A.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. **Avaliação da permeabilidade de meios porosos constituídos por carbonato de cálcio utilizado como agente obturante em processos de perfuração de poços de petróleo**. Revista Exacta Engenharia de Produção, 2012.

MORENO, M.; ROVERI, C.; GODOY, L.; ZANARDO, A. **Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água**. Cerâmica Industrial, v. 62, n. 361, p. 21–31, mar. 2016.

MOTTAA, F. M. J.; ZANARDO, M. A.; JÚNIORA, C.; TANNOA, C. L.; CUCHIERATO, G. **As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins**. Cerâmica Industrial, v. 9, n. 2, p. 2–14, 2004.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**. Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 1–12, 2001.

MOURA, N.; ASCIMENTO, J.; MARTINS, J.; CASTELO, A.; BULHOSA, S.; CRETO, V.; ALLEDI, C.; GGALDINO, A. **Caracterização microestrutural e propriedades físicas e mecânicas de argilas da região norte do espírito santo**. Revista Ifes Ciência, v. 6, n. 2, p. 17–27, 28 ago. 2020.

MUIANGA, C. **Recursos naturais e desafios para Moçambique Desafios para Moçambique**. Instituto de Estudos Sociais e Económicos (IESE)Editores: Luís de Brito, Carlos Castel-Branco, Sérgio Chichava, Salvador Forquilha, António Francisco, 2012.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2006.

NAGATA, N. **Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementos na análise quantitativa por fluorescência de raio-x**. Divulgação Quim. Nova, v. 24, n. 4, p. 531–539, 2001.

NANDI, V. DE S. **Estudo da influência composicional, mineralógica e granulométrica no processo de secagem rápida de cerâmica vermelha estrutural**. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais Criciúma - SC: Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, 2022.

NANDI, V. DE S. **Secagem rápida de cerâmicas vermelhas: uma nova abordagem de avaliação baseada no uso combinado de dilatométrica óptica e análise termogravimétrica**. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, 2024.

NIEVES, J. L. J.; NASTRI, S.; LOT, A. V.; MELCHIADES, F. G.; MARSOLA, G. A.; FLAUZINO, I. S.; INNOCENTINI, M. D. M.; BOSCHI, A. O. **Influence of engobe and glaze layers on the evolution of porosity and permeability of single-fired porcelain tiles**. Applied Clay Science, Elsevier, 2022.

OLIVEIRA, A. A. de. **Tecnologia em Cerâmica**. Criciúma, SC: Editora Lara, 2011.

OLIVEIRA, A. P. N. DE; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. Florianópolis – SC: Editora UFSC ed. edição revista, 2015.

OLIVEIRA, F. das C.; SOUSA, R. M. L.; SILVA, P. F.; LOPES, P. D.; LEITE, R. C.; SALGADO, M. F.; PAZ, G. M. da.; SOARES, R. A. L. **Caracterização de Materiais: A Termodinâmica e suas aplicações no estudo da análise térmica de argilas**. Research, Society and Development, v. 10, n. 2, p. e6510212284, 4 fev. 2021.

OLIVEIRA, F. R. DE; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. **Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil**. Resources, Conservation and Recycling, v. 135, p. 202–209, ago. 2018.

PÁDUA, V.; PEREIRA, C.; VIEIRA, C.; PIMENTA, H.; VIEIRA, M. **Efeitos das características granulométricas e mineralógicas da sílica contida no itabirito compacto adicionada em um sinter feed hematítico para sinterização**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 64, n. 3, p. 347–352, set. 2011.

PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de micro e pequenas empresas: Estudo de caso das indústrias de cerâmica vermelha no vale do Rio Tijucas, Florianópolis – SC**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

PATRICIO, J. S.; HOTZA, D.; NONI JÚNIOR, A. DE. **Argilas adsorventes aplicadas à clarificação de óleos vegetais**. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, SC, 171-178, 2014.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. Doutorado em Engenharia Geotécnica—São Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2004.

PERES, S.; DE SOUZA, L. **Argilas pilarizadas: uma tecnologia limpa na reação de isomerização do óxido de estireno**. Rio de Janeiro - RJ: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.

PEREZ, B.; ESTEVÃO, H. **Técnicas de processamento de cerâmicas porosas: uma revisão bibliográfica e comparativo entre o método de aglomeração de partículas e a manufatura aditiva**. Araraquara – SP: Instituto Federal São Paulo, V Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica, 2020.

PEZZATTI, R. **Estudo da permeabilidade de meios porosos por Ressonância Magnética Nuclear ênfase em reservatórios de petróleo**. São Carlos – SP: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2020.

PINHEIRO, E.; DE FRANCISCO, A. **Management and Characterization of Textile Solid Waste in a Local Productive Arrangement**. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, v. 24, n. 4(118), p. 8–13, 1 jul. 2016.

PINTO, L.; DE SOUZA, T.; SILVA, D.; PEIXOTO, L.; RODRIGUES, M. **Study of clay used in the production of red ceramic pottery on semi-arid Cearense, Brazil**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 26, n. 3, 2021.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. **Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha**. *Cerâmica Industrial*, v. 02, n. 01/02, p. 1–5, 1997.

PRADO, C. M. DE O. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe**. São Cristóvão - SE: Universidade Federal de Sergipe, 2011.

PU, W.; PANG, S.; JIA, H. **Using DSC/TG/DTA techniques to re-evaluate the effect of clays on crude oil oxidation kinetics**. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 134, p. 123–130, 1 out. 2015.

RAETHER, F. **Drying behaviour of ceramic green bodies: experimental characterization and numerical modeling**. Université de Limoges, IRCer – Institut de Recherche sur les Céramiques, 2020.

RAMOS, M. A. V. **Especialização de mineração e meio ambiente: Controle e monitoramento ambiental na mineração**. Cruz das Almas – BA: UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017.

REANEY, I. M.; WALSH, B.; VILARINHO, P. M. **Resource efficiency and energy efficiency (REEE) in the Portuguese ceramic industry: Towards net zero carbon production**. *Open Ceramics*, v. 15, p. 100390, set. 2023.

REGNER, A. C. K. P. **O conceito de natureza em a origem das espécies, História, Ciências**. *Saúde-Manguinhos*, v. 8, n. 3, p. 689–712, dez. 2001.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. **Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos**. Formiga - MG: Brazilian Journal of Biosystems Engineering v., 2018.

RODRIGUES, S. B. **Desafios da administração no século XXI**. Revista de Administração de Empresas, v. 44, n. spe, p. 108–110, dez. 2004.

ROMANO, R. C. O.; PANDOLFELLI, V. C. **Obtenção e propriedades de cerâmicas porosas pela técnica de incorporação de espuma**. São Carlos – SP: DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar – Universidade Federal de S. Carlos, 2006.

MACEDO, R. S. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha**. Campina Grande – SP: Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

SALES, J. C.; SANTOS, M. W. L. C. DOS.; BRANDÃO, F. DA S.; BRAGA, W. A.; SALES, A. J. M.; MORAIS, J. E. V. DE.; SOMBRA, A. S. B. **A secagem na indústria de cerâmica vermelha nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará**. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Bento Gonçalves - RS: 2014.

SANTANA, E. W. F. de. **Avaliação da secagem e queima de placas cerâmicas**. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba - Brasil, 2006.

SANTOS, C.; OLIVEIRA, H.; OLIVEIRA, R.; MACEDO, Z. **Caracterização de argilas calcárias utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos no Estado de Sergipe - Brasil**. Cerâmica Industrial, v. 62, n. 362, p. 147–156, jun. 2016.

SANTOS, H. S.; KIYOHARA, P.; COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. S. **Estudo por microscopia eletrônica das transformações durante a queima de argilas altamente aluminosas brasileiras**. Cerâmica, v. 52, n. 322, p. 125–137, jun. 2006.

SAVIATTO, E.; ZACCARON, A.; NANDI, V.; ACORDI, J.; ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; GALATTO, S.; RIBEIRO, M. **Sustainable Mining: Reuse of Clay from Abandoned Areas in the South of Brazil for Ceramic Production Based on a Simplex Design, Materials**. v. 16, n. 19, p. 6466, 28 set. 2023.

SCHIMIDT, F. **Aplicação de alguns modelos quimiométricos à espectroscopia de fluorescência de raio-x de energia dispersiva**, *Quim. Nova*, v. 25, n. 6, p. 949–956, 2002.

SETYO MUNTOHAR, A.; HASHIM, R. **Determination of plastic limits of soils using cone penetrometer: Re- Appraisal**. Pengasuh Jurnal Teknik Sipil, v. Volume XI, p. 1–14, 2005.

SILVA, A. G. P. DA; ALVES JÚNIOR, C. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização**. Cerâmica, v. 44, n. 290, p. 225–232, dez. 1998.

SILVA, A. M. V. **Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação**. Campina Grande - SP: Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

SILVA DA, C. R. **Recursos minerais do brasil: Defesa, Segurança e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro – RJ: Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra como requisito à obtenção do diploma do Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia, 2019.

SILVA, N. C.; CARVALHO, B. G. E. **Compreendendo o processo de inclusão escolar no Brasil na perspectiva dos professores: uma revisão integrativa**. Revista Brasileira de Educação Especial, v. 23, n. 2, p. 293–308, jun. 2017.

SILVA, R. G. DA; SILVA, V. P. DA. **Produção mais limpa: contributos teórico-práticos para a sustentabilidade da cerâmica vermelha**. Cerâmica, v. 63, n. 368, p. 494–507, dez. 2017.

SILVA, R. G. **Diagnóstico dos resíduos sólidos e desperdícios de uma cerâmica vermelha para implementação de técnicas de produção mais limpa**. Mestrado em Ciências Ambientais—Natal - RN: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2017.

SILVA, T. F.; SANTOS, J. J. N.; SOUZA, J. C. M.; ARAÚJO, P. S.; PAIVA, W. **Comportamento da permeabilidade não saturada em camada de cobertura de aterro sanitário no semiárido brasileiro**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022.

SILVA, V. G. **Caracterização tecnológica de uma argila do vale do Rio Doce - MG para fabricação de cerâmica vermelha**. Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.

TANNO, L. C.; MOTTA, J. F. M. **Panorama setorial - Minerais industriais, Divisão de Geologia – Agrupamento de Geologia Aplicada a Recursos Minerais**. p. 28–39, 2000.

TAVARES, S. R. DE L. **A visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Embrapa Solos ed. Rio de Janeiro - RJ: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2008. v. ISSN 1517-2627

TEIXEIRA-NETO, É.; TEIXEIRA-NETO, Â. A. **Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado**. Química Nova, v. 32, n. 3, p. 809–817, 2009.

TIAB, D.; DONALDSON E. **Petrophysic: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties**. second edition, Oxford: Elsevier, GPP – Gulf Professional Publishing, v.2, p. 813-823, 2004.

TIZZIOTTI, C. P. P.; TRUZZI, O. M. S.; BARBOSA, A. DE S. **Arranjos produtivos locais: uma análise baseada na participação das organizações locais para o desenvolvimento.** Gestão & Produção, v. 26, n. 2, 2019.

TOWNER, G. D. **The mechanics of cracking of drying clay.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 36, n. 2, p. 115–124, fev. 1987.

VIEIRA, C. M. FONTES; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. **Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da Curva de Bigot.** Cerâmica Industrial, 2003.

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. **Características e efeito da fração granulométrica < 2 µm no comportamento de queima de uma argila.** Cerâmica, v. 53, n. 327, p. 249 - 254, set. 2007.

WINKLER, H. G. F. **Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse.** Berichte Deutsche Keramics Gesellschaft, v. 31, p. 337 - 343, 1954.

YANG, Y.; LAARZ, E.; KAUSHIK, S.; MUELLER, E.; SIGMUND, W.; SŌMIYA, S.; ALDINGER, F.; CLAUSSEN, N.; SPRIGGS, R.M.; UCHINO, K.; KOUMOTO, K.; KANENO, M. (Org.) **Handbook of Advanced Ceramics. Vol I: Materials Science.** P.131-185, 2003.

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha.** Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais—Criciúma - SC: Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, 2018.

ZACCARON, A.; NANDI, V.; MARCARO, S.; BERNARDINO A. **The behavior of different clays subjected to a fast-drying cycle for traditional ceramic manufacturing.** Journal of King Saud University - Engineering Sciences, maio 2024.

ZORZI, J. E.; PEROTTONI, C. A.; JORNADA, J. A. H. DA. **Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pós submicrométricos.** Cerâmica, v. 50, n. 315, p. 202–208, set. 2004.

ZUCATELLI, P. J. **Estudo sobre a influência da permeabilidade no meio poroso em projetos de injeção e armazenamento geológico de CO₂.** Latin American Journal of Energy Research, 2016.