



INSTITUTO FEDERAL
Piauí



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DA POTENCIALIDADE DA ADIÇÃO DE PÓ DAS ROCHAS MUSCOVITA
MONZOGRANITO, ZOISITA ANFIBOLITO E CÁLCARIO PARA PRODUÇÃO DE
REVESTIMENTO**

YUDSON SAMUEL VASCONCELOS LIMA

TERESINA - PI

2025

YUDSON SAMUEL VASCONCELOS LIMA

**ESTUDO DA POTENCIALIDADE DA ADIÇÃO DE PÓ DAS ROCHAS MUSCOVITA
MONZOGRANITO, ZOISITA ANFIBOLITO E CÁLCARIO PARA PRODUÇÃO DE
REVESTIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e Caracterização de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares

Coorientador: Prof. Dr. Érico Rodrigues Gomes

TERESINA - PI

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Lima, Yudson Samuel Vasconcelos

L732e Estudo da potencialidade da adição de pó das rochas muscovita monzogranito, zoisita anfibolito e calcário para produção de revestimento. / Yudson Samuel Vasconcelos Lima. - 2025.
100 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Roberto Arruda Lima Soares.

Coorientador : Prof Dr. Érico Rodrigues Gomes.

1. Matérias - primas. 2. revestimento. 3. Rochas. 4. Cerâmica. I.Título.

CDD – 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

YUDSON SAMUEL VASCONCELOS LIMA

ESTUDO DA POTENCIALIDADE DA ADIÇÃO DE PÓ DAS ROCHAS MUSCOVITA
MONZOGRANITO, ZOISITA ANFIBOLITO E CÁLCARIO PARA PRODUÇÃO DE
REVESTIMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte
integrante dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 30/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. ROBERTO ARRUDA LIMA SOARES (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. KELSON SILVA DE ALMEIDA (Avaliador Interno)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof^ª. Dra. YÁSCARA LOPES DE OLIVEIRA (Avaliadora Externa)
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

***“Porque a sua ira dura só um momento;
no seu favor está a vida; o choro pode
durar uma noite, mas a alegria vem pela
manhã.”***

- Salmos 30:5

**DESISTIR NÃO É, E NUNCA FOI E NEM SERÁ UMA OPÇÃO !
PRA CIMA, SE PARAR CAI !!!!!!!!!!!**

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a DEUS, pelo dom da vida, da saúde, de ter me permitido concluir mais essa etapa da minha vida, por ter dado forças pra não desistir e enfrentar todas as adversidades. Toda honra e toda glória sejam dadas ao Senhor Deus Todo Poderoso ! Amém !

Quero agradecer também aos meus pais, por me apoiarem, por olharem com orgulho a chance de ter um filho com o título de mestre, por todo exemplo de vida, isso é o que sempre será meu combustível pra alcançar qualquer coisa. É por vocês e amo muito vocês !

Quero agradecer também ao meu orientador que é o melhor do programa, o Dr. Roberto Arruda, desde o primeiro dia eu sabia que a orientação seria a melhor, até porque ele é fã de carneiro, então teremos muito o que comemorar, professor. Muito obrigado por todo direcionamento, todo conhecimento que você me repassou, sua expertise colaborou exponencialmente para o conhecimento que tenho hoje, muito obrigado. E tenho certeza que você não vai esquecer que e^c é igual a ADB (Adega do Boi).

Quero agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) pela oportunidade de realização do Mestrado, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para a produção deste trabalho, e a todo o corpo docente do programa. Agradecer a todos meus amigos e amigas, colegas do programa, pelo apoio, troca de experiências, ajudas, puxões de orelha e companheirismo, isso foi essencial para a conclusão desse trabalho, sozinhos não conseguimos prosperar !

Não poderia deixar de agradecer também a todos meus amigos e amigas fora do programa que me apoiaram, que incentivaram, que sempre acreditaram que esse sonho seria possível, que antes mesmo de entrar no mestrado me apoiaram, obrigado.

Por fim, e não menos importante, igual no meu TCC, quero dedicar esse trabalho para minha estrelinha que tenho no céu, Eduarda Salazar, que eu sei que ainda continua torcendo por mim e que hoje está ficando cada vez mais orgulhosa. Obrigado pelo legado de amor, perseverança e fé que você deixou. Obrigado por tudo !

Agradeço a todos e a todas, a conquista não é apenas minha, é nossa !

RESUMO

Um dos principais motivos para o crescimento da indústria das cerâmicas brasileiras se deve ao fato da enorme quantidade de matérias-primas naturais que existem no país, por isso é de suma importância a escolha correta e ideal das matérias-primas. Dessa forma, o trabalho tem por objetivo estudar o efeito da adição de pó das rochas muscovita monzogranito, zoisita anfibolito e calcário na massa cerâmica utilizada para fabricação do revestimento, analisando sua influência nas propriedades tecnológicas e microestruturais. As matérias-primas foram submetidas a caracterização e análise granulométrica, plasticidade, química, mineralógica e térmica. O pó das rochas foi adicionado a massa básica totalizando 5 formulações diferentes e submetidos ao processo de queima em temperaturas de 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C. As propriedades tecnológicas avaliadas foram a perda ao fogo, retração linear de secagem e queima, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, tensão de ruptura a flexão de secagem e queima. Cabe ressaltar que de modo geral às temperaturas de 1050°C, 1100°C e 1150°C os corpos de prova em todas as formulações apresentaram boa homogeneidade quanto à coloração e à textura superficial, não sendo observadas deformações relevantes ou defeitos visuais significativos que comprometessem as peças após a queima e com resultados que permitem sua classificação como revestimento poroso, semiporoso, semigrês e grês. Os melhores resultados foram observados nos corpos de prova da formulação F2, queimadas na temperatura de 1150°C, obtendo-se resistência mecânica máxima de 34,23 MPa e absorção de água de 2,79% o que permitiu sua classificação como revestimento cerâmico do tipo grês. Os corpos de prova elaborados demonstraram propriedades tecnológicas compatíveis com os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas vigentes para aplicação em revestimentos cerâmicos destinados a pisos e paredes. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam o potencial de aproveitamento das matérias-primas estudadas, provenientes do estado do Piauí, evidenciando sua viabilidade para uso na indústria cerâmica na fabricação de revestimentos de qualidade.

Palavras-chave: matérias-primas; revestimento; rochas; cerâmica.

ABSTRACT

One of the main reasons for the growth of the Brazilian ceramic industry is the abundance of natural raw materials available in the country. Therefore, the correct and ideal selection of these raw materials is of paramount importance. In this context, the present study aims to evaluate the effect of adding rock powders from muscovite monzogranite, zoisite amphibolite, and limestone into the ceramic mass used for the manufacture of ceramic tiles, analyzing their influence on the technological and microstructural Properties. The raw materials were subjected to granulometric characterization, plasticity tests, chemical, mineralogical, and thermal analyses. The rock powders were incorporated into the basic ceramic mass, resulting in five different formulations, which were submitted to a firing process at temperatures of 1000°C, 1050°C, 1100°C, and 1150°C. The technological properties evaluated included loss on ignition, linear shrinkage during drying and firing, water absorption, apparent porosity, apparent density, and flexural strength after drying and firing. It is worth noting that, in general, at firing temperatures of 1050°C, 1100°C, and 1150°C, the specimens from all formulations showed good homogeneity in terms of color and surface texture, no relevant deformations or significant visual defects were observed that would compromise the pieces after firing, and the results allowed their classification as porous, semi-porous, stoneware-like (semi-grès), and stoneware (grès) ceramic tiles. The best results were observed for the specimens from formulation F2, fired at 1150°C, achieving a maximum flexural strength of 34.23 MPa and water absorption of 2.79%, allowing their classification as stoneware ceramic tiles. The prepared specimens exhibited technological properties compatible with the parameters established by current technical standards for application in ceramic tiles intended for floors and walls. Thus, the results obtained confirm the potential use of the studied raw materials, originating from the state of Piauí, highlighting their viability for application in the ceramic industry for the production of high-quality tiles.

Keywords: raw materials; cladding; stones; ceramics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Principais polos de produção de cerâmica vermelha no estado do Piauí.....	29
Figura 2:	Classificação das rochas plutônicas.....	34
Figura 3:	Processo produtivo das placas cerâmicas.....	37
Figura 4:	Curva de queima do processo de monoqueima.....	45
Figura 5:	Fluxograma do procedimento experimental.....	47
Figura 6:	Mapa do Piauí, destacando as cidades de Lagoa do Barro do Piauí, Capitão Gervásio Oliveira e Dom Inocêncio.....	48
Figura 7:	Muscovita Monzogranito.....	48
Figura 8:	Zoisita Anfibolito.....	49
Figura 9:	Calcário.....	49
Figura 10:	Mesa agitadora e as peneiras.....	50
Figura 11:	Aparelho de Casagrande.....	51
Figura 12:	Espectômetro de fluorescência de raios X.....	52
Figura 13:	Aparelho TGA-51H Shimadzu.....	53
Figura 14:	Britador martelo.....	54
Figura 15:	Moinho de bolas.....	54
Figura 16:	Matérias-primas cominuídas.....	55
Figura 17:	Prensa Hidráulica.....	56
Figura 18:	Moldes de conformação.....	56
Figura 19:	Corpos de prova após a conformação.....	57
Figura 20:	Estufa.....	57
Figura 21:	Corpos de prova após secagem.....	58
Figura 22:	Corpos de prova em todas as formulações (F1 à F5) após secagem.....	58
Figura 23:	Fotomicrografia da lâmina da Muscovita Monzogranito, exibindo a visão geral dos minerais presentes da amostra, dentre eles o quartzo, o álcali-feldspato, estes dois últimos com feições de alteração, e a muscovita.....	67
Figura 24:	Fotomicrografia com destaque para o epídoto (mineral de relevo alto no centro da imagem), presente em quantidades variáveis pela amostra, ao lado de cristais de quartzo (cristais incolores fraturados, mas não alterados).....	67
Figura 25:	Fotomicrografia da região de intensa alteração dos feldspatos e presença de cristais subédricos a euédricos de muscovita (cristais incolores, lamelares e de relevo moderado) e epídoto (cristais incolores, prismáticos e de relevo alto)	67

Figura 26: Identificação da mineralogia por microscopia óptica da Zoisita Anfibolito, representada por Zoisita (ZT), Clinozoisita (CZT), Tremolita-actinolita (TR) e Hornblenda (HNB).....	69
Figura 27: Fotomicrografia da Zoisita Anfibolito, com destaque para os cristais de tremolita (incolor) envolvendo um cristal de hornblenda (marrom) alterada. Lâmina sob nicóis paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)	69
Figura 28: DRX da Argila.....	71
Figura 29: DRX da Muscovita Monzogranito.....	72
Figura 30: DRX da Zoisita Anfibolito.....	73
Figura 31: DRX do Calcário.....	73
Figura 32: TG e DTGA da argila.....	75
Figura 33: TG e DTGA da Muscovita Monzogranito.....	76
Figura 34: TG e DTGA da Zoisita Anfibolito.....	76
Figura 35: TG e DTGA da Zoisita Anfibolito.....	77
Figura 36: Retração linear de secagem (110°C)	78
Figura 37: Retração linear de queima.....	79
Figura 38: Perda ao fogo.....	80
Figura 39: Absorção de água.....	81
Figura 40: Porosidade aparente.....	83
Figura 41: Massa específica aparente.....	84
Figura 42: Tensão de ruptura a flexão de secagem à 110°C.....	85
Figura 43: Tensão de ruptura a flexão de queima.....	87
Figura 44: Formulações à 1000°C.....	88
Figura 45: Formulações à 1050°C.....	88
Figura 46: Formulações à 1100°C.....	89
Figura 47: Formulações à 1150°C.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Classificação das cerâmicas de revestimento.....	21
Tabela 2:	Classificação segundo a vitrificação das placas cerâmicas.....	21
Tabela 3:	Classificação das placas prensadas segundo suas características físicas.....	22
Tabela 4:	Características técnicas de revestimentos porosos.....	24
Tabela 5:	Principais reações químicas e físicas durante a queima de uma massa vermelha por monoqueima	46
Tabela 6:	Formulação das massas cerâmicas.....	55
Tabela 7:	Distribuição granulométrica das matérias-primas.....	63
Tabela 8:	Valores do limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade da argila.....	65
Tabela 9:	Composição química da argila e das rochas.....	69
Tabela 10:	Análise mineralógica racional das matérias-primas.....	74
Tabela 11:	Retração linear de secagem (110°C)	78
Tabela 12:	Retração linear de queima.....	79
Tabela 13:	Perda ao fogo.....	80
Tabela 14:	Absorção de água.....	81
Tabela 15:	Porosidade aparente.....	82
Tabela 16:	Massa específica aparente.....	84
Tabela 17:	Tensão de ruptura a flexão de secagem à 110°C.....	85
Tabela 18:	Tensão de ruptura a flexão de queima.....	86
Tabela 19:	Classificação do revestimento cerâmico.....	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1:	Produção brasileira de revestimento cerâmico.....	26
Gráfico 2:	Vendas de revestimento cerâmico no mercado interno do Brasil....	26
Gráfico 3:	Tipos de produtos fabricados no Brasil.....	27
Gráfico 4:	Exportações brasileira de revestimentos cerâmicos e sua receita...	27
Gráfico 5:	Resultado do limite de liquidez.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Análise Granulométrica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
ANSI	American National Standards Institute
ASPACER	Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEPRO	Fundação Centro de Pesquisa Econômicas e Sociais do Piauí
CZT	Clinozoisita
DRX	Difratometria de Raios-X
DTG	Termogravimetria Derivada
FRX	Espectometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva
HNB	Hornblenda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IGc-USP	Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IP	Índice de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
ISO	Internacional Organization For Standardization
IUGS	International Union of Geological Sciences
LABMAT	Laboratório de Materiais
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEA	Massa Específica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

PA	Porosidade Aparente
PB	Paraíba
PF	Perda ao Fogo
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais
RLQ	Retração Linear de Queima
RLS	Retração Linear de Secagem
SCMR	Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TGA	Análise Térmica Gravimétrica
TR	Tremolita-Actinolita
TRF	Tensão de Ruptura e Flexão
UNI EN	Unione Europea Ente Nazionale
ZT	Zoisita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1	REVESTIMENTO CERÂMICO.....	20
3.1.1	Revestimento cerâmico grês porcelanato e grês.....	22
3.1.2	Revestimento cerâmico poroso.....	23
3.2	INDÚSTRIA DE REVESTIMENTO CERÂMICO BRASILEIRO.....	24
3.3	INDÚSTRIA CERÂMICA PIAUIENSE.....	28
3.4	MATÉRIAS-PRIMAS.....	30
3.4.1	Argila.....	31
3.4.2	Feldspato.....	32
3.4.3	Rocha Granítica.....	33
3.4.4	Rocha Anfibolito.....	35
3.4.5	Calcário.....	36
3.5	PROCESSO PRODUTIVO DO REVESTIMENTO CERÂMICO.....	36
3.5.1	Preparação das matérias-primas.....	38
3.5.2	Preparação da massa.....	38
3.5.3	Prensagem.....	40
3.5.4	Secagem.....	42
3.5.5	Esmaltação e decoração.....	43

3.5.6	Queima.....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	47
4.2	MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS.....	47
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	49
4.3.1	Análise granulométrica.....	50
4.3.2	Análise de plasticidade.....	51
4.3.3	Análise química.....	52
4.3.4	Análise mineralógica.....	52
4.3.5	Análises térmicas.....	53
4.3.6	Análise racional.....	54
4.4	PREPARO DAS FORMULAÇÕES.....	54
4.5	PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....	55
4.6	SECAGEM E QUEIMA DOS CORPOS DE PROVA.....	57
4.7	CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL.....	58
4.7.1	Retração linear.....	59
4.7.2	Perda ao fogo.....	60
4.7.3	Absorção de água.....	60
4.7.4	Porosidade aparente.....	61
4.7.5	Massa específica aparente.....	61
4.7.6	Tensão de ruptura à flexão.....	62
4.7.7	Análise macroestrutural.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	63

5.1.1	Análise granulométrica.....	63
5.1.2	Limite de liquidez e plasticidade.....	65
5.1.3	Análise petrográfica.....	66
5.1.4	Análise química.....	69
5.1.5	Análise mineralógica.....	70
5.1.6	Análise racional.....	74
5.1.7	Análise térmica.....	75
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	77
5.2.1	Retração linear (RL).....	77
5.2.2	Perda ao fogo (PF).....	79
5.2.3	Absorção de água (AA).....	81
5.2.4	Porosidade aparente (PA).....	82
5.2.5	Massa específica aparente (MEA).....	83
5.2.6	Tensão de ruptura à flexão (TRF).....	85
5.3	ANÁLISE MACROESTRUTURAL.....	88
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

O material que acompanha a humanidade há mais tempo, desde o início das civilizações até os dias atuais, é a cerâmica, que é obtida a partir da argila, sendo também o material mais antigo produzido pelo homem, existindo há cerca de dez a quinze mil anos (DOBERSTEIN, 2010). O termo cerâmica vem do grego *keramos*, que se referia a vasilhames de argila, mas em um sentido mais amplo, entende-se cerâmica tanto um produto quanto um processamento ou uma indústria, dessa forma os materiais cerâmicos são a maioria dos sólidos que não são metais, polímeros ou derivados de plantas ou animais (OLIVEIRA; HOTZA 2015).

A indústria de cerâmica é um setor bastante heterogêneo, com uma diversidade de indústrias espalhadas pelo país, fontes de energia, abundância de matérias-primas naturais e segundo o Ministério de Minas e Energia (2018) caracteriza-se também por ser um setor de grande importância econômica para o país, com participação estimada em 1% no PIB (Produto Interno Bruto), apresentando forte participação no mercado internacional com expansão da exportação.

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (ANFACER, 2024), o Brasil é o 3º maior produtor mundial de revestimento cerâmico (825 milhões de m²) ficando atrás apenas da China e da Índia, é 2º maior consumidor (727 milhões de m²) e 5º maior exportador (85 milhões de m²). A produção brasileira de revestimento cerâmico se concentra nas regiões Sudeste e Sul e em expansão no Nordeste do país.

Um dos principais motivos para o crescimento da indústria das cerâmicas brasileiras se deve ao fato da enorme quantidade de matérias-primas naturais que existem no país, por isso é de suma importância a escolha correta e ideal das matérias-primas, a compactação do produto, a formulação da massa cerâmica, visto que elas influenciam nas propriedades finais do produto por conta da determinação das transformações físico químicas (HOTZA, 2007).

Com base no exposto, o mercado está ficando cada vez mais exigente em relação a qualidades dos produtos cerâmicos e isso estimula a pesquisa de materiais alternativos que possam substituir parcialmente ou totalmente algumas matérias-primas que são utilizadas para a produção do revestimento, já que muitas vezes é necessário a introdução de outras matérias-primas, porque a argila sozinha

não apresenta todas as características necessárias para a produção de algum tipo de placa cerâmica (SOARES, 2010).

Recentemente a região Nordeste tem mostrado um grande desenvolvimento nesse setor industrial, devido a variedade de matérias-primas, principalmente as que podem atuar como fundente. Entre elas existem as rochas Muscovita Monzogranito, Zoisita Anfibolito e Calcário, as duas primeiras como substitutos parciais da argila e de feldspatos devido a conter em sua composição química minerais como silício, potássio e cálcio tendo atuação importante como fundente, já a terceira possui alta porcentagem de óxido de cálcio (CaO), onde tende a baixar a refratariedade da massa cerâmica, fazer parte da estrutura cristalina após a queima da massa e desempenha papel de fundente (AVELINO, 2017; BRASILEIRO, 2021).

Dessa forma, devido a necessidade de desenvolver novas formulações na produção de revestimento cerâmico, à adição de matérias-primas como a Muscovita Monzogranito, Zoisita Anfibolito e Calcário como fundentes alternativos, pode contribuir consideravelmente em um produto de qualidade e competitivo no mercado, sem contar na possibilidade de despertar o interesse de investidores na indústria de revestimento cerâmico piauiense por conta da abundância dessas matérias-primas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o efeito da adição de pó das rochas Muscovita Monzogranito, Zoisita Anfibolito e Calcário na massa cerâmica utilizada para a fabricação de revestimento, analisando sua influência nas propriedades tecnológicas e microestruturais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar mineralogicamente e quimicamente as matérias-primas, antes das formulações, utilizando as técnicas: análise térmica gravimétrica (TG), índice de plasticidade (IP), ensaio granulométrico, difratometria de raios-X (DRX), e espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX);
- Fazer a caracterização física dos corpos de prova processados, através das análises de: Perda ao Fogo (PF), Retração Linear (RL) de secagem e de queima, Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA), Massa Específica Aparente (MEA), Tensão de Ruptura e Flexão (TRF) de secagem e de queima;
- Verificar uma possível melhoria da qualidade das peças de cerâmicas formuladas com a utilização de pó das rochas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 REVESTIMENTO CERÂMICO

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR ISO 13006: 2020 Placas cerâmicas – definições, classificação, característica e marcação) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o revestimento cerâmico é o conjunto formado pelas placas cerâmicas, pela argamassa de assentamento e pelo rejunte, onde a placa cerâmica é o material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas que são geralmente utilizadas para revestir paredes e pisos, sendo conformadas por extrusão, prensagem ou por outros processos, e então são secadas e queimadas até atingir a temperatura de sinterização, podendo ser esmaltadas ou não esmaltadas, além de serem incombustíveis e não são afetadas pela presença da luz.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2022) as placas cerâmicas são constituídas geralmente por três camadas: o suporte ou biscoito, o engobe e o esmalte. Este segmento engloba todos os produtos cerâmicos que são bastante utilizados na construção civil tanto para revestimento de pisos, piscinas, paredes, bancadas, recebendo várias designações como pastilha, azulejo, grês, piso, porcelanato, entre outros.

As placas cerâmicas para revestimentos podem ser classificadas em função do seu grupo de absorção de água; o modo de fabricação em prensados, extrudados ou outras técnicas; por ser esmaltados ou não esmaltados; pela classe de resistência a abrasão superficial, em número 5; pela classe de resistência ao ataque de químicos; e pelo aspecto superficial ou análise visual (NBR ISO 13006:2020).

Segundo as NBR ISO 10545-3 (2020) e ISO 13006 (2020), as classificações das placas cerâmicas de acordo com a absorção de água, que está ligada diretamente com a porosidade, pode ser: grês porcelanato, grês, semigrês, semiporoso e poroso. A Tabela 1 apresenta os tipos de produtos classificados em função do seu modo de fabricação e pelo grupo de absorção de água (AA).

Tabela 1 – Classificação das cerâmicas de revestimento

Produto	Absorção de água (%)	Métodos de fabricação		
		Extrudado	Prensado	Outros
Grês porcelanato	$Abs \leq 0,5$		Bla	
Grês	$0,5 < Abs \leq 3$	AI	BIb	CI
Semigrês	$3 < Abs \leq 6$	AlIa	BIa	CIa
Semiporoso	$6 < Abs \leq 10$	AlIb	BIb	CIb
Poroso	$Abs > 10$	AlII	BIII	CIII

Fonte: NBR ISO 13006: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação (2020)

Para a norma internacional UNI EN 14411 (2016) a classificação também é feita com base somente na absorção de água e método de conformação, onde as placas cerâmicas são classificadas em oito grupos: os do grupo A que são das placas extrudadas, e os do grupo B que são das placas prensadas. Os grupos I são aqueles com baixa absorção ($\leq 3\%$), os grupo II com média absorção ($3\% \leq ABS \leq 10\%$) e os grupos III com alta absorção ($>10\%$).

A norma americana ASTM/ANSI C-973-88, que regulamenta as placas cerâmicas através da absorção de água, classifica-as de vitrificadas a não vitrificadas. A Tabela 2 mostra essa classificação levando em consideração a vitrificação do revestimento cerâmico.

Tabela 2 – Classificação segundo a vitrificação das placas cerâmicas

Placas Prensadas	Absorção de Água (%)			
	$AA \leq 0,5$	$0,5 < AA \leq 3$	$3 < AA \leq 7$	$7 < AA \leq 18$
Piso	Muito Vitrificado	Vitrificado	Semi vitrificado	Não Vitrificado
Revestimento			Semi vitrificado	Não Vitrificado

Fonte: ASTM/ANSI C-973-88 (1980)

Observa-se que a categoria das placas cerâmicas prensadas, com baixa absorção de água, são tituladas como muito vitrificadas, o que corresponde a uma absorção $\leq 0,5\%$, enquanto que as placas com alta absorção de água, são denominadas como não vitrificadas e a taxa de absorção fica entre 7% a 18%. Na Tabela 3 mostra a classificação dos revestimentos cerâmicos segundo as características físicas obtidas por prensagem, de acordo com a resistência à flexão (MPa) e a absorção de água (%), onde elas se comportam de maneira inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o módulo de resistência à flexão, menor será a absorção de água.

Tabela 3 – Classificação das placas prensadas segundo suas características físicas

Produto	Absorção de água (%)	Módulo de resistência à flexão (Mpa)
Grês porcelanato	$Abs \leq 0,5$	≥ 35
Grês	$0,5 < Abs \leq 3$	≥ 30
Semigrês	$3 < Abs \leq 6$	≥ 22
Semiporoso	$6 < Abs \leq 10$	≥ 18
Poroso	$Abs > 10$	≥ 15 para espessura $\geq 7,5$ mm

Fonte: NBR ISO 13006: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação (2020)

As características finais de um revestimento cerâmico dependem, de um modo geral, principalmente da seleção cuidadosa e detalhada das matérias-primas, as proporções a serem utilizadas na massa cerâmica e as condições de processamento (compactação e queima). Sendo o controle de qualidade realizado através de ensaios químicos e físicos para avaliar o desempenho dos materiais cerâmicos e verificar se apresentam uma estrutura compatível com o produto ou algum defeito advindo do processo de fabricação e se estão de acordo com as características exigidas por norma (SOARES, 2010). Além disso, cabe ressaltar que as características das placas cerâmicas dependem de suas propriedades químicas, características amorfas ou cristalinas e das transformações que passam nas etapas de processamento (HOTZA, 2007).

3.1.1 Revestimento cerâmico grês porcelanato e grês

O revestimento cerâmico grês porcelanato é utilizado em paredes e pisos, possui baixa porosidade e elevado desempenho técnico, podendo ser esmaltada ou não, natural ou polida, retificada ou não retificada. São produzidos com alta tecnologia, sua queima ocorre à alta temperatura, entre 1200 e 1230°C, são caracterizados pelo seu modo de produção e possuem diversas aplicações, pois suas características químicas, físicas e mecânicas variam em função da composição química, entre as principais características se destacam a sua massa homogênea, uniformidade de coloração, baixos valores de absorção de água, o que provoca uma baixíssima expansão por umidade, ($\leq 0,5\%$ para o porcelanato esmaltado e $\leq 0,1\%$ para o porcelanato técnico), alta resistência mecânica (≥ 45 Mpa, tanto para o porcelanato esmaltado como o técnico) e resistência ao desgaste (NBR 15463, 2013; JERMOLOVICIUS; MOLISANI, 2018).

Segundo Sánchez *et al.* (2010) o grês porcelanato é um produto bastante compacto, vitrificado em sua totalidade e com baixíssima porosidade, essa característica confere ao material excelentes propriedades mecânicas e químicas, tornando-o resistente ao gelo e, portanto, ideal para pisos externos e revestimento de paredes em climas frios. É altamente resistente a substâncias químicas e agentes de limpeza, tem alta resistência a abrasão física e química e alto índice de quebra, o que o torna útil para áreas industriais e de alto tráfego, além de ser fácil limpeza, e, portanto, excelente para pavimentar áreas onde a higiene é fundamental.

Para a produção do porcelanato, o primeiro passo, é a escolha das matérias-primas, visto que quanto melhor a matéria-prima a ser utilizada, melhor será o produto final, e justamente por conta dessa complexidade de produção, atraiu a atenção de pesquisadores, que demonstram em suas análises que a qualidade do feldspato pode causar uma grande variação nas propriedades pós-queima dos produtos, que é justamente onde afeta a produção dos porcelanatos (FRIZZO *et al.*, 2020).

O revestimento grês é um produto com uma qualidade um pouco inferior ao porcelanato, podem ser classificados, dependendo de sua superfície, em esmaltados ou não esmaltados, apresentando uma absorção de água entre 0,5% e 3% após a queima, mas também evidencia-se uma tendência, ainda que não generalizada, de placas cerâmicas com valores de absorção de água muito próximos àqueles do porcelanato (~1%), o que o torna resistente a impactos mecânicos, gelo e choques térmicos além disso os revestimentos podem ser conformados por extrusão ou prensagem, sendo empregados como pavimento para recobrimento em ambientes externos e internos, sendo um produto resistente e versátil (OLIVEIRA; HOTZA 2015).

3.1.2 Revestimento cerâmico poroso

Segundo Costa *et al.* (2022), para produzir materiais cerâmicos porosos, é importante caracterizar as matérias-primas, que serão utilizadas, quanto a sua composição química, granulometria e realizar ensaios que irão analisar as propriedades físicas, mecânica e tecnológicas, o não conhecimento desses estudos pode comprometer o produto final.

Nos últimos anos, devido ao enorme interesse demonstrado tanto pelos fabricantes como pelo mercado, os produtos de revestimento cerâmico poroso ou de parede assumiram grande importância. Esse tipo de produto cerâmico pertence ao grupo BIII, de acordo com a NBR 13006 (2020), e possuem como características uma alta estabilidade dimensional durante a queima, absorção de água superior a 10%, tensão de ruptura a flexão sendo maior ou igual a 15 Mpa para placas com espessura inferior a 7,5mm e maior ou igual a 12 Mpa para placas com espessura superior a 7,5mm, entre outras características que pode ser observada na Tabela 4. Tais produtos são geralmente empregados nos interiores das residências e são conhecidos, popularmente, como azulejos (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Tabela 4 – Características técnicas de revestimentos porosos

Características	Norma	Valores prescritos por norma	Valores reais dos produtos
Absorção de água	EN 99	> 10 %	13-18 %
Resistencia a flexão media	EN 100	≥ 12 MPa	> 20 MPa
Resistencia a abrasão	EN 154	Por acordo	Especificada pelo fabricante
Resistencia ao gretamento	EN 105	Não gretar	Não gretar
Expansão térmica linear	EN 103	Por acordo	70 a 75 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹
Resistencia a produtos químicos domésticos	EN 122	A declarar	A declarar
Resistencia ao choque térmico	EN 104	Não gretar	Não gretar
Dureza Mohs	EN 101	Por acordo	4 (parede); 5 (piso)
Resistencia a ácidos e bases	EN 122	A declarar	A declarar
Resistencia a manchas	EN 122	Por acordo	2

Fonte: UNI EN159 (1992)

3.2 INDÚSTRIA DE REVESTIMENTO CERÂMICO BRASILEIRO

Segundo Oliveira e Hotza (2015) a indústria de revestimento cerâmico no Brasil surgiu a partir das antigas fábricas de telhas, blocos e tijolos, que começaram a produzir ladrilhos hidráulicos no início do século XX e, com o passar dos anos, placas cerâmicas e azulejos. Mas, somente por volta da década de 70 que a produção de revestimentos cerâmicos obteve números expressivos em relação a demanda contínua, determinando assim o surgimento de uma grande quantidade de empresas. A tecnologia construtiva brasileira, baseada no projeto e na construção

com sistemas de vedação majoritariamente em alvenaria de blocos, assegura um elevado potencial de utilização da cerâmica de revestimento, o que reflete a preferência do consumidor brasileiro e a expansão da sua utilização em vários ambientes das construções.

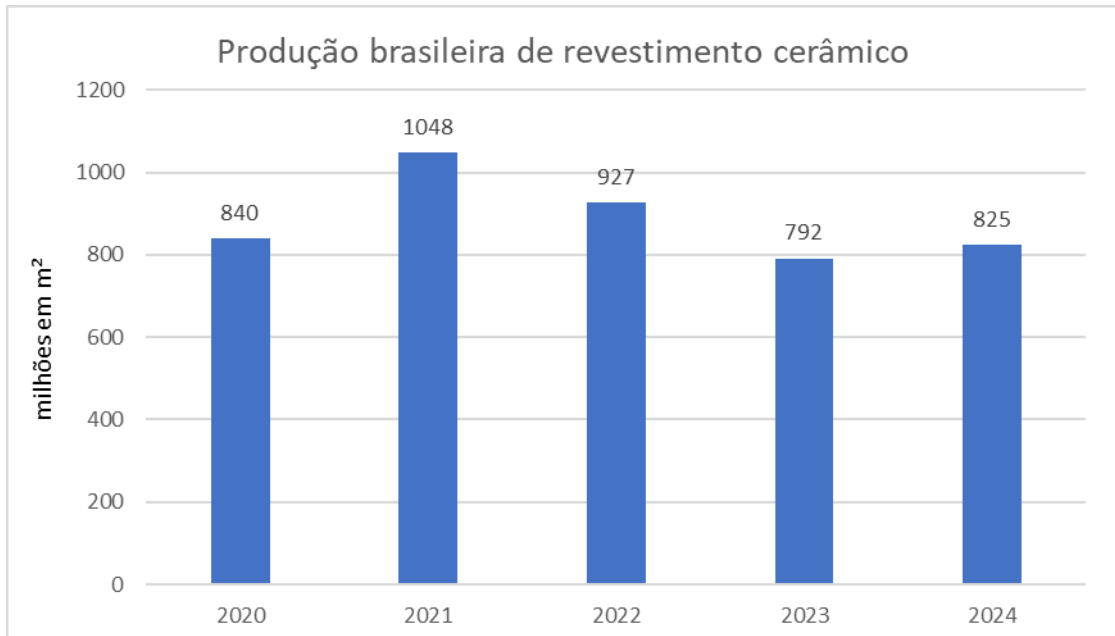
De acordo com Padro e Breassiane (2013) a indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tanto na geração de divisas como na geração de empregos, destacando-se dentro desse segmento, o de revestimento cerâmico que faz parte dos que mais contribuem positivamente no mercado da cerâmica nacional. A indústria de revestimento cerâmico integra o ramo de produtos de minerais não-metálicos da indústria de transformação, tendo como atividade a produção de pisos e azulejos, que juntamente com a cerâmica estrutural vermelha (telhas, tijolos e outros refratários), o vidro e as louças, representam uma cadeia produtiva que fazem parte do complexo industrial de materiais de construção (CONSTANTINO; ROSA; CORRÊA, 2006).

O setor cerâmico brasileiro tem apresentado um aumento significativo na sua produção nos últimos 15 anos, sendo o terceiro maior produtor mundial com uma produção de 825 milhões de m² de revestimento cerâmico, enquanto a China e a Índia possuem uma produção de 6.150 e 2.350 milhões de m², respectivamente (ANFACER, 2024).

O Brasil possui, atualmente, 99 marcas e 82 empresas, sendo que destas, 9 possuem mais de uma marca (ABCERAM, 2023) e é distribuído em 18 estados, onde as regiões de maior destaque em concentrações produtivas são a Sul, Sudeste e Nordeste, sendo o estado de São Paulo o que mais reúne empresas do setor de revestimento cerâmico, representando cerca de 70% de toda produção nacional do segmento e empregando um faixa de 12.500 trabalhadores, de acordo com a Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento (ASPACER, 2016).

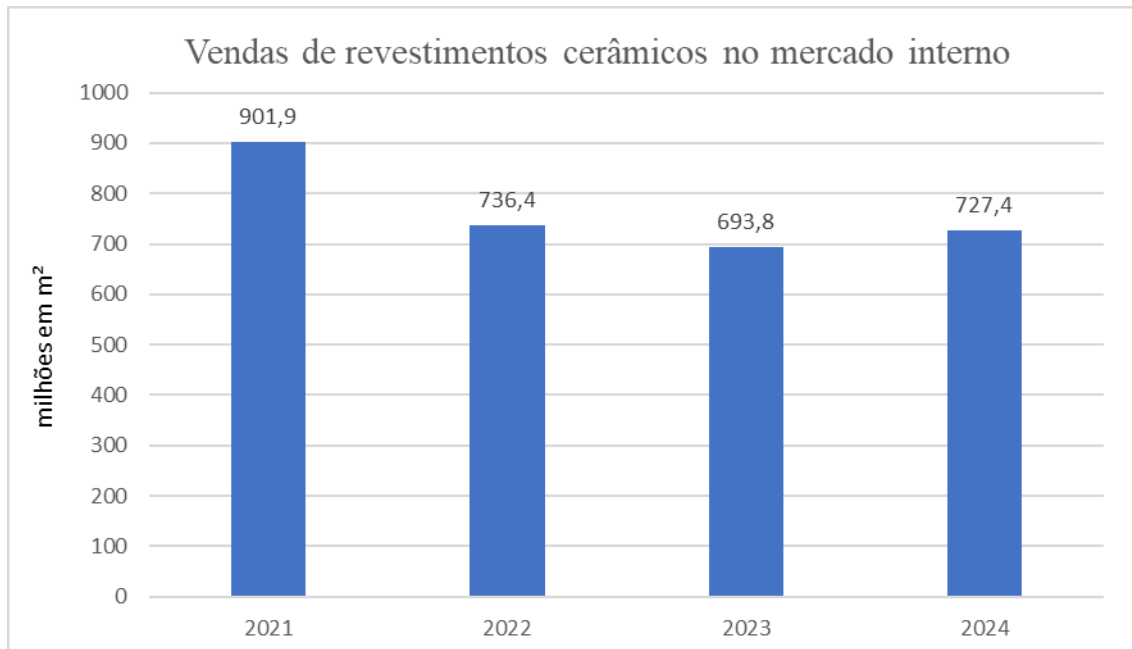
Segundo o último levantamento feito pela ANFACER em 2024, as vendas no mercado interno brasileiro foram de 727,4 milhões de m². De 2020 à 2024, a média de produção foi aproximadamente de 887 milhões de m² e, de 2021 à 2024, as vendas de consumo interno do Brasil obteve valores aproximadamente de 765 milhões de m², conforme ilustram os Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – Produção brasileira de revestimento cerâmico



Fonte: Adaptado de ANFACER (2024)

Gráfico 2 – Vendas de revestimento cerâmico no mercado interno do Brasil

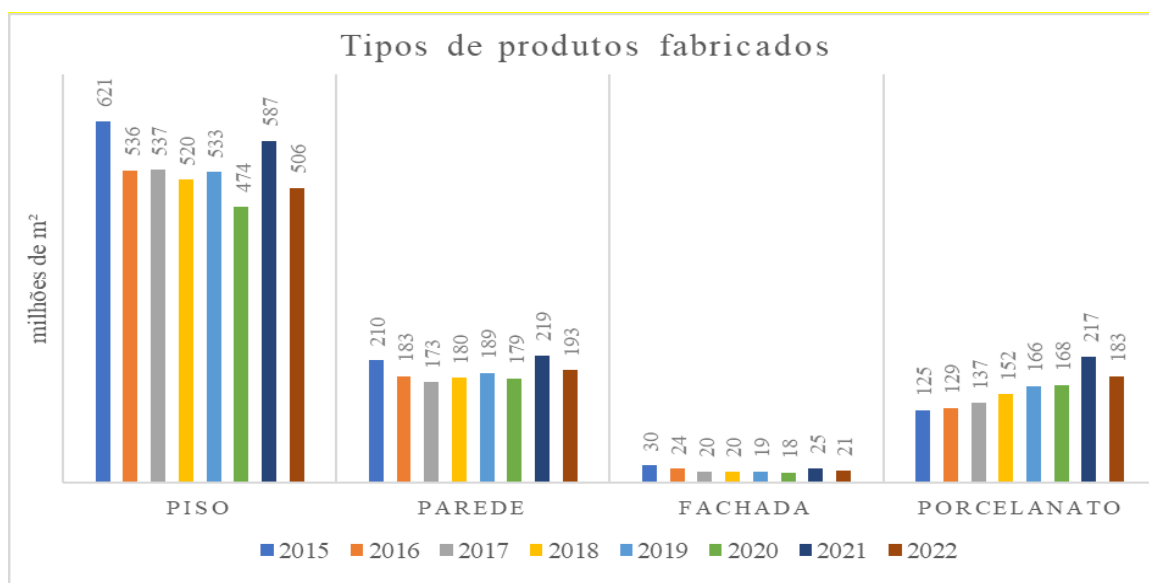


Fonte: Adaptado da ANFACER (2024)

O Gráfico 3 mostra o percentual de produção dos tipos de produto de revestimento cerâmico fabricado no Brasil do ano de 2015 até ao ano de 2022, onde pode se observar que a produção de revestimento para pisos ocupa o primeiro lugar da produção nacional, para paredes o segundo lugar, porcelanato o terceiro lugar e para as fachadas o quarto lugar, correspondendo a, respectivamente, 54,58%,

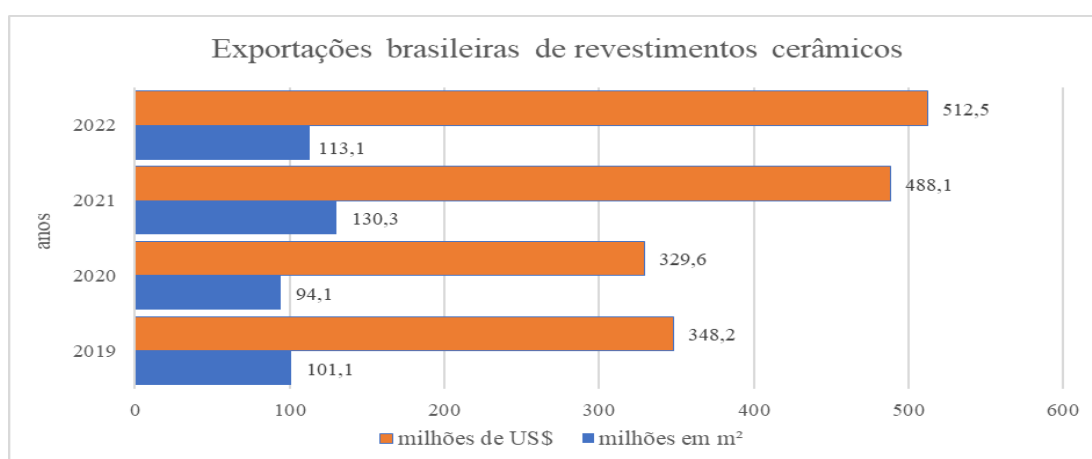
20,82%, 19,74% e 2,27% de toda a produção do ano de 2022. Em 2020, o Brasil exportou para mais de 110 países, totalizando aproximadamente 94 milhões de m², o que gerou uma receita de US\$ 330 milhões, como mostra o gráfico 4. Essas exportações têm como principais destinos a América do Sul, América Central e Caribe.

Gráfico 3 – Tipos de produtos fabricados no Brasil



Fonte: Adaptado da ANFACER (2022)

Gráfico 4 – Exportações brasileira de revestimentos cerâmicos e sua receita



Fonte: Adaptado da ANFACER (2022)

3.3 INDÚSTRIA CERÂMICA PIAUIENSE

A indústria cerâmica piauiense é pouco desenvolvida se comparado aos estados das regiões Sudeste e Sul, como por exemplo, São Paulo, Santa Catarina e Rio de Janeiro. Vale ressaltar que produção de cerâmica no estado do Piauí

encontra-se restrita à fabricação de produtos como telha e tijolos, sendo baixa a produção de revestimento cerâmico, e que existe em algumas indústrias a falta de modernização, com processos de fabricação ultrapassados, baixo nível tecnológico, sem controle de variáveis nos processos de produção, mão de obra não qualificada com nível de escolaridade baixo, e tudo isso implica sobre o produto final, dificultando sua introdução no mercado de fora do estado, em termos de qualidade e preço (ALMEIDA, *et al.*, 2014).

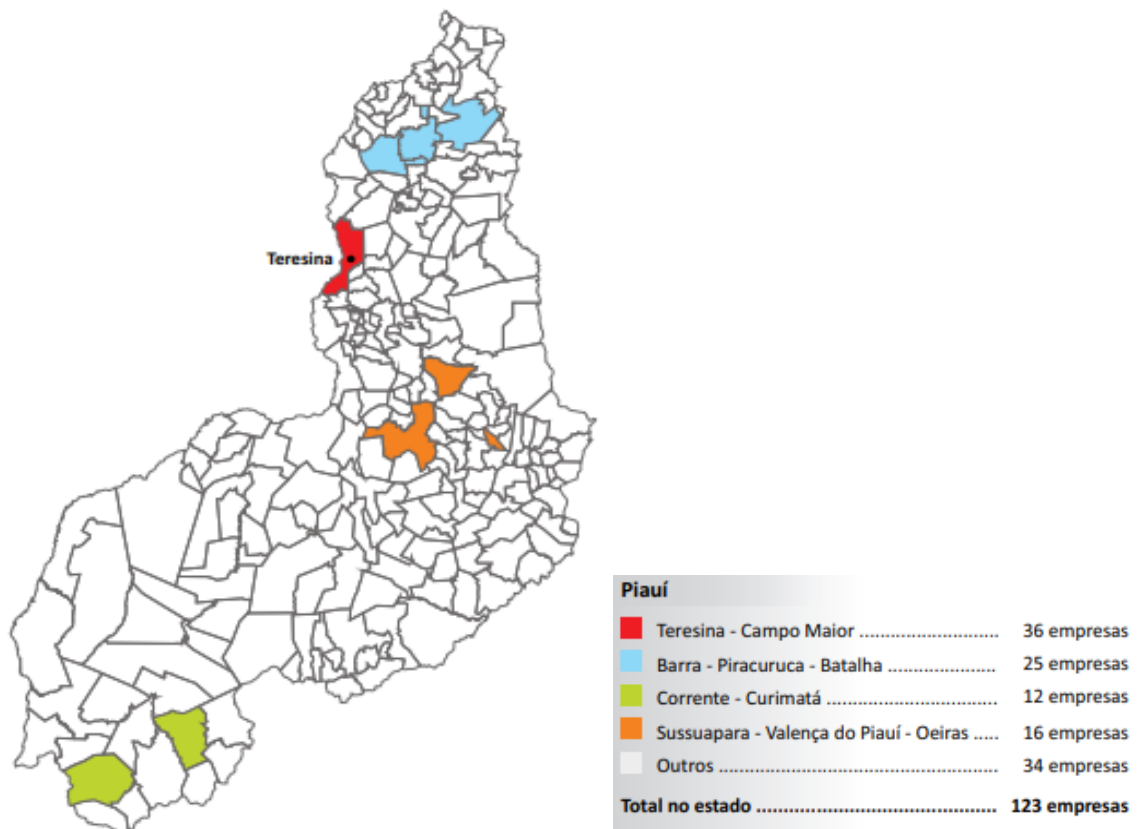
Segundo Soares (2010) a indústria de cerâmica de revestimento no estado do Piauí vem passando por dificuldades, decorrentes da perda significativa de produção, alto custo das matérias-primas, produtos considerados inferiores comparados a outros produtos provenientes de outros estados e o desconhecimento da potencialidade de outras matérias-primas que poderiam ser capazes de substituir outras na massa cerâmica sem perder suas propriedades ou até mesmo melhorá-las. É de suma importância destacar que até o último levantamento feito pela ABCERAM (2023), em relação as empresas voltadas para o revestimento cerâmico, o estado do Piauí não possui nenhuma indústria associada que esteja voltada para esse segmento.

Apesar das adversidades mencionadas, o panorama das indústrias cerâmicas no Piauí voltadas para produção de cerâmica vermelha estrutural é de grande relevância, e isso se deve ao fato da enorme disponibilidade da matéria-prima apropriada, além de um menor custo de instalação que esse segmento exige para a fabricação do produto final, que são de fácil penetração no mercado interno (ALVES, 2016). Por possuir grandes jazidas de argila de boa qualidade para cerâmica vermelha, principalmente nas margens dos rios Poti e Parnaíba, sendo responsável por 70% da extração de argila do estado, em torno de 800.000 mil toneladas, o polo cerâmico de Teresina é o mais importante do Piauí, que acaba abastecendo também as cerâmicas localizadas em Timon, no estado do Maranhão (CEPRO, 2005).

De acordo com o INT (Instituto Nacional de Tecnologia, 2017) os principais polos de produção do estado do Piauí estão distribuídos em Teresina – Campo Maior, Barra – Piracuruca – Batalha, Corrente – Curimatá e Sussuapara – Valença do Piauí – Oeiras, onde estão instaladas 123 empresas ao todo, conforme ilustrado na Figura 1, produzindo cerca de 77.000 milheiros/mês, com predominância de blocos cerâmicos, seguida de telhas prensadas e extrusadas, e em menor quantidade, canaletas e blocos estruturais. A produção média por empresa é de 620

milheiros/empresa.mês, com 87% delas entre 500 e 1.000 milheiros/mês e 13% abaixo de 300 milheiros/mês, o polo que detém a maior concentração de indústrias de cerâmica vermelha com produção total de 32.400 milheiros/mês é o de Teresina – Campo Maior e ainda utilizam como combustível a lenha de eucalipto e lenha nativa de plano de manejo. O forno mais empregado é o do tipo abóboda e representa cerca de 80% do parque produtivo, o forno do tipo Hoffman representa uma parcela de 11%, e o restante é composto por fornos de tipos variados, como Paulistinha, Federico e Campanha.

Figura 1 – Principais polos de produção de cerâmica vermelha no estado do Piauí



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia (2017)

3.4 MATÉRIAS-PRIMAS

Na produção dos revestimentos cerâmicos, não existe uma matéria-prima que, sozinha, apresente todas as características suficientes e necessárias para se ter uma boa formulação (estabilidade dimensional, boa fundência, cor de queima),

dessa forma, é de suma importância preparar uma mistura com várias matérias-primas com diferentes características afim de otimizar o produto final (GIBERTONI; PAULIN; MORELLI, 2005).

Segundo Souza *et al.* (2000) a seleção dessas matérias-primas que compõe a massa cerâmica deve levar em consideração os meios para atingir a rentabilidade adequada, a possibilidade de coleta e exploração dos minerais, e, além disso, precisa atender as propriedades requeridas ao produto e as características inerentes ao processo de fabricação, que dependem tanto da composição mineralógica como química de cada matéria-prima utilizada. As massas cerâmicas para revestimento são formuladas por uma mistura triaxial de matérias-primas plásticas, que são os minerais argilosos, não plásticas, que são os fundentes e refratárias, e pelos aditivos, favorecendo a formação de fases cerâmicas e vítreas (TARVORNPANICH; SOUSA; LEE, 2008).

De acordo com Cabral Júnior *et al.* (2019) as matérias-primas plásticas conferem importantes características na fase de conformação da peça, tais como a resistência mecânica e a trabalhabilidade (plasticidade), e além disso, na etapa de processamento térmico (sinterização) conferem características como estrutura e cor. Já as matérias-primas não plásticas atuam nas fases de: conformação, quando é necessário fazer alguma adequação na plasticidade do material; secagem, diminuindo a retração das peças e por consequência favorecendo-a; e no processamento térmico, quando controlam as deformações, transformações e a sinterização, desempenhando um dos papéis mais relevantes, ainda cabe ressaltar que esses materiais podem se apresentar ainda como inertes, fundentes e vitrificantes na fase de queima.

De acordo com Silva (2011) em todas as operações que visam reduzir a fusão é necessária a utilização de um material fundente, visto que as impurezas têm ponto de fusão acima da temperatura de operação do forno, então o fundente tem por função tornar essas impurezas mais facilmente fusíveis, combinando-se entre elas, quimicamente, formando um composto que possui um ponto de fusão inferior que os da escória, além disso, também tem papel fundamental na influência sobre a viscosidade da escória, pois, a diminuição dessa viscosidade facilita a cal pela escória e dificulta a formação de uma camada composta de silicato. O feldspato, calcário (dolomita), óxidos de potássio, óxidos de sódio, areia (quartzo), filito e

resíduos de mineração são os principais fundentes na produção de revestimento cerâmico (AVELINO, 2017).

Para prever o comportamento da massa durante o processo de fabricação e quais as características do produto final é de suma importância o conhecimento da composição mineralógica (fases cristalinas) e química (óxidos presentes). Nas matérias-primas de uma massa cerâmica de revestimento os principais óxidos encontrados são óxido de silício (SiO_2), óxido de potássio (K_2O), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO) e óxido de ferro, onde cada um possui uma função específica durante o processo produtivo e irá atribuir as propriedades finais do revestimento cerâmico (SOARES, 2010).

3.4.1 Argila

Segundo a NBR 6502 (2022), as argilas são compostas por partículas inferior a 0,005 mm, com alta plasticidade quando úmida e que, quando seca, formam torrões que são dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos. A argila é uma matéria-prima natural comumente utilizada na preparação de uma grande quantidade de massas cerâmicas de revestimento cerâmico, sendo a principal matéria-prima para sua produção (ROCHA; SUAREZ; GUIMARÃES; 2014).

Em relação à composição, são materiais formados por argilominerais de silicatos e óxidos de alumínio, ferro e magnésio. Em razão destas particularidades, as argilas são materiais muito heterogêneos cujas características dependem de sua formação geológica, bem como o local de extração, sendo, portanto, classificadas pela sua origem, composição química, limites de Atterberg e concentração dos argilominerais (RAMOS *et al.*, 2019).

Os materiais relacionados à cerâmica vermelha englobam diversos materiais que são frequentemente utilizados na construção civil, como blocos, telhas, tijolos maciços, entre outros (AGUIAR, 2022). A maioria das propriedades das argilas para uma determinada finalidade advém dos argilominerais presentes, os quais se apresentam com variações quanto à cristalinidade. Podem estar acompanhados de outros minerais não argilosos tais como quartzo, feldspatos, calcita, hematita, mica, etc. estes normalmente com granulometria $2\mu\text{m}$ (MORENO, 2012).

A argila tem função de fornecer as características plásticas para garantir as melhores propriedades durante a compactação do corpo cerâmico e resistência mecânica seca, úmida e após a queima, além disso, tem um processamento simples e a sua disponibilidade são em grandes quantidades (RODRIGUES *et al.*, 2004). Geralmente, no processo de preparação da massa de revestimentos cerâmicos, são usadas mais um de tipo argila, ou seja, existe uma mistura entre elas, como as argilas ilíticas (plásticas) e as caulínicas (pouco plásticas), o que desenvolvem uma série de funções no processamento ou após a queima, como: facilitar a fluidez devido as suas propriedades fundentes proporcionarem uma boa densidade na queima e uma ótima resistência mecânica; a cor de queima branca; atuam como ligantes e plastificantes (BIFFI, 2006).

Para a utilização das argilas em processos industriais é importante e indispensável uma identificação completa do tipo de argila e de suas propriedades, para estabelecer quais as formulações e condições de processamento são mais adequadas para se obter produtos com as propriedades finais desejadas. As propriedades do produto final estão estreitamente relacionadas às características iniciais das matérias-primas, como granulometria, plasticidade e composição mineralógica. Além de melhorar das propriedades do produto final, possibilita ao fabricante flexibilidade, redução de custos de produção e aumento no valor agregado de seu produto. Assim, o conhecimento das características das argilas não tem valor apenas acadêmico, mas também grande interesse comercial (MACEDO, 2008).

3.4.2 Feldspato

Os feldspatos são minerais que têm função de diminuir a temperatura de formação de fase líquida durante a etapa de queima, sendo conhecidos por serem materiais fundentes, também são definidos como sílico-aluminatos de metais alcalinos e alcalinos terrosos, divididos nos seguintes tipos: Albita (feldspato sódico); Ortoclássio (feldspato potássico) Anortita (feldspato cálcico), sendo que os dois últimos são os fundentes mais utilizados em composições de porcelanato (BIFFI, 2006; CHATTERJEE *et al.*, 2001).

Dessa forma, os feldspatos são os responsáveis iniciais do processo de densificação, o que contribui significativamente para a densificação das peças e,

consequentemente para as propriedades desejadas dos revestimentos cerâmicos (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005). O feldspato é o fundente mais utilizado na indústria cerâmica, com destaque pra produção de porcelanatos, Vale ressaltar, que o feldspato só adquire a função de fundente em temperatura superior a 1100°C, em baixa temperatura se comporta como inerte (SOARES, 2010).

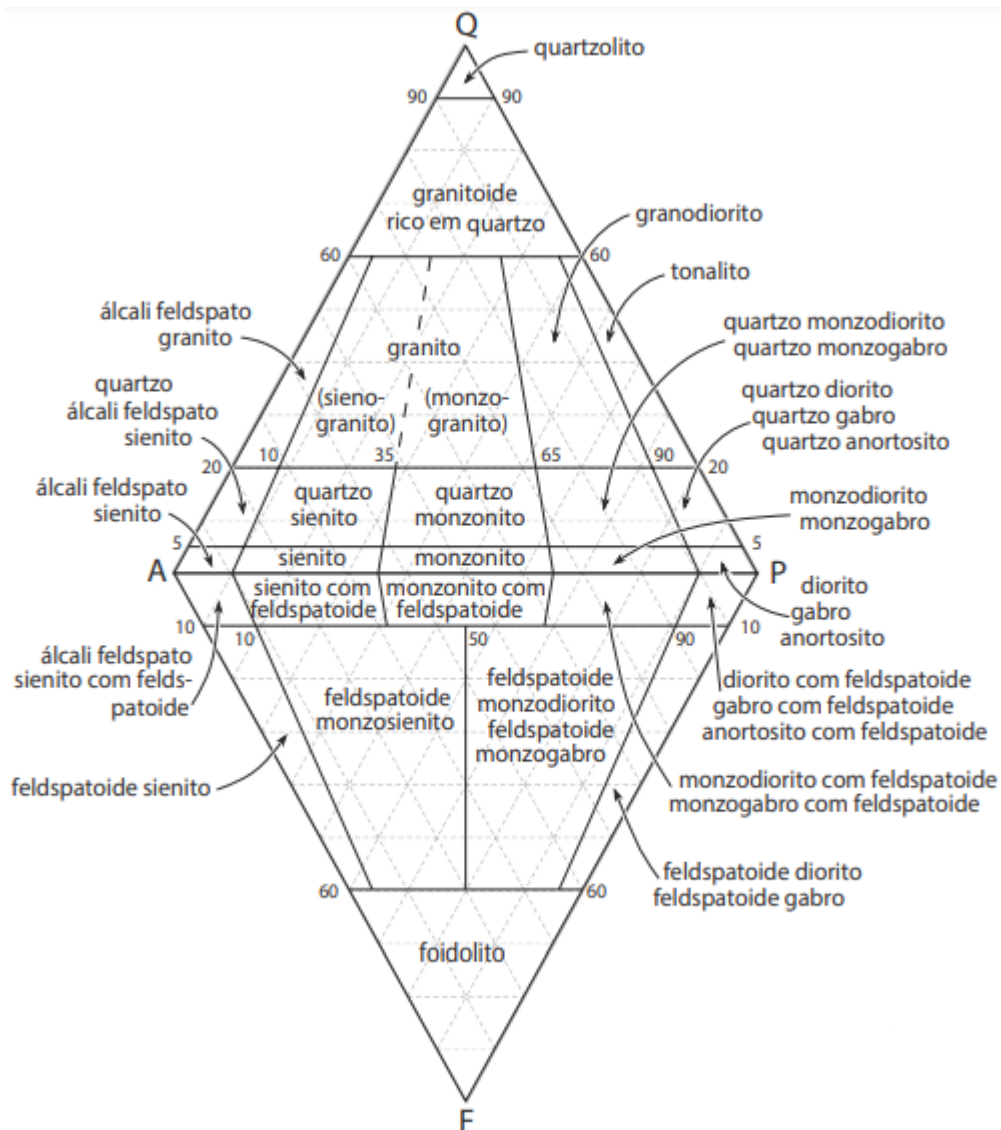
Segundo Biffi (2006) o comportamento cerâmico mais característico dos minerais feldspáticos é a notável fusibilidade e a formação, com os outros elementos presentes, de eutéticos que possibilitam atingir a gresificação mesmo a temperaturas relativamente baixas, elemento básico para as propriedades fundentes, é o teor de álcalis no mineral, o valor teórico de Na₂O e de K₂O respectivamente nos feldspatos sódico e potássico, é de 11,8% e 16,9%, quanto mais o teor em álcalis se aproxima do valor teórico, mais aumenta o valor do feldspato.

3.4.3 Rocha granítica

De acordo com o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP, 2022) o granito e outras rochas da família dos granitos são rochas resistentes e duras amplamente utilizadas na construção civil (revestimento de pisos, pavimentos, brita) e possuem o maior percentual de distribuição da crosta terrestre, sendo formado quando o magma resfria lentamente em profundidade, o que permite promover o crescimento de minerais.

As rochas graníticas são rochas magmáticas, plutônicas, constituídas essencialmente por feldspato e quartzo que perfazem geralmente 80% do granito, por isso o granito é considerado uma rocha félsica (clara). Para além desses minerais também pode ocorrer a presença de minerais característicos como a muscovita, biotita, epídoto. A classificação dessas rochas é feita a partir do diagrama QAPF, concebido por Streckeisen (1967), a Figura 2 ilustra as rochas plutônicas.

Figura 2 – Classificação das rochas ígneas plutônicas



Fonte: Streckeisen (1967) e Wernick (2003)

As rochas plutônicas graníticas formadas superficialmente nas câmaras do magma, onde possui baixa concentração de H_2O , podem exibir feldspatos intermediários com concentrações menores do que os cristais separados de ortoclásios e plagioclásios. Quando ocorre o predomínio do plagioclásio sobre o feldspato alcalino a rocha é denominada de monzogranito, já se o predomínio for do feldspato alcalino a rocha é denominada de sienogranito (WINTER, 2010).

O Monzogranito é um tipo de rocha ígnea granítica que é considerada produto do fracionamento final do magma e pode ser utilizada como fundente, dentro da indústria de cerâmica, quando em sua composição possuir mineralogia primária.

Essa rocha possui granulação de média a grossa, nas cores preto, cinza, laranja, branco, rosa, que é determinada por conta da cor do feldspato alcalino, por conta do seu processo de cristalização em profundidade é rica em sílica (SiO_2). Em geral caracteriza-se por possuir uma estrutura isotrópica, podendo localmente, mostrar uma fraca anisotropia (IGc-USP, 2022).

3.4.4 Rocha Anfibolito

Segundo Coutinho *et al.* (2007) o termo anfibolito foi proposto pela primeira vez pelo cientista francês Alexandre Brongniart em 1813. Embora ele tenha definido anfibolito como uma rocha formada por anfibólio e plagioclásio, o significado do termo era bastante inconsistente nos primeiros anos após sua introdução.

Atualmente, segundo as recomendações da Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR) da International Union of Geological Sciences (IUGS), o anfibolito é classificado como uma rocha metamórfica gnáissica ou granofélsica consistindo principalmente de anfibólio verde (hornblenda), marrom ou preto e plagioclásio (incluindo albita), que combinados constituem mais de 75% da rocha, e é resultado do metamorfismo de rochas ígneas máficas (FETTES; DESMONS, 2007; IGc-USP, 2022).

O anfibolito pode se originar de rochas ígneas básicas, como gabro e basalto (classificados como orto-anfibolitos), ou de rochas sedimentares, como calcários com impurezas (conhecidos como para-anfibolitos). Também pode ser formado a partir de combinações, como rochas vulcanoquímicas, e se formam principalmente em contextos de orogêneses colisionais, sob temperaturas que abrangem uma faixa de 150°C a 850°C (BUCHER, 2011). Sua estrutura pode variar entre maciça, bandada ou, mais frequentemente, apresentar lineação e textura nematoblástica.

De acordo com Kocak *et al.* (2007) a análise da química mineral em anfibolitos tem se revelado uma ferramenta eficaz para determinar as condições metamórficas, especialmente no que diz respeito à temperatura e pressão. Isso se deve à presença de plagioclásio e hornblenda, cuja associação contém importantes indicadores geotermométricos e geobarométricos.

Essa rocha é amplamente utilizada na construção civil, devido à sua resistência e durabilidade, sendo aplicada como brita, revestimento de pisos ou paredes, e em pavimentações. Geologicamente, o anfibolito é importante para

estudos de ambientes metamórficos, pois indica condições específicas de pressão e temperatura, auxiliando na reconstrução de processos geodinâmicos.

3.4.5 Calcário

O calcário é uma rocha sedimentar originada de material precipitado por agentes químicos e orgânicos, é composta principalmente de carbonato de cálcio e pode aparecer na forma de calcita (CaCO_3) ou aragonita, que se diferenciam na estrutura cristalina. O cálcio é um dos elementos mais comum, sendo estimado entre 3% a 4% da crosta terrestre, entretanto, quando constituinte dos calcários tem origem nas rochas ígneas (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

O uso do calcário nas massas provoca uma coloração mais clara e melhora a dilatação térmica, além de aumentar a resistência mecânica, sendo introduzidos sob forma de pó fino e às vezes até mesmo pelas próprias argilas como composto de cálcio. Na indústria de revestimento cerâmico os calcários são usados para fabricação de alguns tipos de pisos e azulejos (SENAI, 2006).

De acordo com Soares (2010) as matérias-primas carbonáceas, como a calcita, são de fundamental importância na produção do biscoito de revestimento poroso, conseguindo um rigoroso controle dimensional, aumento da resistência mecânica, porosidade adequada e a diminuição da hidratabilidade da peça, pode atingir proporções maiores que 20% na composição da massa, entretanto o recomendável varia entre 10% à 19 % para evitar problemas de expansão por umidade devido a sensível diminuição da resistência mecânica decorrente do excesso de poros na peça ou a pouca proporção de fases cristalinas resistentes a ação da umidade.

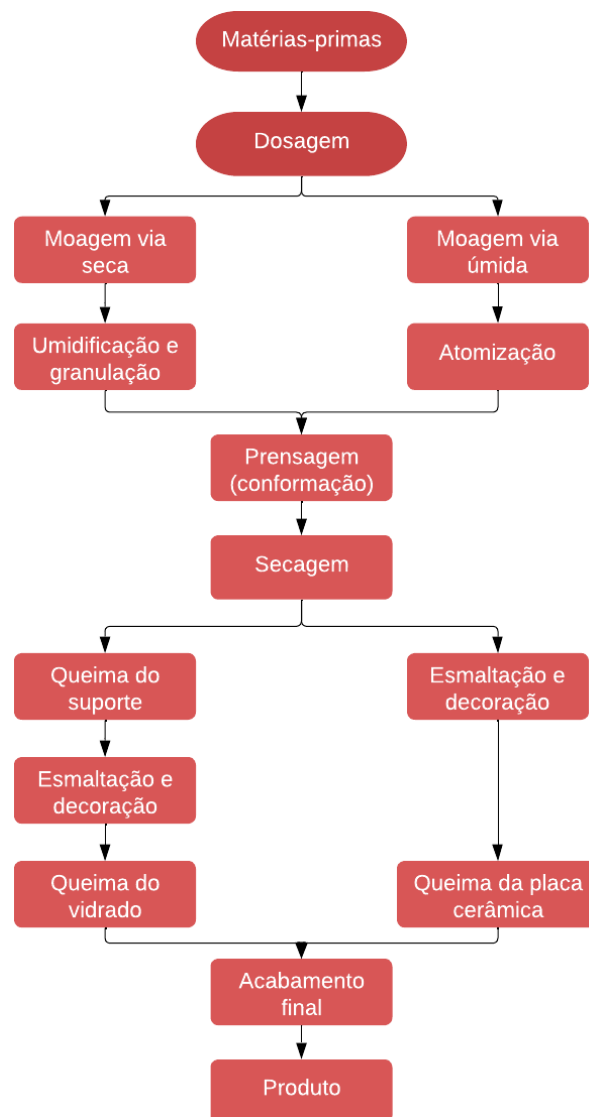
3.5 PROCESSO PRODUTIVO DO REVESTIMENTO CERÂMICO

A produção do revestimento cerâmico é realizada em várias etapas, variando de acordo com cada produto acabado, as quais abrangem desde a obtenção da argila até a obtenção do produto final, através das transformações químicas e físicas (FRAMINAN; LEISTEN; GARCÍA, 2014). Além das matérias-primas que compõem a massa, o processo produtivo e o controle das suas variáveis, que avaliam as interações entre os aspectos tecnológicos e os parâmetros de processamento das

etapas do processo, são importantes para as características finais do produto, por exemplo, os baixos valores de porosidade e absorção de água, e para obter esses teores é implicado na determinação do processamento da massa, como secagem e queima (EMMERICH; STEUDEL, 2016).

Segundo a ABCERAM (2023) os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcialmente ou totalmente, geralmente possuindo etapas como: a preparação da matéria-prima e da massa, prensagem, secagem, queima, e pôr fim a inspeção, estocagem e expedição dos produtos acabados. A Figura 3 apresenta o fluxograma de fabricação das placas cerâmicas com a massa preparada tanto por via seca como por via úmida.

Figura 3 – Processo produtivo das placas cerâmicas



Fonte: Autor (2023)

De acordo com Soares (2010) na indústria de revestimento cerâmico piauiense o processo produtivo, geralmente inclui a dosagem da argila, moagem a seco e homogeneização, granulação da massa com teor de umidade em torno de 10%, prensagem em molde de 25 MPa, esmaltação e sinterização única (monoqueima).

3.5.1 Preparação das matérias-primas

A maioria das jazidas de argilas no Brasil estão situadas próximas ao leito dos rios e sua extração é realizada a céu aberto utilizando escavadeiras, retroescavadeiras, dragas e em último caso, quando o material possui certa dureza, são empregados explosivos. Após a extração, as matérias-primas devem ser depositadas em local que não interfira em outros processos e que não eleve o custo operacional, geralmente, a estocagem dos montes de argila é feita a céu aberto (SALES JÚNIOR, 2008; SOUTO, 2009).

Posteriormente, as matérias-primas ficam expostas a intempéries, como sol, vento, chuva, processo denominado como sazonalidade, onde o tempo de descanso varia de indústria para indústria já que está relacionado com a operacionalidade da empresa, mas geralmente esse período não extrapola os 12 meses. Essa etapa é de extrema importância para melhorar a qualidade do material cerâmico, como as propriedades de plasticidade e trabalhabilidade, já que quando são mantidas ao ar livre ganham partículas orgânicas e passam por um processo de fermentação (BARBOSA; COSTA; SANTOS, 2016).

3.5.2 Preparação da massa

O preparo da massa cerâmica é fundamental para a qualidade do produto a ser fabricado, quanto melhor esse preparo melhor será a produtividade e qualidade e menor o consumo energético e desgaste dos equipamentos, dessa forma após uma seleção criteriosa das matérias-primas, elas passam pelos processos de moagem e mistura. A moagem tem por objetivo a diminuição das partículas e a homogeneização das matérias-primas através da ação de corpos moedores que normalmente é realizada em moinhos de bolas de alta alumina, seu processo pode ser tanto por via seca como por via úmida, e o grau da moagem pode condicionar a

reatividade entre os componentes durante a sinterização e favorecer a formação de novos compostos de uma maneira um pouco mais intensa, favorece a criação de cristais e contribui para melhorar as características mecânicas do material queimado (LOLLI; NASSETI; MARINO, 2000; NANDI; MONTEIRO, 2009).

Em outras palavras, a moagem é a etapa onde o controle sobre a granulometria deve ser tal que garanta as condições de compactação e características finais do produto pós-queima, pois a falta de moagem ou a realização feita incorretamente pode provocar partículas grosseiras na massa e proporcionar uma desestabilidade dimensional comprometendo as propriedades do produto (SOARES, 2010).

De acordo com Oliveira e Hotza (2015), a moagem das matérias-primas cerâmicas para revestimento pode ser feita por via a seco ou por via úmida. Vale ressaltar que os materiais preparados por via úmida resultam em um melhor preenchimento dos moldes, portanto, possuem uma melhor qualidade e propriedades mecânicas, entretanto os materiais preparados por via seca resultam em uma redução do gasto energético, sendo 2,5 vezes menor que por via úmida (MATOS *et al.*, 2021).

O processo por via seca consiste na moagem das matérias-primas sem adição de água, enquanto por via úmida conta com a presença de água e posteriormente, atomização (secagem por spray) da suspensão ou barbotina obtida. O critério para escolha toma como base os tipos de matéria-prima, por exemplo, no processo úmido tem que existir a disposição de matérias-primas com diferentes características, que acontece com as massas de queima branca, já o processo a seco ocorre com predominância com as massas de queima vermelha, mas também podendo ser aplicada nas de queimas mais claras (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Segundo Setz e Silva (2019) a moagem a seco é realizada em argilas que contêm água em sua composição variando entre 4% a 10%, após o processo, o diâmetro das partículas de argila apresentam ordem em torno de 1,0 μ m, porém, ainda é necessário realizar a granulometria da argila, aumentando a espessura das partículas em, pelo menos, cinquenta vezes, para dessa forma proporcionar as propriedades apropriadas para o próximo processo que é a prensagem, visto que esse aumento facilita o preenchimento homogêneo do molde.

De acordo com Cabral Júnior *et al.* (2019) o processo de moagem por via úmida é iniciado com a dosagem das matérias-primas, de acordo com uma

formulação pré determinada, essa mistura é moída com umidade em torno de 40% e homogeneizada em moinhos de bola, em meio aquoso, seca e granulada por atomizador (spray dryer), por fim, é conformada por prensagem a seco, seguindo para a etapa de decoração e queima, onde é sinterizada nas condições de queima rápida com temperaturas próximas de 1200°C.

A atomização é o método mais utilizado para produzir grãos com densidade controlada e que demonstre um bom fluxo e capacidade de compactação, esse processo, inicialmente, consiste em realizar a formação de gotículas por centrifugação, por meio do uso da turbina, ou por cisalhamento, através da inserção de partículas de argila sob a alta pressão (18 a 22 atm), dessa forma vai percorrendo todo o atomizador até serem vencidas pela ação da gravidade, ligado com a ação do fluxo do gás da secagem. Após este processo, os grânulos atomizados são recolhidos, possuindo formatos praticamente esféricos e com os diâmetros desejados, onde os que contém granulometria maior são levados por conta da gravidade, já os com granulometria menor, sendo bastante finos são arrastados até os filtros de ar (AQUINO, 2015).

3.5.3 Prensagem

Segundo Maia (2012) a conformação das peças é o recurso utilizado para dar forma as peças e vem logo após a preparação da massa. Dentro da construção civil, as placas cerâmicas de revestimento podem ser conformadas de várias maneiras, entre elas, por extrusão, por prensagem ou por outros processos (NBR 15463, 2013).

A prensagem é uma técnica de conformação para as placas de porcelanato e para as placas cerâmicas de pisos e revestimentos, fundamentada na concentração da massa em um molde duro ou flexível através de uma compressão, utilizando prensas a partir de uma mistura moída e bem fina (NBR ISO 13006, 2020). É uma das etapas mais importantes do processo de produção do revestimento cerâmico, porque uma má compactação dos aglomerados pode acarretar vários problemas nas peças, comprometendo sua qualidade e suas características (SOARES, 2010).

Segundo Oliveira e Hotza (2015) o objetivo da conformação por prensagem, além da conformação, é obter, no estado cru ou verde, a maior densificação dos materiais compactos obtidos por meio da redução do volume e da quantidade de

poros, em outras palavras, busca-se a redução da porosidade interna e a obtenção de uma microestrutura adequada as características finais desejadas. Vale ressaltar que a pressão específica de compactação em geral, varia de 350 a 450 kg/cm² (BIFFI, 2006).

Segundo Albero (2000) a operação de prensagem compreende em três etapas: o preenchimento do molde, a compactação da massa e a extração da peça. E essa compactação se dá através de três mecanismos: o deslocamento e reordenação dos grânulos com redução do volume ocupado pelos poros intergranulares, a redução dos espaços intergranulares por deformação plástica e a reorganização e deslizamento das partículas com o objetivo de acomodação melhor e a densificação. Essa operação é a mais empregada pela indústria cerâmica devido a sua facilidade de automação, grande produtividade e capacidade de produção das peças com formas e tamanhos variados, sem contração de secagem e baixa tolerância dimensional (ALBERO, 2000).

A prensagem do material pode ser feita por meio de duas técnicas: a prensagem isostática e a prensagem uniaxial. A primeira é utilizada na fabricação de peças que possuem formas mais complexas, que apresentem relevos em mais de uma direção, ou em peças onde uma das dimensões é maior que as demais, como no caso de barras e tubos, entretanto, na segunda a compactação da massa é realizada em uma matriz rígida, onde é aplicada uma pressão na direção axial, e é utilizada para conformar peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem, e é a técnica mais empregada no processamento de materiais cerâmicos (ALBERO, 2001).

O processo de prensagem deve garantir que o material conformado possua uma microestrutura que garanta uma resistência mecânica após a secagem para poder suportar as várias solicitações ao longo do processo de produção, além de uma boa permeabilidade para que todas as reações que envolvam troca de gases se completem no tempo adequado e após isso, permita que o produto final apresente as características microestruturais desejadas, como tamanho do grão e distribuição dos poros, que determinarão as características técnicas da peça como absorção de água e resistência mecânica (SILVA *et al.*, 2021).

3.5.4 Secagem

A secagem é a etapa do processo produtivo, que segue após a conformação da peça cerâmica, onde ocorre a eliminação da umidade que continua no material proveniente da etapa de prensagem, e da água de forma lenta e gradual, para evitar tensões e, posteriormente, defeitos na peça. A água encontrada gira em torno de 16% e 26% dependendo das matérias-primas utilizadas durante o processo de preparação da massa, essa operação pode ser feita em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50°C e 150°C (ABCERAM, 2023; CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

Durante o processo, é importante tomar cuidado com a velocidade com que as peças passam pela secagem, porque se ocorrer de forma superficial e rápida pode levar ao aparecimento de fissuras quando a água interna tentar migrar para fora da peça (VIEIRA; FEITOSA; MONTEIRO, 2003). Vale ressaltar, que ainda para evitar as pequenas trincas e as fissuras, principalmente nas bordas da peça, deve-se ter o controle das variações dimensionais (retração), causadas pela secagem em função da quantidade de água liberada, mantendo a retração com valores compreendidos entre 0% e 0,3% no máximo, visto que o processo de secagem tem uma ótima correlação linear com o teor de umidade (AGUILELLA *et al.*, 2012).

Segundo Barbosa, Santos e Costa (2016) existem diferentes tipos de secagem usados para os produtos cerâmicos e a escolha depende do tempo de duração e do custo do processo, entre eles estão a secagem ao ar livre ou natural, no forno, câmara ou de túnel e artificial, se caracterizando como intermitente ou contínuo, dependendo do forno a ser utilizado, variando do mais rudimentar ao mais tecnológico e moderno.

De acordo com Sousa (2008), na secagem verifica-se um aumento da resistência mecânica da peça cerâmica que é atribuída a uma densificação causada pela atração das partículas e empacotamento que aumenta as suas forças de ligações. Os valores de tensão a ruptura à flexão devem ser superiores a 2,5 Mpa, o que suporta a manipulação de acabamento e do transporte necessários até a etapa de queima (HOLANDA; SILVA; PAES JÚNIOR, 2011).

3.5.5 Esmaltação e decoração

É a etapa do processo em que se aplica uma cobertura vitrificada impermeável (esmaltes cerâmicos, decorações e tintas) nas peças cerâmicas secas, que visa melhorar a estética final do revestimento. Geralmente se utiliza uma camada intermediária entre o engobe (suporte) e o esmalte que tem por objetivo eliminar as imperfeições da superfície do suporte, ocultar sua cor, impermeabilizar a peça e reduzir tanto a camada do vidrado como as interações indesejáveis na interface esmalte suporte (SOUSA, 2008).

De acordo com Martín (2004), a falta de consistência entre o esmalte e o suporte da cerâmica pode levar a defeitos no produto acabado, por exemplo, quando eles possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica, ou seja, quando se expandem e contraem em diferentes taxas em resposta às variações de temperatura, podem ocorrer problemas como deformações, empenamentos, gretamento e lascamento, portanto, é importante garantir a compatibilidade adequada entre o esmalte e o suporte da cerâmica em termos de suas propriedades de dilatação térmica, com o objetivo de minimizar as tensões geradas, e a melhor forma para isso é aplicar uma camada intermediária, chamada de engobe.

Segundo Oliveira e Hotza (2015) esse processo de esmaltção pode ocorrer tanto por via seca como por via úmida, dependendo apenas das características desejadas no produto, por exemplo, existem revestimentos que precisam de aplicações mais simples, como a de disco que exigem deposições de até 500g/m², e outras que necessitam de aplicações mais complexas com deposição de esmalte até 3kg/m², com até 20 aplicações diferentes. A criação dessas tipologias esmaltadas foi uma resposta das indústrias em relação à exigência do mercado que exigia produtos de boa qualidade e que fossem esteticamente aceitáveis para os ambientes internos em áreas privadas e públicas (BIFFI, 2006).

Segundo Barbosa *et al.* (2008) as características mais importantes dos esmaltes são sua elevada resistência a abrasão, resistência a manchas (limpabilidade), baixa permeabilidade e ausência de chumbo ou de alguma outra substância contaminante, portanto, com a aplicação do esmalte se busca também aumentar a impermeabilização, a resistência ao desgaste e resistência mecânica das peças e desenvolver propriedades estéticas, sendo essas etapas bem críticas na determinação da qualidade do produto final.

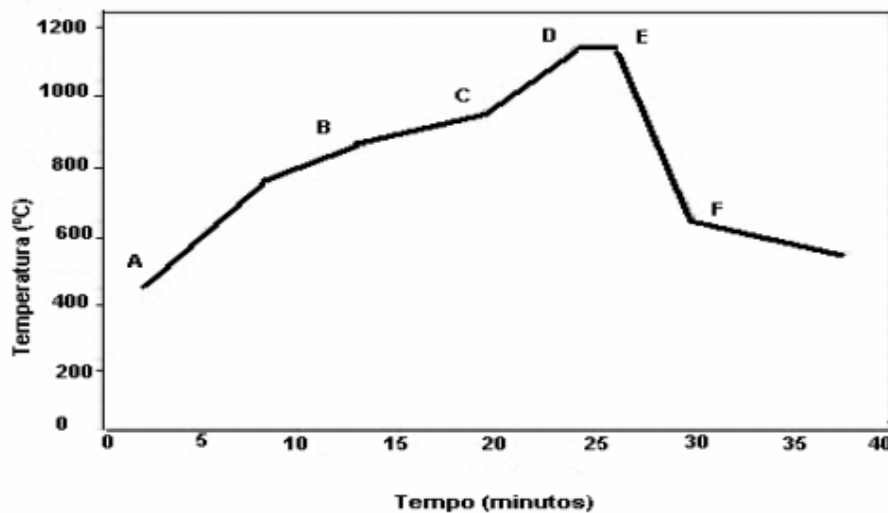
3.5.6 Queima

De acordo com Soares (2010) a etapa de queima é fundamental em todo o processo de fabricação dos revestimentos cerâmicos, sendo considerada a mais importante. É durante esse processo que ocorrem diversas transformações físicas, químicas e na microestrutura, as quais consolidam as características finais do produto cerâmico, tais como a porosidade, cor do suporte, resistência mecânica, coeficiente de expansão térmica, entre outros. Além disso, é durante a queima que frequentemente aparecem defeitos nas peças acabadas, ocasionadas por falhas durante as etapas anteriores, que até então não tinham sido detectadas, portanto, é essencial adotar técnicas adequadas de controle de processo e monitoramento do tempo, temperatura e atmosfera de queima, a fim de minimizar a ocorrência desses problemas e garantir a qualidade do revestimento cerâmico (CARNAÚBA, 2018).

O uso de curvas de aquecimento otimizadas garante que as reações de fusão e cristalização, dos diferentes elementos presentes na massa e no esmalte do produto, ocorram de maneira adequada. Essas reações são essenciais para produzir suportes cerâmicos com níveis específicos de absorção de água e retração, conforme as especificações predefinidas. Isso resulta em produtos que não apenas atendem a padrões técnicos mais elevados, mas também têm uma superfície esmaltada esteticamente valorizada (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

De acordo com Carnaúba (2018) existem dois processos de queima denominados de biqueima e monoqueima. Na biqueima, a queima é realizada inicialmente no suporte, e posteriormente, na peça final, com as suas três camadas (suporte, engobe e esmalte), sendo bastante utilizada em massa preparada por via seca. O processo de monoqueima recebe essa nomenclatura por conta da sua queima, que ocorre de forma simultânea: as massas argilosas e o esmalte são queimados a temperaturas próximas a 1200°C. As principais vantagens provenientes desse processo são a baixa absorção de água, maiores resistências mecânicas e químicas e resistência à abrasão superficial, além de trazer ótimos benefícios de ordem econômica e técnica à produção de revestimento poroso sem perder suas principais propriedades e características (BITTENCOURT *et al.*, 2001). A Figura 4 mostra uma curva típica de monoqueima em revestimento poroso.

Figura 4 – Curva de queima do processo de monoqueima



Fonte: Oliveira (2000)

Durante a queima, as placas cerâmicas são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas em fornos contínuos ou interminentes, que possuem três zonas importantes, por onde todo o material cerâmico irá passar (ABCERAM, 2023; NETTO, 2019):

- Zona de aquecimento: região do forno responsável por aquecer o material, preparando-o para suportar altas temperaturas.
- Zona de queima: Nesta área do forno, a placa passa por transformações físicas e químicas, saindo do estado cru para o estado queimado, o que determina suas características finais.
- Zona de resfriamento: Essa parte do forno tem a função de resfriar o material, preparando-o para entrar em contato com o ambiente externo. Isso é feito para que o material alcance uma temperatura segura para manuseio ao sair do forno, evitando assim o risco de choque térmico nas placas.

Segundo Boch e Nièpce (2007) as quatro principais características que essencialmente governam as três fases do processo de queima mencionadas anteriormente (pré sinterização, sinterização e resfriamento), são: a consolidação, densificação, crescimento ou decréscimo de alguns grãos, ou desaparecimento de outros e as reações físico-químicas no material granular e no material consolidado (BOCH & NIÈPCE, 2007).

Durante o aquecimento de um corpo cerâmico ocorrem diversas reações físicas e químicas, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais reações químicas e físicas durante a queima de uma massa vermelha por monoqueima

Temperatura (°C)	Reações	Gases emitidos
< 200	Evaporação de umidade residual, água higroscópica, água dos poros e substâncias orgânicas voláteis	Vapor de H ₂ O
200 - 650	Combustão de substâncias orgânicas	Vapor de H ₂ O e CO ₂
350 - 550	Oxidação de pirita (FeS ₂) e sulfetos	SO ₂
450 - 650	Evaporação da água de estrutura e destruição da estrutura cristalina dos materiais argilosos	H ⁺ + OH ⁻ → H ₂ O
500 - 600	Transformação alotrópica do quartzo	–
600 - 800	Oxidação de sulfeto de ferro	SO ₂
800 - 900	Decomposição de carbonatos e evaporação da água de estrutura de argilas ilíticas	Vapor de H ₂ O e CO ₂
900 - 1000	Início da reação química entre os componentes das argilas e demais materiais (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaCO ₃ , feldspatos, etc.). Dissociação de sulfetos e fluoretos	SO ₂ , HF
> 1000	Fusão parcial e formação de eutéticos. Início do processo de sinterização	–

Fonte: Netto (2019)

Más (2005) também ressalta que a partir dos 1000°C os sílico-aluminatos que estão em estado vítreo começam a amolecer, incorporando partículas menores e menos fundentes, conferindo maior dureza, compatibilidade e impermeabilidade ao material e ocorre a reorganização dos cristais, resultando em uma nova estrutura cristalina podendo aumentar a resistência mecânica e a redução na absorção de água indica o fechamento dos poros devido a mais ligações vítreas.

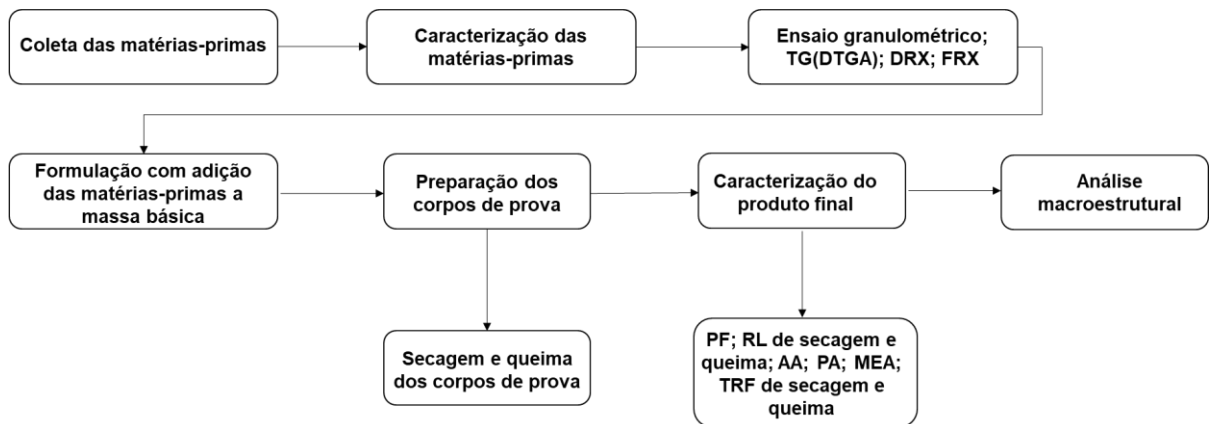
E ao final do processo, são produzidos materiais com atributos específicos, como brilho, porosidade, tonalidade, capacidade de resistência à flexão, estabilidade dimensional, tolerância a altas temperaturas e resistência a fatores como a umidade e substâncias químicas, entre outros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

São apresentados os materiais, a metodologia e as técnicas de caracterização que serão utilizadas no experimento. O fluxograma do procedimento experimental utilizado no trabalho é descrito pela Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do procedimento experimental

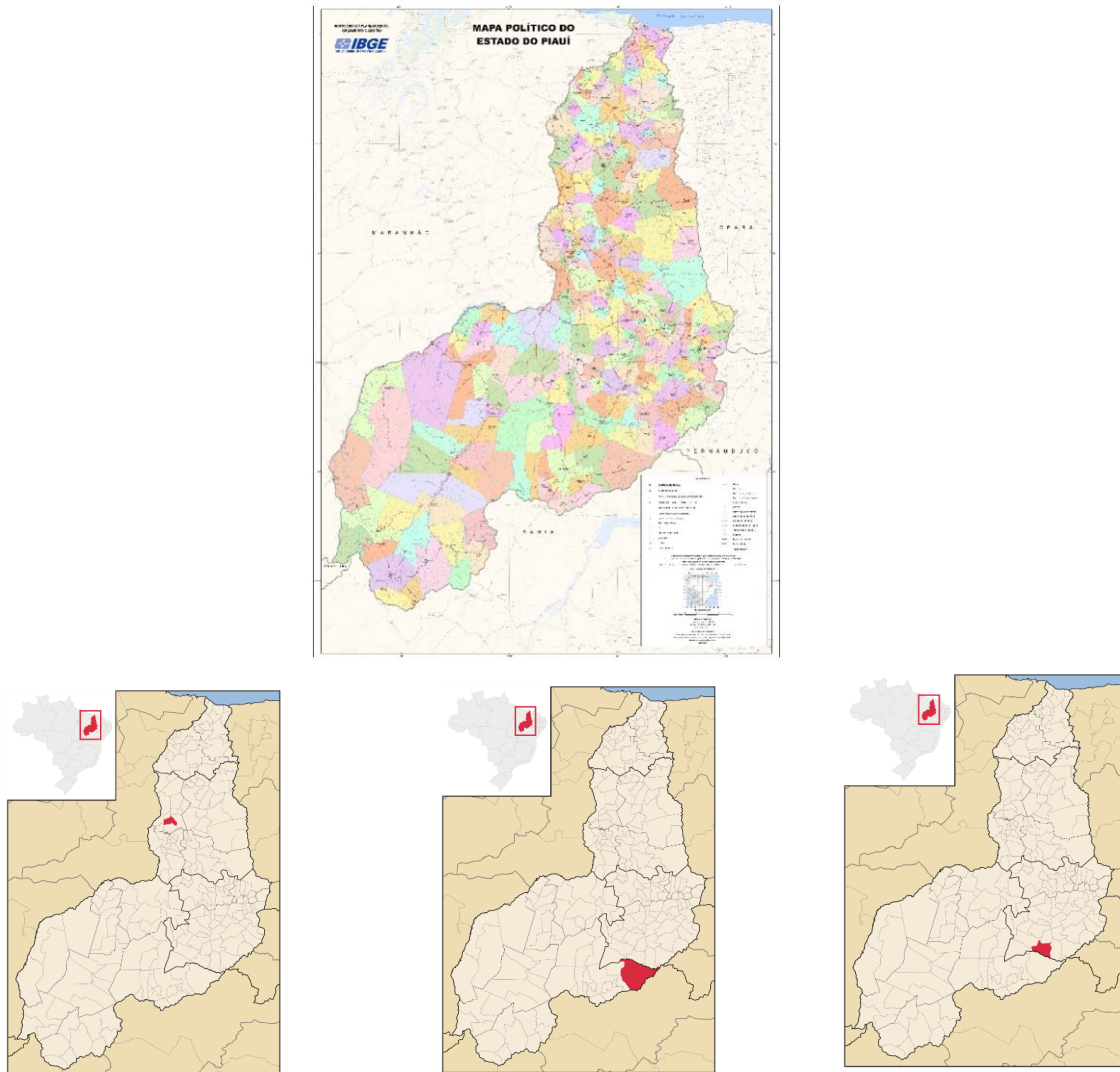


Fonte: Autor (2023)

4.2 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais: massa básica de revestimento cerâmico empregada e fornecida por uma indústria de revestimento localizada na cidade de João Pessoa (PB) e as rochas Muscovita Monzogranito, Zoisita Anfibolito e Calcário provenientes do estado do Piauí (PI), nas cidades de Lagoa do Barro do Piauí, Capitão Gervásio Oliveira e Dom Inocêncio, respectivamente. Na Figura 6 é apresentado a localização das cidades, no estado do Piauí, onde foram coletadas as rochas, e nas Figuras 7 ,8 e 9 são apresentadas as matérias-primas coletadas.

Figura 6 – Mapa do Piauí, destacando as cidades de Lagoa do Barro do Piauí, Capitão Gervásio Oliveira e Dom Inocêncio, respectivamente.



Fonte: IBGE (2023)

Figura 7 – Muscovita Monzogranito



Fonte: Autor (2023)

Figura 8 – Zoisita Anfibolito



Fonte: Autor (2023)

Figura 9 – Calcário



Fonte: Autor (2023)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas serão caracterizadas por técnicas de: análise petrográfica, análise granulométrica (AG), índice de plasticidade (IP), análise química por fluorescência de raios X (FRX), análise mineralógica por difração de raios X (DRX), análise racional (AR) e análises térmicas por termogravimétrica (TGA).

A caracterização das matérias-primas é de extrema importância dentro de uma pesquisa, visto que com a utilização desses conjuntos de técnicas é possível determinar de forma qualitativa e quantitativa os diversos tipos de matérias-primas já utilizadas e as que servem como alternativas de substituição total ou parcial. Além disso, é possível verificar as possíveis reações e transformações que ocorrem durante o processo produtivo e ao término, podendo assim entender as características pertinentes ao produto final, avaliando a aplicação dessas matérias-

primas nas proporções corretas dentro da massa cerâmica e o modo como possibilita a melhorias das propriedades para cada tipo de cerâmica (SOARES, 2010; DENARI, CAVALHEIRO, 2012)

4.3.1 Análise granulométrica

A granulometria do solo refere-se à classificação das partículas que o compõem em diferentes classes de tamanho e sua separação individual, geralmente expressa em porcentagem, podendo essas partículas ser de origem mineral ou orgânica. Essa análise permite determinar as dimensões das partículas e suas respectivas proporções no solo (EMMERT; PEREIRA, 2016).

Segundo Mendonça (2021) esse tipo de ensaio laboratorial é amplamente utilizado na Engenharia Civil para avaliar as propriedades do solo que servirá de base para uma estrutura. Nesse contexto, a composição mineral do solo, juntamente com a forma e o tamanho das partículas, pode impactar diretamente os parâmetros físicos analisados, como permeabilidade, compressibilidade e resistência do material.

A análise granulométrica seguirá o método de peneiramento por gravimetria descrito na ABNT NBR 7181 (2018), em que foram utilizadas seis peneiras, mais o fundo, ordenadas da maior malha para a menor malha (#16, #30, #40, #50, #100, #200, fundo), realizado em mesa agitadora de peneiras redondas da Lucadema, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Mesa agitadora e as peneiras



Fonte: Autor (2023)

4.3.2 Análise de plasticidade

Compreender a plasticidade de uma massa ou matéria-prima é extremamente útil na etapa de moldagem de produtos cerâmicos, por meio dos valores do índice é possível avaliar a adequação da massa cerâmica para a conformação das peças. Portanto, a plasticidade desempenha um papel essencial na produção de cerâmicas, tanto para aplicações estruturais quanto para revestimentos. Esse atributo está diretamente ligado às características da argila, incluindo seu teor de umidade e sua proporção na composição das massas cerâmicas (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Será determinada a plasticidade da massa argilosa coletada através dos limites de Atterberg, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), de acordo com as NBR's 6459 (2017) e 7180 (2016) da ABNT. Será realizado em aparelho de Casagrande, conforme ilustra a Figura 11. O índice de plasticidade é obtido através da Equação 1, abaixo:

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

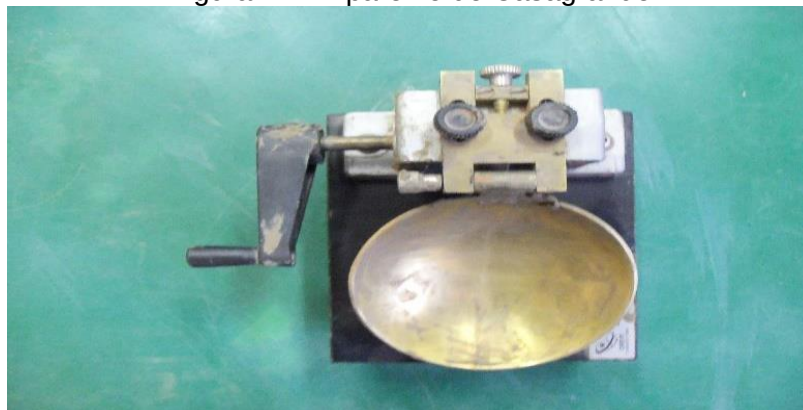
Onde:

IP = índice de plasticidade

LL = limite de liquidez

LP = limite de plasticidade

Figura 11 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Autor (2023)

4.3.3 Análise química

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica amplamente empregada na caracterização química dos materiais. O método consiste em excitar a amostra com um feixe de raios X e quantificar a energia emitida, conhecida como fluorescência de raios X, proveniente da superfície excitada da amostra e tais raios apresentam um comprimento de onda e uma energia específicos, os quais são distintivos para cada elemento (CARASEK; TONJES; SCHARF, 2002).

A composição química das matérias-primas foi feita através de uma análise quantitativa em espectrofotômetro de fluorescência de raios-X em equipamento Panalytical, modelo Epsilon 3 XL do Laboratório de Materiais (LabMat) do Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI. Na Figura 12 é apresentado o aparelho utilizado na realização da fluorescência de raios X.

Figura 12 – Espectômetro de fluorescência de raios X



Fonte: Autor (2023)

4.3.4 Análise mineralógica

Entre as diversas técnicas de caracterização dos materiais, a difração de raios x (DRX) é altamente recomendada para identificar as fases cristalinas encontradas nos materiais cerâmicos. Isso se deve ao fato de que, na maioria dos sólidos (cristais), os átomos se organizam em planos cristalinos comparáveis com os comprimentos de onda de raio X. Através da medição dos ângulos e da intensidade da difração do feixe, os especialistas em cristalografia podem criar uma representação tridimensional da distribuição dos elétrons dentro do próprio cristal,

podendo assim determinar a posição média dos átomos, suas ligações químicas, níveis de desordem e uma variedade de outras informações (ALBERS, 2002; NETO, 2004).

Para analisar a mineralogia das matérias-primas, bem como as fases formadas após a queima dos corpos-de-prova, análises de DRX serão realizadas com material moído e passantes pela peneira de 200 mesh. A avaliação das fases de cada matéria-prima e produto final analisados será dada por comparação entre os picos gerados no difratograma. A análise das fases cristalinas foi feita em difratômetro Rigaku SmartLab SE, com intervalo angular de 5° a 80°, passo de 0,02° e com velocidade de 7°/min.

4.3.5 Análises térmicas

Para avaliação térmica das matérias-primas em estudo, será utilizado o Analisador Termogravimétrico TGA-51H Shimadzu para o tipo de análise, serão utilizadas massas em torno de 15 mg, com granulometria inferior a 200 mesh, a taxa de aquecimento será de 10 °C/min entre 30°C e 1200°C, sob um fluxo de ar sintético de 50ml/min. A análise dos resultados e a obtenção da curva derivada da TG denominada DTG, serão realizadas utilizando o programa de computador denominado TA-60, para análises térmicas da Shimadzu. A Figura 13 apresenta o aparelho que foi utilizado no experimento térmico das matérias-primas.

Figura 13 – Aparelho TGA-51H Shimadzu



Fonte: Autor (2023)

4.3.6 Análise racional

Para analisar a mineralogia das matérias-primas de forma quantitativa será realizada a análise racional, onde utilizaremos dos resultados de fluorescência de raios X e difração de raios X, com isso, será possível a análise racional utilizando o programa computacional para análise racional de argilominerais “QuantFases” desenvolvido no Instituto Federal do Piauí (SILVA, 2015).

4.4 PREPARO DAS FORMULAÇÕES

As massas cerâmicas foram preparadas pelo processo via secas, sendo inicialmente secas em estufa. As matérias-primas foram moídas a seco, separadamente, utilizando-se o britador martelo com raio de giro de 200mm, conforme ilustra a Figura 14, e posteriormente o moinho de bolas com esferas de aço com 30mm e 40mm, apresentado pela Figura 15.

Figura 14 – Britador martelo



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 – Moinho de bolas



Fonte: Autor (2023)

A Figura 16 apresenta as matérias-primas após passar pelo processo de moagem e na Tabela 6 são apresentadas as formulações das massas cerâmicas utilizadas no trabalho.

Figura 16 – Matérias-primas cominuídas



Fonte: Autor (2024)

Tabela 6 – Formulação das massas cerâmicas

FORMULAÇÃO DAS MASSAS CERÂMICAS	CONCENTRAÇÃO EM PESO (%)			
	ARGILA	MUSCOVITA MONZOGRANITO	ZOISITA ANFIBOLITO	CALCÁRIO
F1	100%	-	-	-
F2	60%	20%	20%	-
F3	60%	20%	-	20%
F4	60%	-	20%	20%
F5	50%	20%	15%	15%

Fonte: Autor (2024)

A pesagem das massas cerâmicas foi realizada utilizando uma balança eletrônica com precisão de 0,01g, em seguida, foram adicionados às massas água até alcançar um teor de umidade de 10%, em seguida, misturou-se cada formulação até obter uma homogeneidade da massa, depois foram granuladas em peneira de malha 40 e colocadas em sacos plásticos e vedadas por período de 24 horas para evitar perda significativa de umidade, ter uma melhor distribuição da água entre as partículas da massa cerâmica e melhorar a reologia dos componentes.

4.5 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram conformados em formato retangular e prensados em moldes metálicos, na prensa hidráulica do Laboratório de Materiais (LabMat) -

IFPI, nas dimensões 80 x 10 x 10 mm, segundo a norma da ABNT NBR 10611: Corpo de prova – Forma e tipos de ensaios – Padronização (2011). O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica Schulz modelo 15t, com capacidade para 15 toneladas. As Figuras 17 e 18 apresentam a prensa hidráulica e o molde de conformação, respectivamente.

Para cada formulação foram confeccionados 45 corpos de prova, por prensagem uniaxial sob pressão de 30Mpa, sendo cinco para cada uma das quatro temperaturas de queima para a realização dos ensaios mecânicos, e o restante, são reservas em caso de algum problema, seja alguma trinca ou cisalhamento, totalizando 225 corpos de prova. A Figura 19 ilustra os corpos de prova após o processo de conformação.

Figura 17 – Prensa Hidráulica



Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – Moldes de conformação



Fonte: Autor (2024)

Figura 19 – Corpos de prova após a conformação



Fonte: Autor (2024)

4.6 SECAGEM E QUEIMA DOS CORPOS DE PROVA

Após a etapa de preparação dos corpos de prova, eles foram pesados, em balança analítica eletrônica e medidos as suas dimensões por um paquímetro, posteriormente foram secos em estufa, conforme ilustra a Figura 20, com controle de temperatura de 110°C por 24 horas. Seguida a secagem, os corpos de prova foram novamente pesados e medidos. Todos os valores encontrados foram utilizados para determinação tanto da perda ao fogo como da retração linear de secagem e queima. As Figuras 21 e 22, ilustram, os corpos de prova após o processo de secagem.

Figura 20 – Estufa



Fonte: Autor (2024)

Figura 21 – Corpos de prova após secagem



Fonte: Autor (2024)

Figura 22 – Corpos de prova em todas as formulações (F1 à F5) após secagem



Fonte: Autor (2024)

As amostras serão queimadas em forno e resfriadas naturalmente até a temperatura ambiente. Será adotado um ciclo de queima com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, com um patamar de 30 minutos, nas seguintes temperaturas: 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL

Os corpos-de-prova serão caracterizados após a queima por ensaios de retração linear de secagem e queima (RLS e RLQ), absorção de água (AA), perda ao fogo (PF), porosidade aparente (PA), massa específica aparente (MEA) e Tensão de ruptura à flexão a três pontos (TRF). Para verificar possíveis defeitos causados

por etapas anteriores ou provenientes da etapa de queima e, também ser avaliado o efeito estético, será feito uma análise macroestrutural nos corpos de prova.

4.7.1 Retração linear

A retração linear é um método utilizado para avaliar a redução das massas cerâmicas durante os processos de secagem (110°C) e queima, quando perdem água coloidal e residual. Esse método permite estimar a granulometria da massa cerâmica, ou seja, se a argila utilizada for mais fina, será necessária uma quantidade menor de água durante o amassamento, além disso, a retração linear possibilita a avaliação de diversas propriedades físicas das argilas, como plasticidade, resistência mecânica e comportamento durante a secagem e queima (SENAI, 2006). Os corpos de prova foram medidos por paquímetro, com resolução de 0,02mm e os resultados foram obtidos pela média aritmética de cinco valores em corpos de prova distintos.

A retração linear após a secagem (RLS) e após a queima (RLQ) é a variação da dimensão linear dos corpos cerâmicos, e para o cálculo de seus valores será utilizado a Equação 2 e 3, respectivamente.

$$RLS (\%) = \frac{Li - Lf}{Li} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- RLS é a retração linear de secagem, em porcentagem;
- Li é o comprimento inicial (em milímetros) do corpo de prova medido após a sua conformação (prensagem);
- Lf é o comprimento final (em milímetros) do corpo de prova medido após a etapa de secagem, por 24 horas a uma temperatura de 110°C.

$$RLQ (\%) = \frac{Li - Lf}{Li} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- RLQ é a retração linear de queima, em porcentagem;
- Li é o comprimento inicial (em milímetros) do corpo de prova medido após a secagem;

- L_f é o comprimento final (em milímetros) do corpo de prova medido após a etapa de queima.

4.7.2 Perda ao fogo

A perda ao fogo (PF) é a perda de massa da amostra seca, durante a queima, provocada pela eliminação da matéria orgânica presente, águas provenientes de hidróxido de ferro, alumínio, entre outros elementos, e da constituição das argilas. A determinação da perda ao fogo será feita em cada temperatura de queima (1000°C, 1050°C e 1100°C) e com amostras que apresentam peso constante após a secagem a 110°C, e os resultados são expressos em porcentagem (%) de perda em relação a massa da amostra seca, sendo calculada de acordo com a Equação 4.

$$PF (\%) = \frac{M_s - M_q}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- PF é a perda ao fogo, em porcentagem;
- M_s é a massa inicial do corpo de prova verificado após a secagem a 110°C, em gramas;
- M_q é a massa final do corpo de prova verificado após a queima em gramas.

4.7.3 Absorção de água

A absorção de água (AA) é a medida, em porcentagem (%), da quantidade de água absorvida pelo corpo de prova após o processo de queima. Inicialmente, os corpos de prova são resfriados após a queima e, em seguida, secos em estufa a 110° por 24 horas. Após esse período, são pesados em balança eletrônica, posteriormente, são submersos em água destilada por mais 24 horas. Por fim, os corpos de prova são removidos e o excesso de água superficial será retirado com um pano úmido, e então pesados novamente para calcular a quantidade de água absorvida por cada corpo de prova.

Esse ensaio baseia-se pela norma ABNT NBR 6458:2017, sendo realizado para controlar a eficiência da queima pelo grau de sinterização da massa, como também para informar o estabelecimento das curvas de queima, e determinada pelo quociente da massa de água absorvida pelo corpo de prova, pela massa do corpo de prova seco, de acordo com a Equação 5.

$$AA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- AA é a absorção de água, em porcentagem;
- Mu é a massa absorvida (massa úmida) pelo corpo de prova, em gramas;
- Ms é a massa do corpo de prova seco, em gramas.

4.7.4 Porosidade aparente

O ensaio da porosidade aparente (PA), que se baseia na norma da ABNT NBR 6458:2017, permite estimar a porcentagem do volume de poros abertos nos corpos de prova após a sinterização, em relação ao seu volume total. Para obter esse valor, após realizar as pesagens dos corpos de prova para calcular a absorção de água, também foi medida a massa dos corpos imersos, utilizando o método da balança hidrostática. Na posse dos três valores para obtenção da porosidade aparente, utilizou-se a Equação 6, demonstrada abaixo.

$$PA(\%) = \frac{(Mu - Ms)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

- PA é a porosidade aparente, em porcentagem;
- Mu é a massa úmida do corpo de prova, em gramas;
- Ms é a massa seca do corpo de prova, em gramas;
- Mi é a massa imersa do corpo de prova, em gramas.

4.7.5 Massa específica aparente

A massa específica aparente (MEA) é uma característica fundamental no processamento cerâmico e está relacionada à retração linear, absorção de água e resistência mecânica dos materiais. Pode ser calculada pelo quociente da massa seca do corpo de prova seco pelo volume ou pela razão entre a massa seca e a diferença entre a massa úmida e a massa imersa. Os procedimentos e valores utilizados são os mesmos empregados para determinar a absorção de água e a porosidade aparente, sendo os resultados obtidos através da equação 7.

$$MEA (g/cm^3) = \frac{Ms}{(Mu - Mi)} \quad (7)$$

Onde:

- MEA é a massa específica aparente (g/cm³);
- Ms é a massa seca do corpo de prova, em gramas;
- Mu é a massa úmida do corpo de prova, em gramas;
- Mi é a massa imersa do corpo de prova, em gramas.

4.7.6 Tensão de ruptura à flexão

O ensaio de tensão de ruptura à flexão (TRF) é definido como a força por unidade de área para romper um corpo de prova, sendo expressa em quilograma força por centímetro quadrado (kgf/cm²). As resistências mecânicas dos corpos de prova foram avaliadas através desse ensaio em três pontos, de acordo com a norma da ABNT NBR ISO 10545-4:2020, e realizado em uma máquina de ensaio universal, da marca EMIC DL 2000, operando a uma velocidade de 0,5 mm/min, e com 8 cm a distância entre os apoios. Os cálculos foram efetuados automaticamente pelo software Trapezium 1.14, da Shimadzu, a Equação 8, forneceu os resultados.

$$TRF(kgf/cm^2) = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (8)$$

Onde:

- TRF é a tensão de ruptura à flexão, em kgf/cm²;
- P é a carga atingida no momento da ruptura, em kgf;
- L é a distância entre os apoios do corpo de prova, em centímetro;
- b é a largura do corpo de prova, em centímetro;
- h é a altura do corpo de prova, em centímetro.

4.7.7 Análise macroestrutural

A avaliação macroestrutural será realizada nas amostras que passarão pelo processo de queima, serão fotografadas e examinadas para avaliar sua textura da superfície, identificar possíveis defeitos, manchas ou outras alterações relevantes, sendo essas causadas ou pelas etapas anteriores do processo ou terem surgido durante a queima ou ainda devido à proporção dos componentes de cada formulação. Essa análise é importante devido aos aspectos mercadológicos, já que para um produto ser aceitável deve possuir uma estética agradável, padrão e sem falhas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Análise granulométrica

A análise da distribuição granulométrica das quatro matérias-primas revela um grande número de partículas finas, como pode ser observado na Tabela 7, visto que a média de material retido, na peneira com abertura de 0,075mm, entre os quatro materiais foi de apenas 17,07%, o que contribui para um empacotamento eficiente na etapa de prensagem. Esse resultado foi alcançado devido ao um processo de moagem eficaz, que permite uma maior interação entre as partículas, desenvolvendo elevadas superfícies específicas, favorecendo o processo de queima em temperaturas menores.

Tabela 7 – Distribuição granulométrica das matérias-primas

Peneiras da ABNT	Abertura (mm)	Argila retida (%)	Muscovita Monzogranito retido (%)	Zoisita Anfibolito retido (%)	Calcário retido (%)
16	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,42	0,00	0,00	0,03	0,08
50	0,30	0,00	0,00	0,06	0,11
100	0,15	0,68	0,52	0,39	0,42
200	0,075	25,62	14,51	11,14	17,04
Fundo		73,70	84,97	88,38	82,35
Total		100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autor (2023)

5.1.2 Limite de liquidez e plasticidade

A Tabela 8 demonstra como foi obtido o valor do limite de plasticidade (23,77%), apresenta os valores do limite de liquidez (38,64%), ilustrado também pelo Gráfico 9, e conforme a Equação 1, foi possível descobrir o valor do índice de plasticidade (14,87%).

Segundo Caputo, Caputo e Rodrigues (2015) a argila estudada, por possuir um índice de plasticidade entre 7 e 15, é classificada como medianamente plástica, e está ligada a granulometria fina do material, conforme analisado no Gráfico 5, anteriormente. Essa classificação para a argila é a ideal para fabricação de revestimentos cerâmicos e pisos, de acordo com Santos (2013), pois facilita o

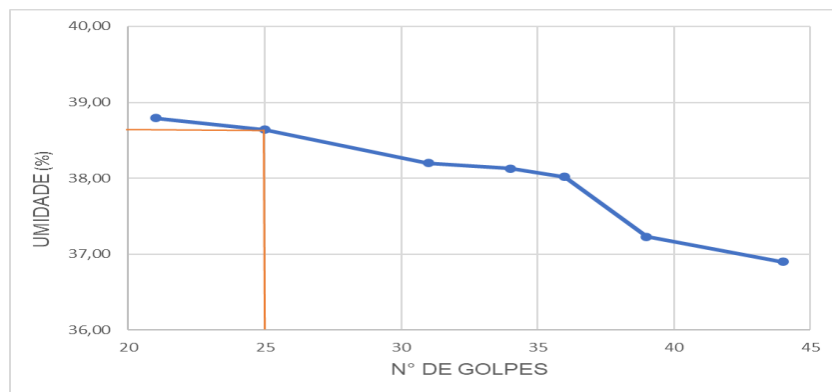
processo de secagem, resulta em uma menor retração linear e promove a liberação de gases indesejados durante a queima.

Tabela 8 – Valores do limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade da argila

CÁPSULA (n°)	1	2	3	4	5
PESO CÁPSULA (g)	39,1	38,95	38,9	38,88	39,05
PESO ÚMIDO COM CÁPSULA (g)	42,6	42,53	42,34	42,29	42,23
PESO ÚMIDO (g)	3,5	3,58	3,46	3,52	3,18
PESO SECO COM CÁPSULA (g)	41,91	41,87	41,6	41,82	41,62
PESO SECO (g)	2,81	2,92	2,78	2,85	2,57
UMIDADE (%)	24,56	22,60	24,46	23,51	23,74
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	23,77				
LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	38,64				
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)	14,87				

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 5 – Resultado do limite de liquidez da argila



Fonte: Autor (2023)

5.1.3 Análise petrográfica

A Muscovita Monzogranito é constituída por uma mineralogia primária, com indícios de alteração moderada, representada por quartzo, álcali-feldspato, com muscovita e epídoto e plagioclásio. Apresenta uma coloração branca rosada, com porções/pontos verdes, de granulação média, com textura granular alotriomórfica ou equigranular.

O plagioclásio é incolor, com forma anédrica e muito localmente subédrico, de hábito prismático e com cristais variando de 0,1 mm de até 3 mm. Os cristais estão frequentemente deformados e/ou alterados, localmente intercrescidos com quartzo e

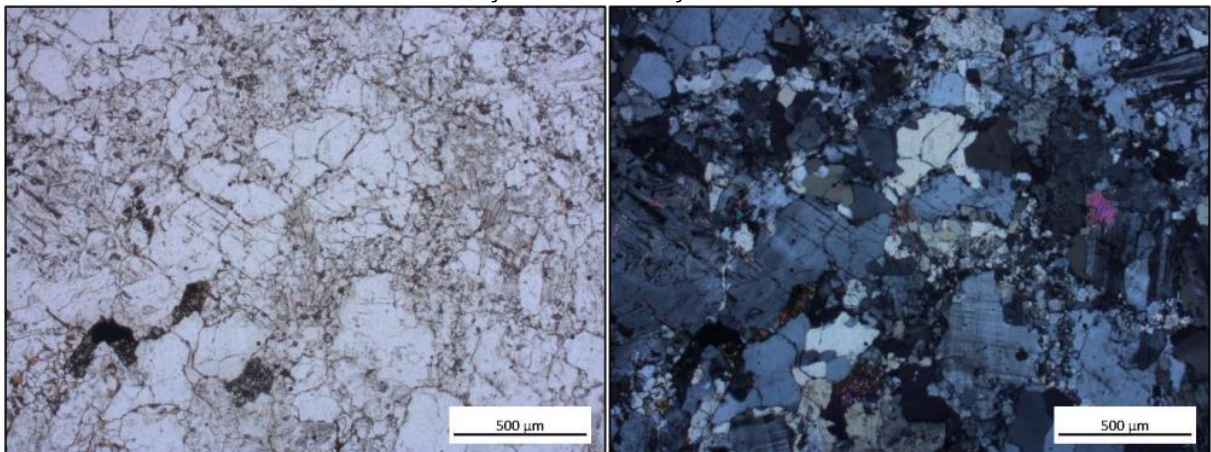
álcali-feldspato. Alguns cristais maiores de plagioclásio ocorrem englobando cristais de muscovita, definindo uma textura poiquilíticas.

O quartzo é incolor, exibe forma anédrica e granular. Os cristais apresentam tamanho entre 0,01 e 0,3 mm. O quartzo ocorre frequentemente intercrescido com o plagioclásio, nas zonas de alteração, o quartzo encontra-se deformado, com extinção ondulante, além de exibir contatos interlobados com outros cristais de quartzo.

A muscovita é incolor e exibe um pleocroísmo leve. Suas formas são subédricas a euédricas, com hábito lamelar a tabular. Os cristais apresentam tamanhos variando de 0,01 mm a 2 mm. Os cristais apresentam clivagem perfeita, além de extinção reta-picotada e cor de interferência de 2ª a 3ª ordem. Este mineral está frequentemente associado junto com o epídoto nos cristais de plagioclásio, em especial nas zonas de dissolução e recristalização dos plagioclásios, sendo frequentemente inclusos por estes.

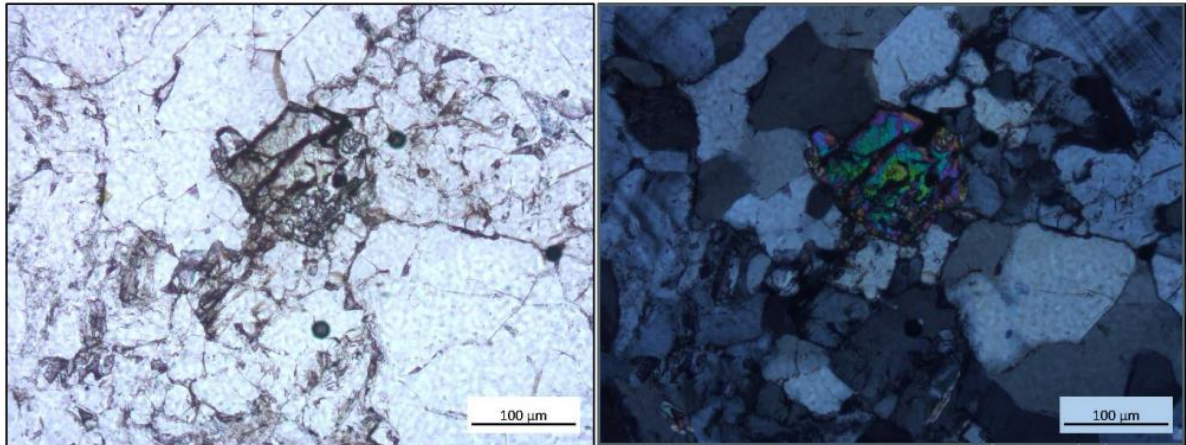
A amostra exibe feições de intemperismo moderado a alto, representado pela intensa alteração nos plagioclásios e a presença de argilominerais. Em algumas porções da amostra, os cristais de feldspato e quartzo estão intensamente deformados e alterados, com feições de dissolução, recristalização, e intercrescimento entre si e com os cristais de muscovita e epídoto. As Figuras 23, 24 e 25 ilustram as mineralogias da Muscovita Monzogranito.

Figura 23 - Fotomicrografia da lâmina da Muscovita Monzogranito, exibindo a visão geral dos minerais presentes da amostra, dentre eles o quartzo, o álcali-feldspato, estes dois últimos com feições de alteração, e a muscovita.



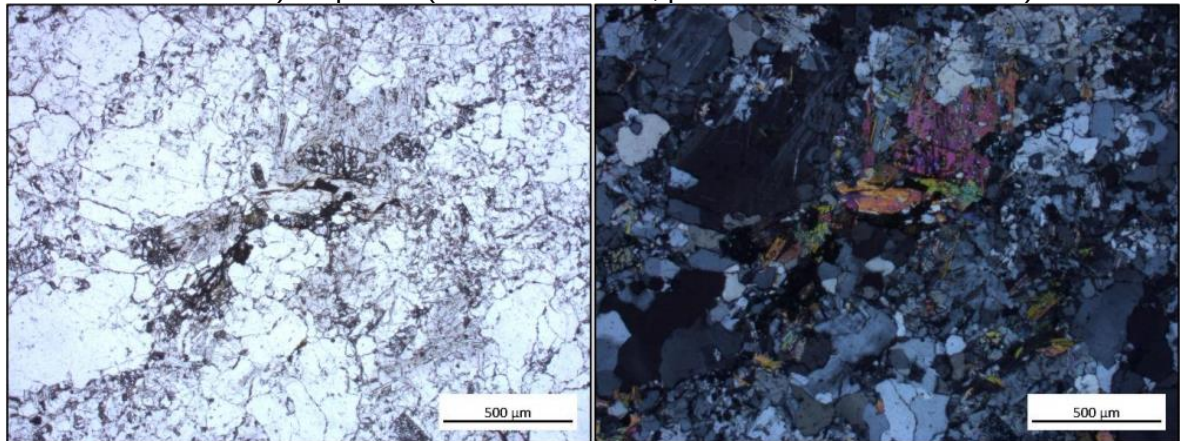
Fonte: Autor (2024)

Figura 24 - Fotomicrografia com destaque para o epídoto (mineral de relevo alto no centro da imagem), presente em quantidades variáveis pela amostra, ao lado de cristais de quartzo (cristais incolores fraturados, mas não alterados)



Fonte: Autor (2024)

Figura 25 - Fotomicrografia da região de intensa alteração dos feldspatos e presença de cristais subédricos a euédricos de muscovita (cristais incolores, lamelares e de relevo moderado) e epídoto (cristais incolores, prismáticos e de relevo alto).



Fonte: Autor (2024)

A rocha Zoisita Anfibolito é de natureza metamórfica, sendo rica em magnésio, cálcio, alumínio e minerais do grupo dos silicatos. Possui uma coloração cinza esverdeada, com granulação média, sem fraturas e sem poros ou cavidades. É constituída por uma mineralogia intensamente alterada, o qual foi possível distinguir 4 minerais a partir das propriedades ópticas.

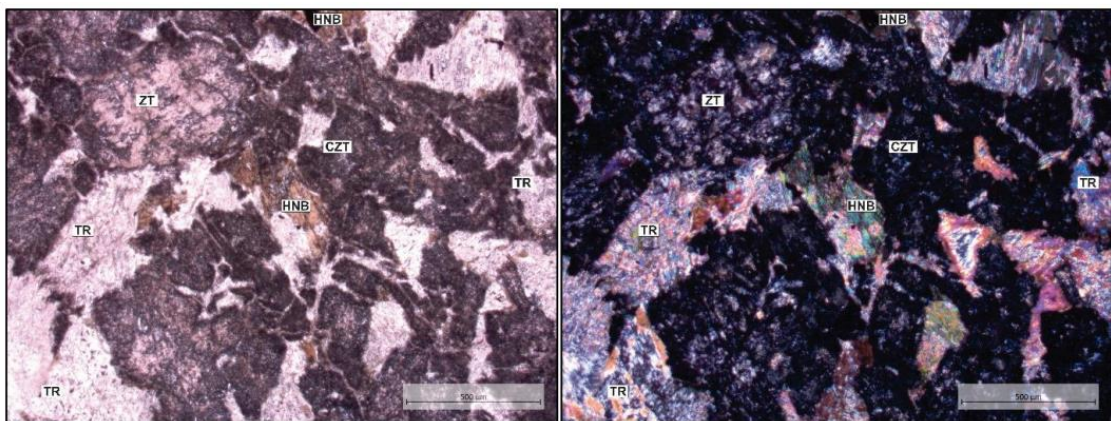
O primeiro mineral é a zoisita e se apresenta com coloração esverdeada em amostra de mão, mas em lâminas delgadas exhibe coloração marrom escuro, além de com formas pseudomórficas e reliquias, com cristais incolores, anédricos, submilimétricos e extinção variando entre reta e inclinada, o que indica uma possível associação com clinozoisita. As formas pseudomórficas exibem hábitos prismáticas e tabulares reliquias, cujos tamanhos variam de 1 mm a 4 mm.

A clinozoisita é incolor e subédrica, de hábito prismático a tabular, com uma leve cintilância e com cristais muito pequenos, submilétricos, e que podem apresentar alcançar tamanhos de até 0,5 mm. Os cristais apresentam um crescimento aleatório (random) e parecem terem sido formadas a partir da alteração dos outros minerais.

A tremolita é incolor, de hábito acicular, podendo ocorrer formas prismáticas mais localmente, com tamanhos submilimétricos podendo chegar até 0,5 mm. Os cristais apresentam extinção inclinada, variando de 8 a 15°, cor de interferência de 2º ordem e caráter biaxial negativo. A tremolita encontra-se frequentemente associada ao mineral prismático marrom (descrito como Hornblenda), por vezes contornando-o ou intercrescido com este.

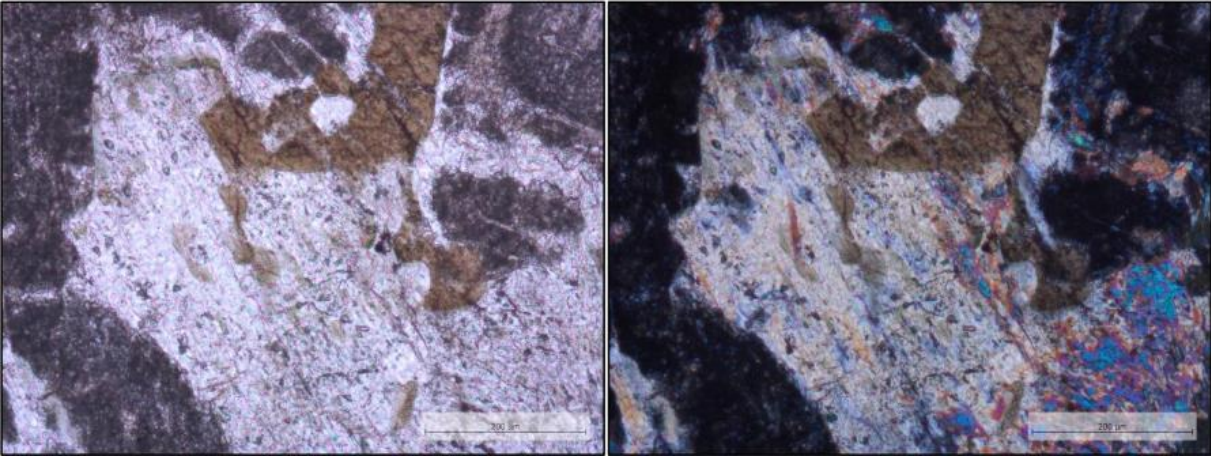
A hornblenda é marrom e anédrico, podendo apresentar raros cristais subédricos. Suas formas são predominantemente granulares e tamanhos que variam de 0,01 mm a 2 mm. Os cristais apresentam uma direção de clivagem e alguns cristais podem apresentar um hábito prismático reliquiar. As Figuras 26 e 27 apresentam a composição mineralógica da rocha Zoisita Anfibolito.

Figura 26 – Identificação da mineralogia por microscopia óptica da Zoisita Anfibolito, representada por Zoisita (ZT), Clinozoisita (CZT), Tremolita-actinolita (TR) e Hornblenda (HNB).



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 - Fotomicrografia da Zoisita Anfibolito, com destaque para os cristais de tremolita (incolor) envolvendo um cristal de hornblenda (marrom) alterada. Lâmina sob nicóis paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita).



Fonte: Autor (2024)

5.1.4 Análise química

Na Tabela 9 são mostrados os resultados da composição química das matérias-primas utilizadas, em percentual, obtidos por fluorescência de raios-x (FRX).

Tabela 9 – Composição química da argila e das rochas

% EM PESO DOS ÓXIDOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS									
MATÉRIA-PRIMA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Outros
Argila	54,93	18,24	14,95	3,92	2,95	2,74	1,57	0,28	0,42
Muscovita	74,68	17,25	1,29	4,61	0,00	1,50	0,12	0,21	0,28
Monzogranito									
Zoisita	43,48	14,38	13,67	0,23	8,34	18,59	0,61	0,13	0,46
Anfibolito									
Calcário	1,29	0,64	0,61	0,22	1,57	94,89	0,06	0,16	0,53

Fonte: Autor (2024)

Como pode ser observado, a argila é constituída principalmente de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Nas argilas, a sílica aparece geralmente na condição de quartzo (sílica livre) que facilita o processo de liberação de gases durante o processo de queima dos materiais cerâmicos e melhora a estabilidade dimensional das peças cerâmicas. A relação sílica/alumina é de 3,0 que é uma possível evidência da sílica livre, promovendo uma diminuição na plasticidade do material. Possui um teor de 14,95% de Fe₂O₃ e 1,57% de TiO₂, cuja presença é responsável pela coloração avermelhada da peça cerâmica após a queima e também apresentou um percentual em torno de 8,4% de óxidos alcalinos fundentes (K₂O + CaO + MgO), cuja presença é responsável pela diminuição da temperatura de sinterização e são essenciais para cerâmica de baixa porosidade (DIAO; DIAGNE; DIA, 2021)

A Muscovita Monzogranito apresentou uma considerável concentração de óxido de silício (74,68%), que é o principal agente vitrificante e compõe as principais fases cristalinas após a queima. Também contém uma concentração de óxido de alumínio (17,25%), que combinado com óxidos fundentes, por exemplo o K_2O e CaO (6,1% juntos), são responsáveis pela refratariedade do material final. Outro ponto a ser observado é o baixo percentual do óxido de ferro (1,29%) que pode proporcionar uma coloração menos avermelhada ao material sinterizado.

A Zoisita Anfibolito apresenta uma concentração alta do fundente CaO (18,59%), além desse óxido também possui 13,67% de Fe_2O_3 e 8,34% de MgO , sendo que esse último pode se comportar como fundente. As concentrações próximas desses óxidos, junto com o Al_2O_3 (14,38%) é um forte indício da presença dos minerais zoisita e tremolita.

O calcário apresentou composição majoritária do óxido de cálcio (94,89%), que o caracteriza como carbonato de cálcio e também possui a presença dos outros óxidos em menores quantidades como silício, potássio, ferro e magnésio. O CaO se comporta como fundente e tende a baixar a refratariedade da massa cerâmica, diminuir os poros da peça e pode atuar na formação de fase líquida viscosa em temperaturas mais baixas.

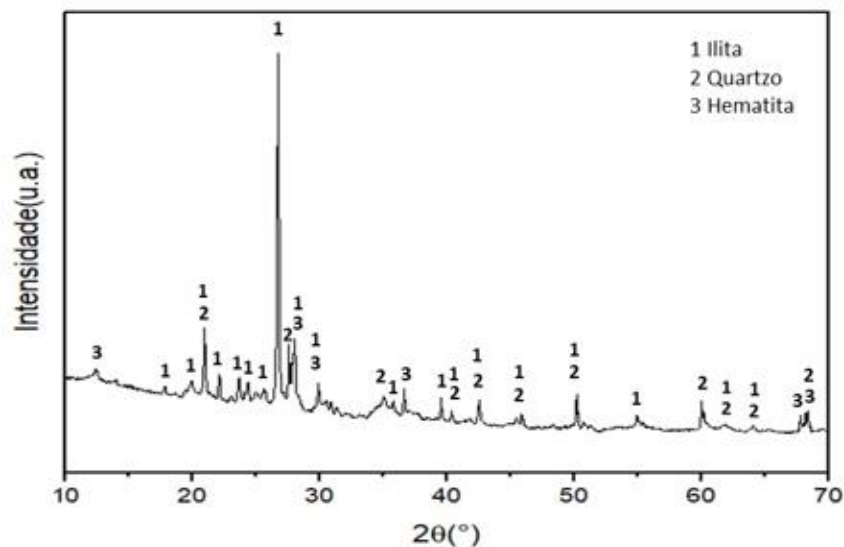
5.1.5 Análise mineralógica

As fases cristalinas identificadas por difração de raio X da argila, conforme ilustra a Figura 28, foram referentes a ilita $(K,H_3O)(Al,Fe^{3+},Mg)_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$, quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3). A presença da ilita, tratando-se de um silicato de alumínio hidratado com elevado grau de óxido de potássio, contribui para um elevado índice de formação de fase líquida durante a queima da massa cerâmica, devido à presença do elemento alcalino potássico em sua estrutura cristalina que atua na diminuição dos poros depois de resfriado, potencializando esse efeito, e juntos com o quartzo são componentes importantes, pois diminui a refratariedade da massa promovendo uma sinterização mais efetiva em temperaturas menores. Os altos valores de ferro presente na hematita atuam como fundente em temperaturas mais baixas, que junto com a ilita pode contribuir para a coloração avermelhada do produto (REHMAN; AHMAD; RASHID, 2020).

Portanto, os picos apresentados no difratograma estão coerentes com a análise química apresentada, com destaque pela presença dos óxidos de silício,

alumínio, potássio e ferro, que juntos confere a massa industrial uma boa combinação para a produção de revestimentos queimados em menor temperatura de sinterização.

Figura 28 – DRX da Argila

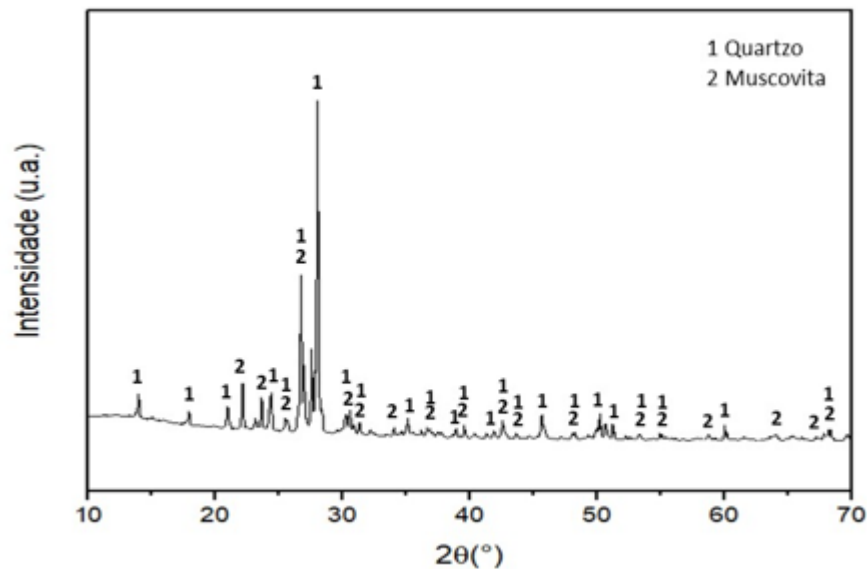


Fonte: Autor (2024)

Na Muscovita Monzogranito foram identificados picos referentes ao quartzo, e muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}$), conforme ilustra a Figura 29. Os picos de quartzo corroboram com alto percentual de óxido de silício (74,68%) apresentado no FRX, esse mineral tem um papel essencial, atuando como regulador da plasticidade da massa, contribui para a secagem, facilita a liberação de gases durante a queima e assegura a estabilidade das peças.

Além disso, auxilia no controle da viscosidade da fase líquida formada no processo e influencia o coeficiente de expansão térmica (SOARES, 2010). Já os picos da muscovita foram identificados devido à presença do óxido fundente K_2O (4,61%) e do óxido de alumínio (17,25%), que além de desempenharem a função de baixar a retração da massa cerâmica, colaboram para o crescimento de agulhas da mulita, devido às viscosidades mais elevadas da fase vítrea rica em alumínio.

Figura 29 – DRX da Muscovita Monzogranito

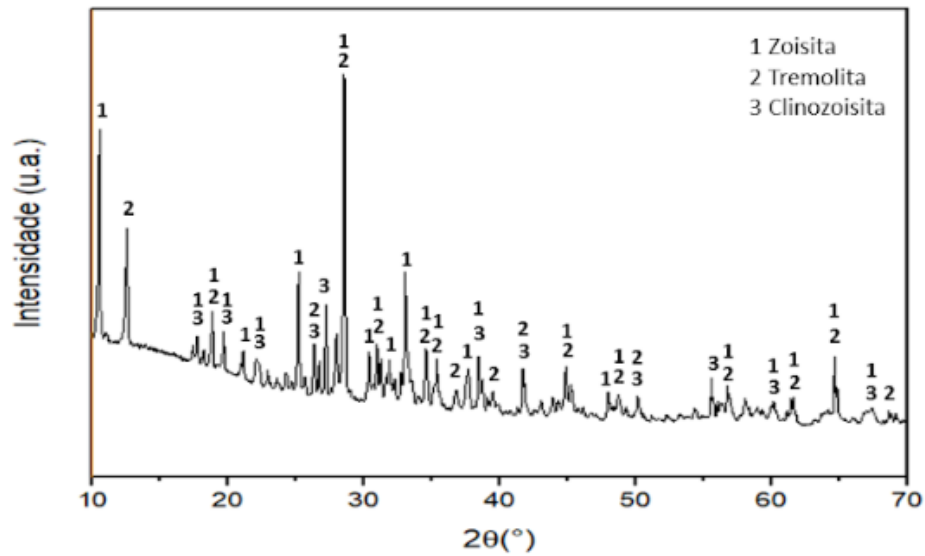


Fonte: Autor (2024)

A Zoisita Anfibolito apresentou picos, conforme ilustra a Figura 30, de Zoisita ($\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$), e Clinozoisita ($\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$), ambas pertencem ao mesmo grupo do Epidoto e são ricas em óxido de cálcio, principalmente, que age como fundente, e óxido de alumínio e óxido de silício, corroborando com os valores desses óxidos na análise química. Além dos picos mencionados, também foi encontrado a Tremolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), que é um mineral dos grupos dos anfibólios, rica também em óxido de cálcio, mas diferencia-se das demais por possui óxido de magnésio e de ferro em sua composição, o que fica evidenciado quando observado a fluorescência de raio X da rocha. A tremolita colabora para evitar a laminação durante o processo de queima da massa cerâmica.

Cabe ressaltar que a análise mineralógica da Muscovita Monzogranito e da Zoisita Anfibolito é compatível com os resultados apresentados na petrografia das rochas.

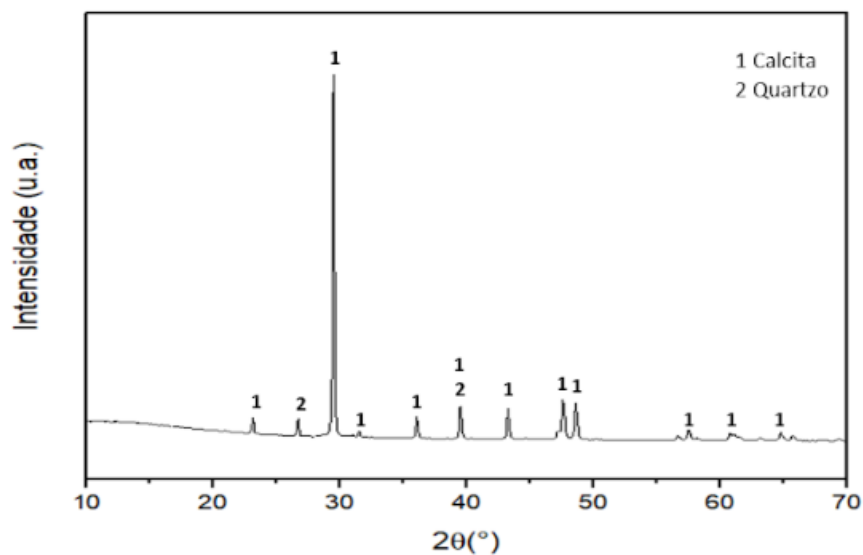
Figura 30– DRX da Zoisita Anfibolito



Fonte: Autor (2024)

No calcário foram encontrados picos referentes à calcita (CaCO_3), majoritariamente, e quartzo, conforme ilustra a Figura 31, em pequena quantidade, corroborando com os resultados da composição química do calcário, demonstrando o elevado grau de pureza, visto que o óxido de cálcio equivale a aproximadamente 95%. Após a descarbonização, a calcita gera óxido de cálcio, um fundente moderado essencial para a eficiência energética no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos (SOARES, 2010).

Figura 31 – DRX do Calcário



Fonte: Autor (2024)

5.1.6 Análise racional

A Tabela 10 apresenta a análise mineralógica racional encontrada nas matérias-primas.

Tabela 10 – Análise mineralógica racional das matérias-primas

Fases Cristalinas	Matérias-primas			
	Argila	Muscovita Monzogranito	Zoisita Anfibolito	Calcário
Calcita	-	-	-	98,43%
Quartzo	32,52%	59,81%	-	1,57%
Ilita	52,61%	-	-	-
Hematita	14,87%	-	-	-
Muscovita	-	40,19%	-	-
Zoisita	-	-	52,56%	-
Tremolita	-	-	39,27%	-
Clinozoisita	-	-	8,17%	-

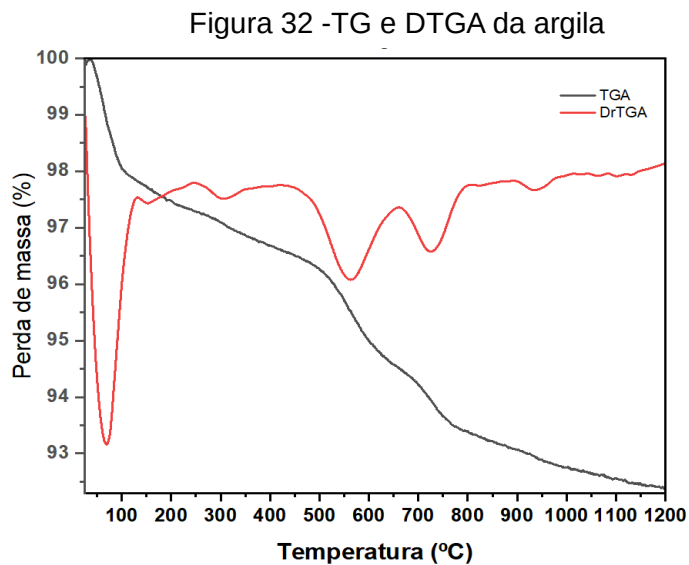
Fonte: Autor (2024)

Os valores obtidos na análise racional da argila deixam claro que possui, por si só, uma ótima composição, sendo classificado como argila ilítica (52,61%) que denota boa característica de fundente e justifica sua fina granulometria, e o quartzo (32,52%) com a hematita (14,87%) demonstra que é adequada para fabricação de cerâmica vermelha.

Em relação a Muscovita Monzogranito nota-se a presença da fase de quartzo (59,81%), majoritária, seguido da Muscovita (40,19%), mineral que dá nome a rocha, fonte de potássio, ou seja, vai atuar como fundente em temperaturas mais elevadas diminuindo os valores de absorção de água. A Zoisita Anfibolito apresentou as fases zoisita (52,56%), majoritária, tremolita (39,27%) e clinozoisita (8,17%), que agem como fundentes por possuírem em sua composição o cálcio, alumínio e magnésio, os resultados dessas duas rochas corroboram com o encontrado na análise petrográfica. E por fim o calcário, que apresentou um elevado grau de pureza, com 98,43% composto por calcita, seguido de 1,57% de quartzo. Este percentual evidencia que as formulações contendo adição de calcário apresentarão um teor elevado de óxido de cálcio (CaO) após o processo de descarbonatação da calcita durante a etapa de queima, e esse óxido age também como fundente. Cabe ressaltar que as fases encontradas em todas as matérias-primas estão coerentes com o resultado da composição química.

5.1.7 Análise térmica

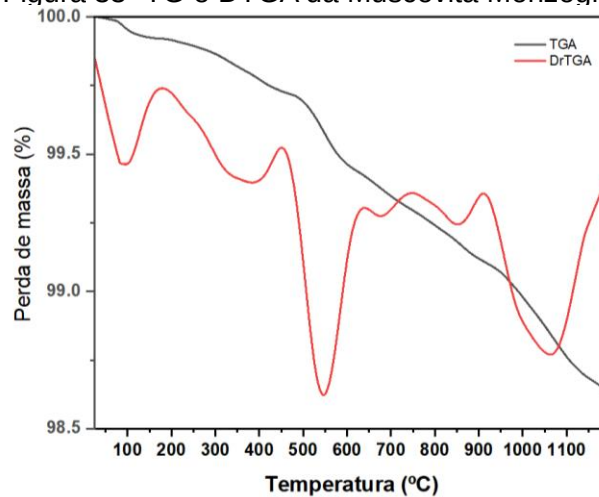
A Figura 32 demonstra a análise termogravimétrica (TGA/DrTGA) da argila que teve a maior variação de perda de massa em torno de 2,22% entre as temperaturas de 514°C à 604,1°C, que corresponde a queima de matéria orgânica, a liberação de hidroxila da estrutura dos argilominerais, mas que não destrói a estrutura cristalina da illita. Pode se observar a ocorrência de mais dois eventos, o primeiro ocorre a temperatura de 43,5°C com uma perda de massa de 2,04%, que é devido a liberação de água livre, o segundo evento acontece entre as temperaturas de 700,97°C e 795,89°C, que está relacionado com a perda da estrutura cristalina das argilas ilíticas (SOUSA, 2017), que corresponde a uma perda de massa de 2,09%.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 33 apresenta a análise termogravimétrica da Muscovita Monzogranito, e pode ser observado uma baixa perda de massa na amostra com uma variação maior sendo de 0,45%, encontrado entre as temperaturas de 972,9°C e 1132°C, isso se deve ao fato de o potássio encontrado não acumular tanta água em seu interstício, tendo basicamente perda de água livre, o que ocorre a temperatura de 46,7°C, e a decomposição da muscovita com a perda de hidroxilas a temperatura de 505,8°C. A amostra é altamente estável termicamente, apresentando perda menor que 1%, o que pode ser interessante para aplicações em materiais refratários ou cerâmicos.

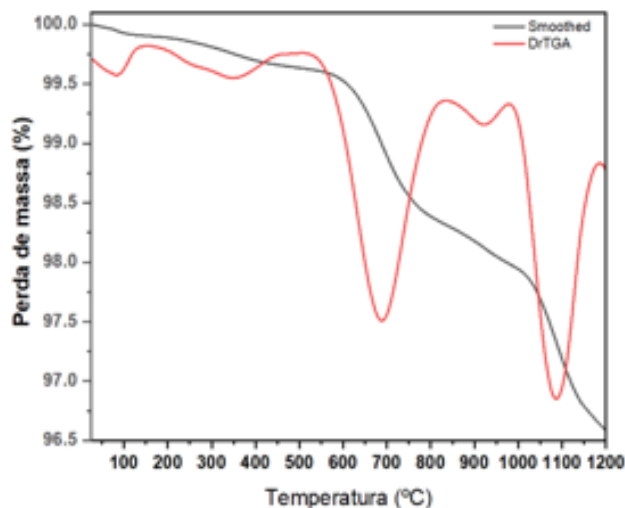
Figura 33 -TG e DTGA da Muscovita Monzogranito



Fonte: Autor (2024)

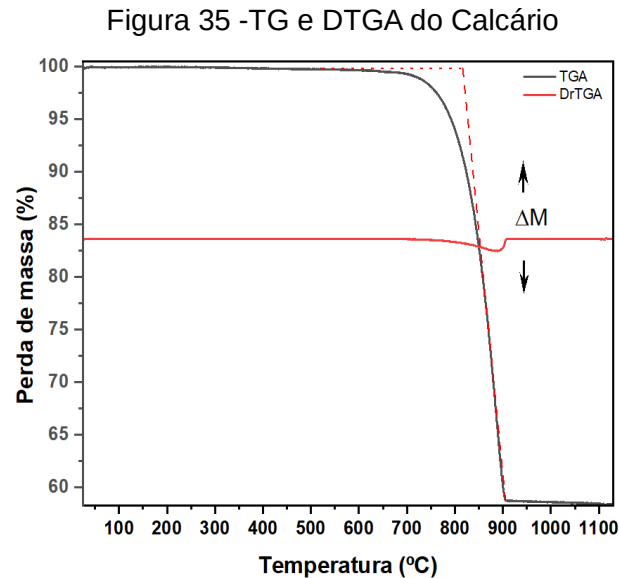
A Figura 34, demonstra a análise termogravimétrica da Zoisita Anfibolito, e contém três eventos, o primeiro ocorrendo à temperatura de 50,6°C com uma perda de 0,37% devido a eliminação da umidade adsorvida na superfície dos minerais, o segundo evento ocorre entre as temperaturas de 636,8°C e 760,81°C, com perda de 1,31%, que está relacionado à decomposição térmica da zoisita e clinozoisita, minerais do grupo dos epídotos, com a perda de hidroxilas transformando-se em fases amorfas ou óxidos, o último evento ocorre entre as temperaturas 1041,7°C e 1135,6°C, com perda de 1,37%, relacionado com a decomposição da tremolita, que perde água estrutural e se desestabiliza nessa faixa de temperatura, podendo ocorrer formação de fase amorfa ou fusão parcial dos silicatos.

Figura 34 -TG e DTGA da Zoisita Anfibolito



Fonte: Autor (2024)

A Figura 35, apresenta a análise termogravimétrica do Calcário, a perda de massa total foi de 40,88%, devido a liberação de dióxido de carbono (CO_2) por consequência da decomposição da calcita. Esse processo de descarbonatação é evidenciado pelo gráfico entre as temperaturas de 847,7°C e 928,1°C.



Fonte: Autor (2024)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – ENSAIOS TECNOLÓGICOS

A seguir, são apresentados os resultados das análises físicas realizadas para cada formulação estudada, abrangendo a retração linear (RL) de secagem e queima, perda ao fogo (PF), porosidade aparente (PA), massa específica aparente (MEA), absorção de água (AA) e módulo de ruptura à flexão (MRF) de secagem e queima. As amostras foram submetidas a temperaturas de queima de 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C. Os valores apresentados correspondem à média dos ensaios realizados em cinco corpos de prova para cada formulação e temperatura de sinterização, sendo também calculados a média e o desvio padrão.

5.2.1 Retração linear (RL)

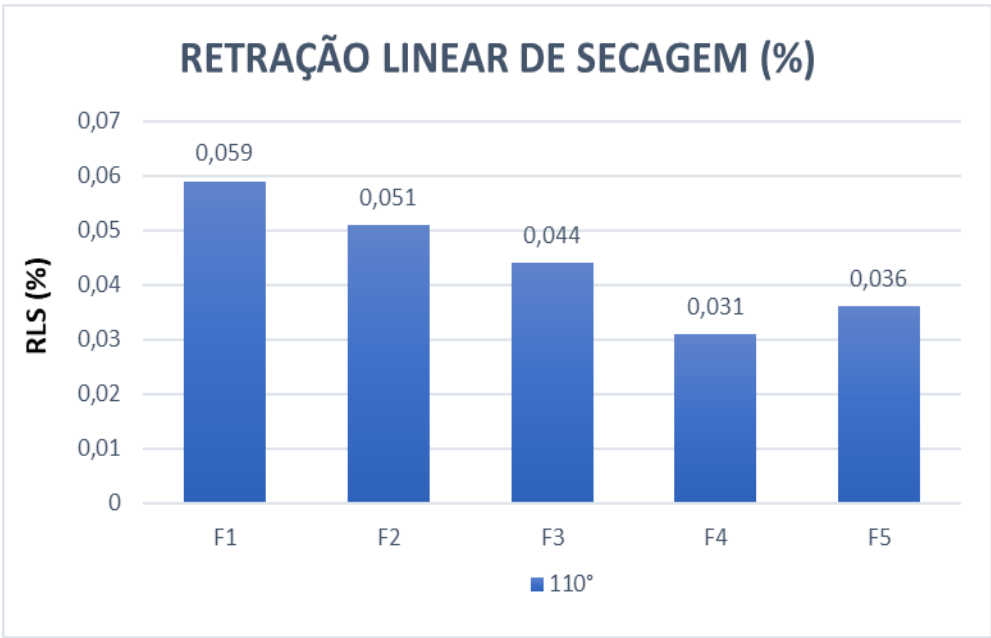
A Figura 36 e a Tabela 11 apresentam os resultados encontrados na RL de secagem a 110°C das formulações em estudo.

Tabela 11 – Retração linear de secagem (110°C)

RETRAÇÃO LINEAR SECAGEM (%)				
F1	F2	F3	F4	F5
0,059 ± 0,01	0,051 ± 0,02	0,044 ± 0,01	0,031 ± 0,01	0,036 ± 0,02

Fonte: Autor (2024)

Figura 36 – Retração linear de secagem (110°C)



Fonte: Autor (2024)

Os resultados obtidos para a retração linear de secagem demonstram que ela está diretamente relacionada a quantidade de argila presente na formulação, visto que a secagem remove a água livre e o maior percentual apresentado foi na formulação 1 (100% argila), percebe-se também que a menor retração ocorreu na formulação 4, isso se justifica pela alta presença dos óxidos de calcário e magnésio.

A Figura 37 e a Tabela 12 apresentam os resultados da RL de queima das formulações em estudo.

Pode-se observar que a retração aumenta com a temperatura, confirmando que a sinterização e a fusão das fases líquidas ocorrem progressivamente, devido à ocupação dos vazios, aproximação das partículas e eliminação dos gases aprisionados.

Em 1000°C e 1050°C, a retração é baixa para todas as formulações, indicando que a fusão dos componentes ainda é limitada. Já em 1100°C, há um salto

significativo na retração, especialmente para F1, F2 sugerindo uma fase de intensa sinterização. Por fim em 1150°C, a retração continua aumentando, mas com menor intensidade, possivelmente devido à formação de fase líquida estabilizadora.

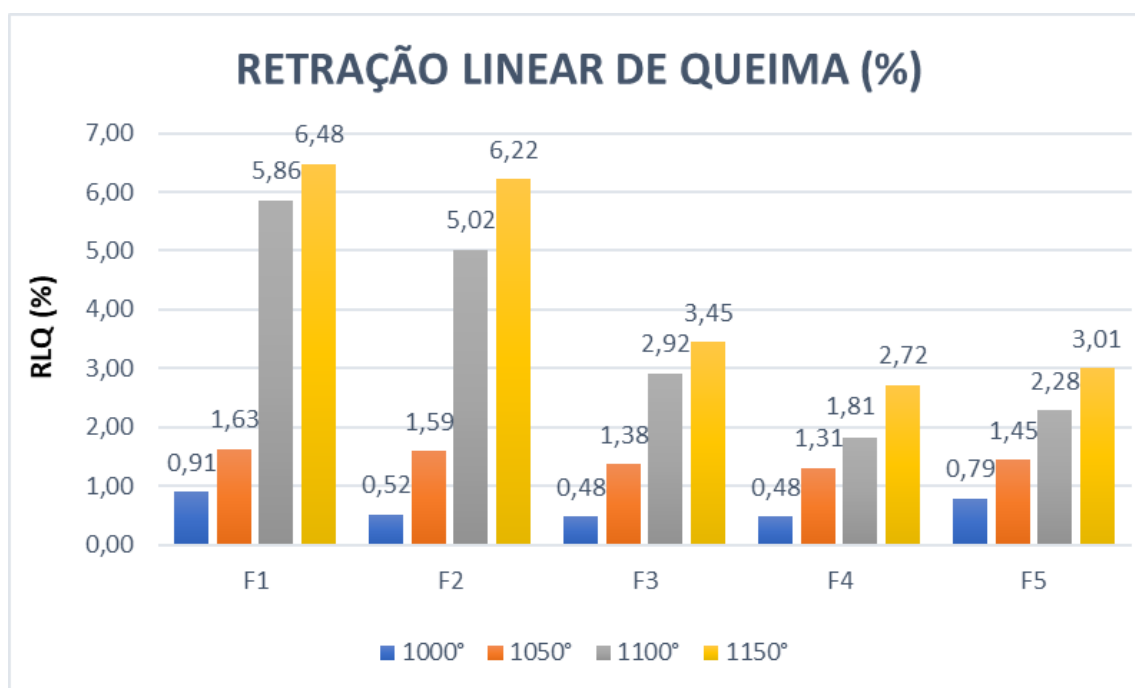
Importante destacar que a presença de óxidos de silício e alumínio contribui para a formação de fases líquidas durante a queima, promovendo maior densificação e, conseqüentemente, maior retração, já a presença de óxidos de cálcio e magnésio podem atuar como estabilizador da microestrutura, reduzindo a formação excessiva de fases líquidas e controlando a densificação (SILVA *et al.*, 2021).

Tabela 12 – Retração linear de queima

RETRAÇÃO LINEAR QUEIMA (%)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	0,91 ± 0,30	0,52 ± 0,24	0,48 ± 0,18	0,48 ± 0,19	0,79 ± 0,24
1050°	1,63 ± 0,23	1,59 ± 0,34	1,38 ± 0,04	1,31 ± 0,07	1,45 ± 0,09
1100°	5,86 ± 0,38	5,02 ± 0,04	2,92 ± 0,03	1,81 ± 0,27	2,28 ± 0,15
1150°	6,48 ± 0,33	6,22 ± 0,31	3,45 ± 0,21	2,72 ± 0,06	3,01 ± 0,11

Fonte: Autor (2024)

Figura 37 – Retração linear de queima



Fonte: Autor (2024)

5.2.2 Perda ao fogo (PF)

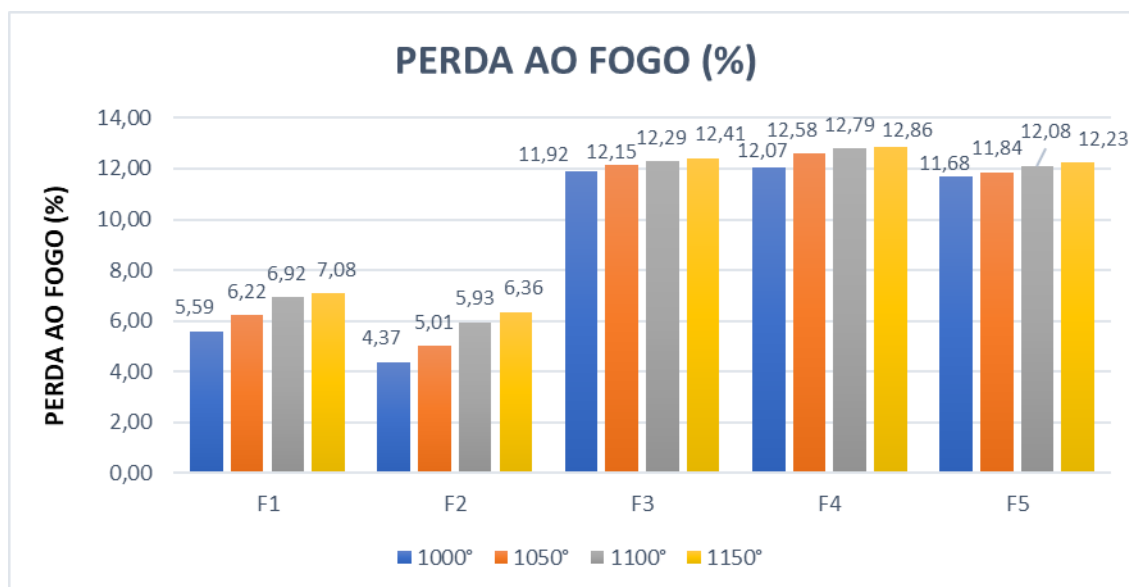
A Figura 38 e a Tabela 13 apresentam os resultados encontrados da perda ao fogo nas formulações e temperaturas estudadas.

Tabela 13 – Perda ao fogo

PERDA AO FOGO (%)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	5,59±0,26	4,37±0,06	11,92±0,19	12,07±0,03	11,68±0,22
1050°	6,22±0,53	5,01±0,26	12,15±0,43	12,58±0,17	11,84±0,29
1100°	6,92±0,11	5,93±0,21	12,29±0,11	12,79±0,23	12,08±0,18
1150°	7,08±0,18	6,36±0,48	12,41±0,69	12,86±0,19	12,23±0,28

Fonte: Autor (2024)

Figura 38 – Perda ao fogo



Fonte: Autor (2024)

Observa-se, pelos resultados obtidos, que com o aumento da temperatura em todas as formulações houve também o aumento da perda ao fogo. Em síntese, as formulações com maior percentual de calcário puro (F3, F4 e F5) exibem valores de perda ao fogo significativamente mais altos devido à liberação de CO₂. Já as formulações sem calcário puro (F1 e F2) apresentam perdas ao fogo mais modestas, e ocorre devido a desidroxilação das argilas.

Outro ponto importante a ser observado é que o aumento da perda ao fogo com o aumento da temperatura das formulações F1 e F2 é mais significativo se comparado com os resultados das formulações F3, F4 e F5, isso se deve ao fato que a maior parte da perda ao fogo das formulações com calcário ocorre antes dos 1000°C, de modo que, acima dessa temperatura, o ganho adicional de PF é limitado,

ao passo que as formulações sem calcário continuam liberando água estrutural até temperaturas mais elevadas.

De acordo com o Senai (2006) a perda ao fogo encontrada em todas as formulações entre 1000°C à 1500°C está dentro o parâmetro para as cerâmicas, que deve ser entre 6 a 16%.

5.2.3 Absorção de água (AA)

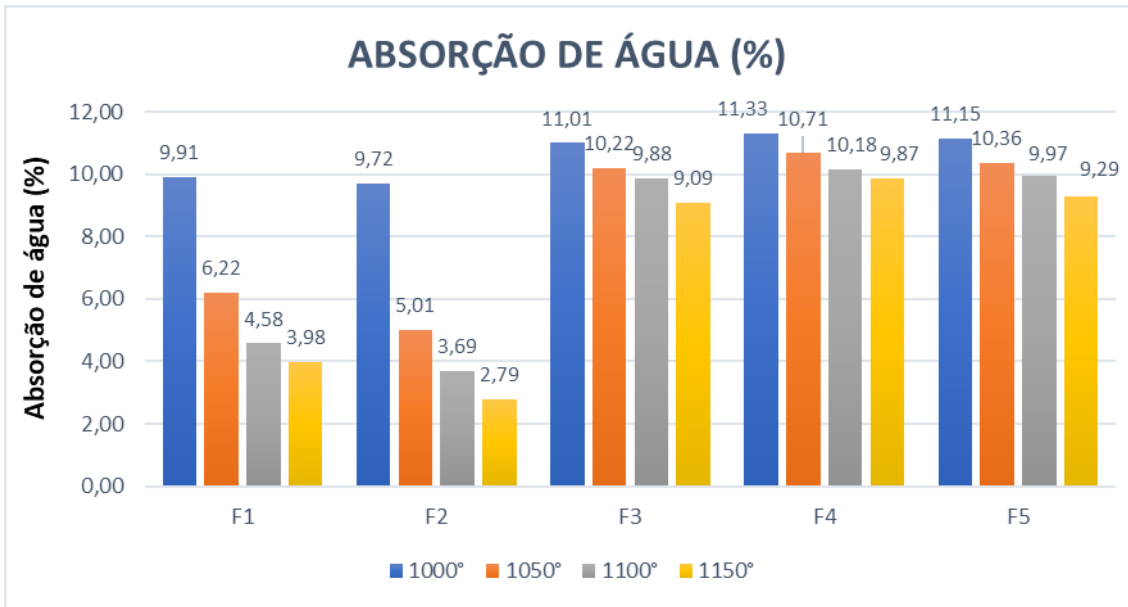
A Tabela 14 e a Figura 39 apresentam os resultados encontrados da absorção de água nas formulações e temperaturas estudadas.

Tabela 14 – Absorção de água

ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	9,91±0,33	9,72±0,16	11,01±0,21	11,33±0,57	11,15±0,67
1050°	6,22±0,51	5,01±0,63	10,22±0,21	10,71±0,15	10,36±0,48
1100°	4,58±0,22	3,69±0,15	9,88±0,87	10,18±0,51	9,97±0,39
1150°	3,98±0,85	2,79±0,39	9,09±0,62	9,87±0,19	9,29±0,23

Fonte: Autor (2024)

Figura 39 – Absorção de água



Fonte: Autor (2024)

A absorção de água dos corpos de prova apresentou, de forma geral, valores menores com o aumento da temperatura, sendo que o decréscimo mais significativo ocorreu a partir da temperatura de 1050°C nas formulações F1 e F2, e obteve melhores resultados à 1150°C.

Os resultados da absorção de água corroboram com as análises químicas e

mineralógicas, por exemplo, os resultados da formulação F1 mostram que a composição da massa formada por argila ilítica, hematita é sinterizada em temperatura mais baixa, promovendo a formação apreciável de fase líquida a partir de 1000°C, ou seja, perde água combinada e passa por sinterização progressiva, sobretudo devido à presença de K₂O (fundente). Já na formulação F2, a presença de muscovita monzogranito (rica em K₂O) e zoisita anfibolito (com MgO) contribui para uma fusão mais efetiva, e essa sinergia de fundentes (K₂O, MgO, CaO) permite uma densificação muito eficiente, resultando na menor absorção final entre todas as formulações.

As formulações F3, F4 e F5 apresentaram os maiores valores de absorção de água, e caem menos ao longo do aumento da temperatura, por conta da presença do calcário puro. A descarbonatação, que ocorre em torno de 850°- 900°C, cria poros que não são totalmente preenchidos ou selados pelos fundentes, resultando em absorções finais mais altas.

Na formulação F1 têm-se valores que, segundo a NBR ISO 13006 (2020), se enquadram, tanto para o revestimento semiporoso (entre 6% e 10%), entre 1000°C e 1050°C, como para o semigrês (entre 3% e 6%) nas temperaturas de 1100°C e 1150°C, na formulação F2, os resultados obtidos se enquadram para o revestimento semiporoso, a 1000°C, semigrês, entre 1050°C e 1100°C e grês (entre 0,5% e 3%) à temperatura de 1150°C. Nas formulações F3 e F5, entre 1000°C à 1050°C, os valores de absorção de água, se enquadram para o revestimento poroso (acima de 10%), e semiporoso entre 1100°C e 1150°C, já na formulação F4, que obteve os maiores resultados para o ensaio, entre 1000°C e 1100°C o revestimento se enquadra na classificação porosa e na temperatura de 1150°C é classificado como semiporoso.

5.2.4 Porosidade aparente (PA)

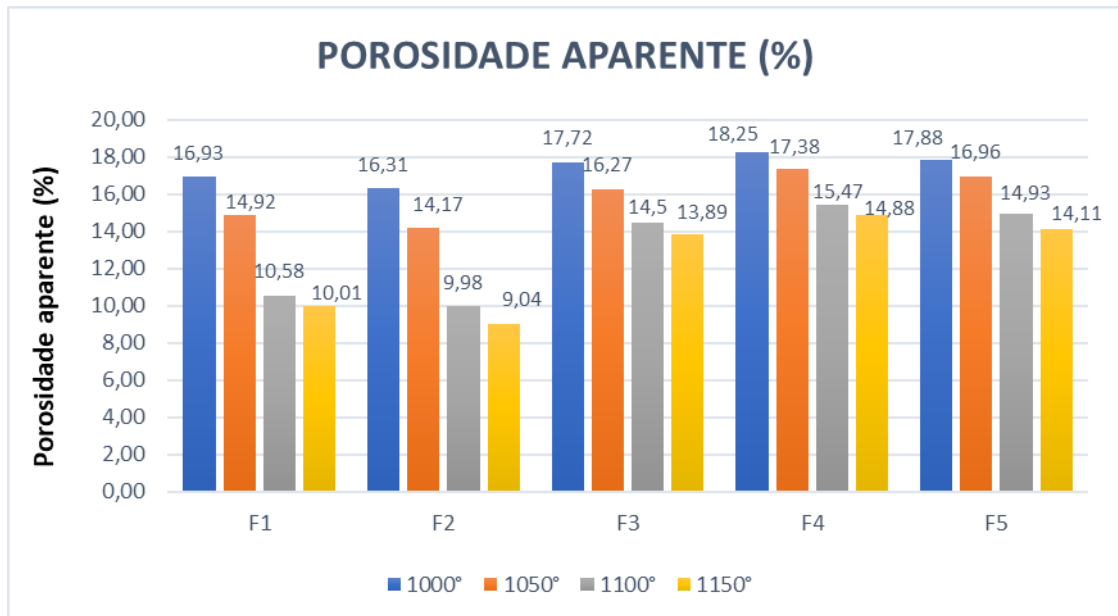
A Tabela 15 e a Figura 40 apresentam os resultados encontrados da porosidade aparente nas formulações e temperaturas estudadas.

Tabela 15 – Porosidade aparente

POROSIDADE APARENTE (%)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	16,93±0,26	16,31±0,45	17,72±0,32	18,25±0,49	17,88±0,52
1050°	14,92±0,23	14,17±0,37	16,27±0,28	17,38±0,47	16,96±0,31
1100°	10,58±0,32	9,98±0,21	14,50±0,58	15,47±0,17	14,93±0,73
1150°	10,01±0,43	9,04±0,39	13,89±0,33	14,88±0,26	14,11±0,22

Fonte: Autor (2024)

Figura 40 – Porosidade aparente



Fonte: Autor (2024)

O resultado da porosidade aparente nos corpos de prova, apresentou valores menores com o aumento da temperatura, indicando uma maior reatividade entre os componentes das massas e uma maior quantidade de formação de fase líquida, principalmente entre as temperaturas de 1000°C e 1100°C.

Observa-se também que nas formulações que não apresentam calcário de forma pura (F1 e F2) houve uma maior redução de porosidade, visto que o efeito da descarbonatação (liberação de CO_2) tende a manter a porosidade mais elevada, e a ação dos fundentes nessas formulações favorecem a sinterização, fechando os poros de forma mais intensa, o que explica a redução expressiva na porosidade aparente conforme a temperatura se eleva.

Outro ponto importante a ser observado é que o gráfico da porosidade tem uma similaridade com o gráfico de absorção de água, visto que quanto maior a quantidade de poros abertos maior será a absorção de água (SOUSA, 2017). Cabe ressaltar que a porosidade impacta diretamente a resistência mecânica dos corpos sinterizados; portanto, quanto menor a quantidade de poros, mais resistente será o material.

5.2.5 Massa específica aparente (MEA)

A Tabela 16 e a Figura 41 apresentam os resultados encontrados da massa

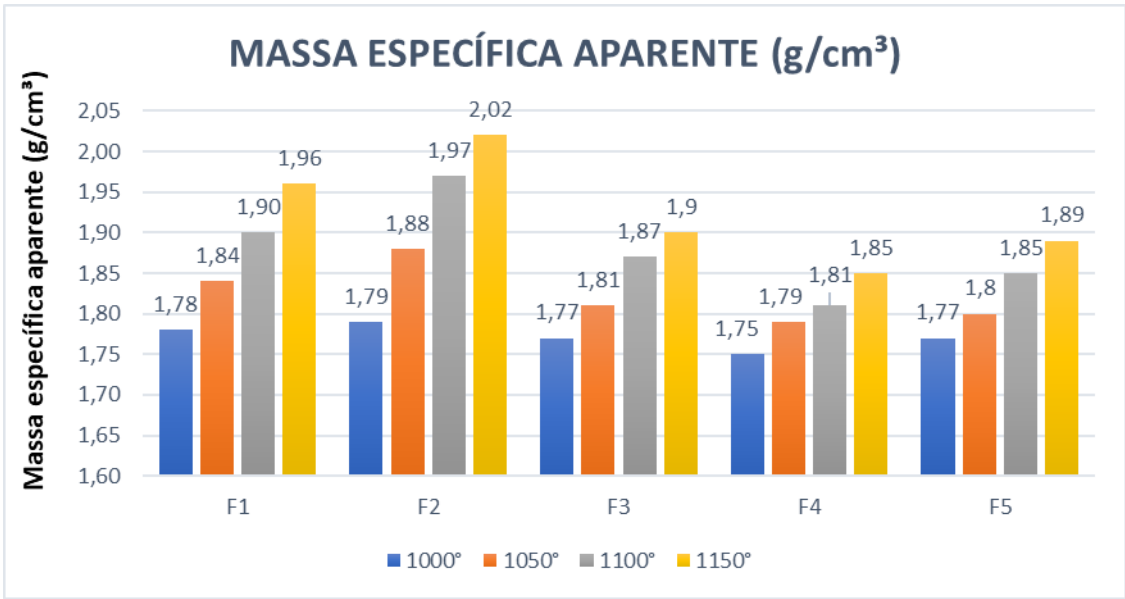
específica aparente nas formulações e temperaturas estudadas.

Tabela 16 – Massa específica aparente

MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm³)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	1,78 ± 0,06	1,79 ± 0,03	1,77 ± 0,11	1,75 ± 0,06	1,77 ± 0,16
1050°	1,84 ± 0,04	1,88 ± 0,02	1,81 ± 0,05	1,79 ± 0,05	1,80 ± 0,07
1100°	1,90 ± 0,03	1,97 ± 0,03	1,87 ± 0,16	1,81 ± 0,12	1,85 ± 0,12
1150°	1,96 ± 0,04	2,02 ± 0,02	1,90 ± 0,14	1,85 ± 0,09	1,89 ± 0,07

Fonte: Autor (2024)

Figura 41 – Massa específica aparente



Fonte: Autor (2024)

Observa-se que, à medida que a temperatura se eleva, a massa específica aparente também aumenta. Esse comportamento está em consonância com os resultados de absorção de água e porosidade aparente, pois, em corpos cerâmicos mais densos, a quantidade de vazios internos tende a diminuir, devido a retração das peças. Durante a queima, o corpo cerâmico sofre diversas transformações químicas e físicas, tais como o rearranjo das partículas, a fusão dos componentes fundentes, a formação de uma fase líquida, o crescimento dos grãos, além da liberação e aprisionamento de gases (ARAÚJO, 2019).

Neste cenário, a sinterização dominada pelo fluxo viscoso (vitrificação) desempenha um papel crucial na densificação dos corpos de prova. Outro ponto importante a ser observado é que a formulação F2 apresenta sempre os maiores valores independente da temperatura, isso se deve ao fato dos óxidos fundentes

presentes na sua composição como o potássio, magnésio.

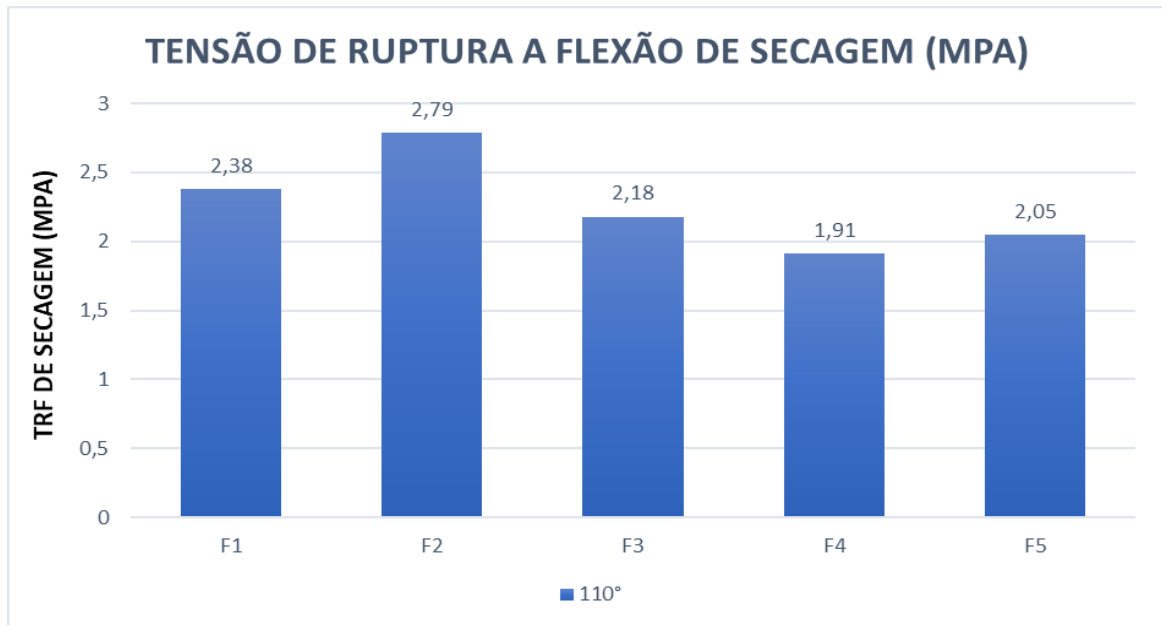
5.2.6 Tensão de ruptura à flexão (TRF)

A Tabela 17 e a Figura 42 apresentam os resultados da tensão de ruptura à flexão de secagem a 110°C das formulações estudadas.

Tabela 17 – Tensão de ruptura a flexão de secagem à 110°C				
TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO DE SECAGEM (MPA)				
F1	F2	F3	F4	F5
2,38 ± 0,28	2,79 ± 0,31	2,18 ± 0,27	1,91 ± 0,07	2,05 ± 0,32

Fonte: Autor (2025)

Figura 42 – Tensão de ruptura a flexão de secagem à 110°C



Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos para a tensão de ruptura a flexão de secagem apresentam baixos valores, se comparados aos resultados apresentados a seguir da etapa de queima, ou seja, o processo de sinterização é o principal responsável pela densificação e aumento significativo da resistência mecânica, visto que a temperatura de 110°C não há a fusão dos fundentes, não permitindo a redução dos poros.

A Tabela 18 e a Figura 43 apresentam os resultados da tensão de ruptura à flexão de queima nas formulações e temperaturas estudadas.

Observa-se que resultados da tensão de ruptura à flexão (TRF) demonstram um comportamento consistente com o processo de sinterização, onde o aumento da temperatura promove o fechamento de poros e a densificação do corpo cerâmico, resultando em valores mais altos de resistência mecânica. Esse aumento ocorre porque a elevação da temperatura favorece a fusão dos componentes fundentes (como K_2O , MgO , CaO presentes nos materiais).

As formulações, compostas exclusivamente por argila (F1) ou por uma combinação de argila, muscovita monzogranito e zoisita (F2), atingem TRF mais elevadas (por exemplo, F2 alcança 34,23 MPa aos 1150°C). A ausência de calcário puro evita a criação de poros extras decorrente da descarbonatação, e a presença de minerais ricos em fundentes (especialmente K_2O presente na muscovita) contribui para uma sinterização mais eficiente.

A incorporação de calcário nas formulações F3, F4 e F5 leva à liberação de CO_2 durante a decomposição do $CaCO_3$, o que gera poros adicionais que não são totalmente fechados mesmo com o aumento da temperatura. Como resultado, os valores de TRF para essas formulações são menores (por exemplo, F3 chega a 21,57 MPa aos 1150°C) quando comparados com F1 e F2.

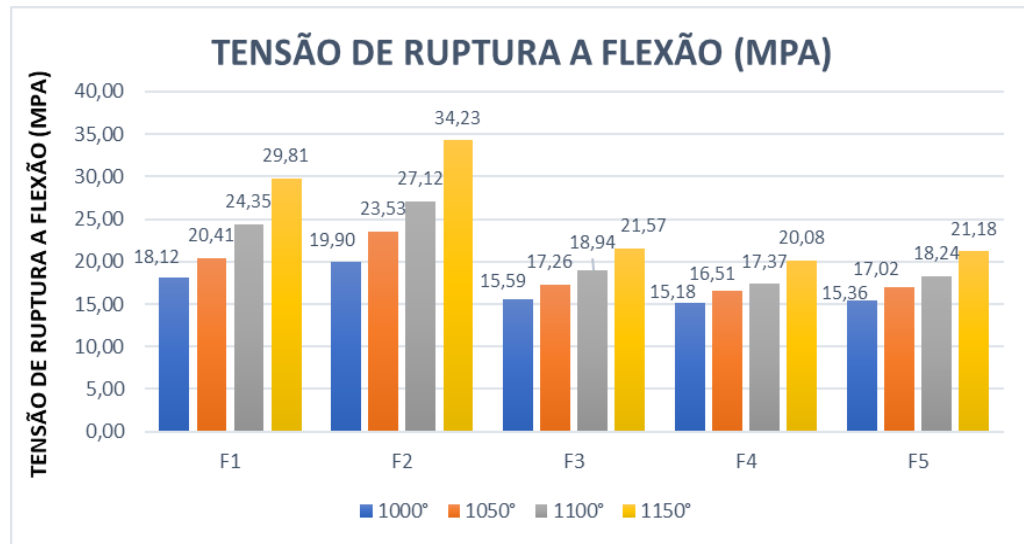
Os resultados da TRF corroboram com os resultados da absorção de água e da porosidade aparente, visto que há uma relação inversa entre a TRF e os índices de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA). Isso significa que, à medida que a absorção e a porosidade diminuem (indicando uma densificação maior do material), a TRF tende a aumentar. Em outras palavras, corpos cerâmicos com menos vazios e melhor sinterizados apresentam maior resistência mecânica à flexão.

Tabela 18 – Tensão de ruptura a flexão à queima

TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO (MPa)					
TEMPERATURA (°C)	F1	F2	F3	F4	F5
1000°	18,12±0,13	19,90±0,21	15,59±0,33	15,18±0,14	15,36±0,38
1050°	20,41±0,35	23,53±0,48	17,26±0,41	16,51±0,32	17,02±0,29
1100°	24,35±0,28	27,12±0,45	18,94±0,24	17,37±0,18	18,24±0,52
1150°	29,81±0,07	34,23±0,21	21,57±0,16	20,08±0,28	21,18±0,13

Fonte: Autor (2025)

Figura 43 – Tensão de ruptura a flexão à queima



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 19 representa a classificação dos revestimentos cerâmicos deste estudo relacionando a formulação, temperatura, absorção de água, resistência mecânica, segundo a NBR ISO 13006 (2020) para cerâmicas prensadas.

Tabela 19 – Classificação dos revestimentos cerâmicos

Formulação	Temperatura (°C)	Absorção de água (%)	Resistência mecânica (MPa)	Classificação NBR ISO 13006
F1	1000°	9,91	18,12	Semiporoso
	1050°	6,22	20,41	Semiporoso
	1100°	4,58	24,35	Semigrês
	1150°	3,98	29,81	Semigrês
F2	1000°	9,72	19,90	Semiporoso
	1050°	5,01	23,53	Semigrês
	1100°	3,69	27,12	Semigrês
	1150°	2,79	34,23	Grês
F3	1000°	11,01	15,59	Poroso
	1050°	10,22	17,26	Poroso
	1100°	9,88	18,94	Semiporoso
	1150°	9,09	21,57	Semiporoso
F4	1000°	11,33	15,18	Poroso
	1050°	10,71	16,51	Poroso
	1100°	10,18	17,37	Poroso

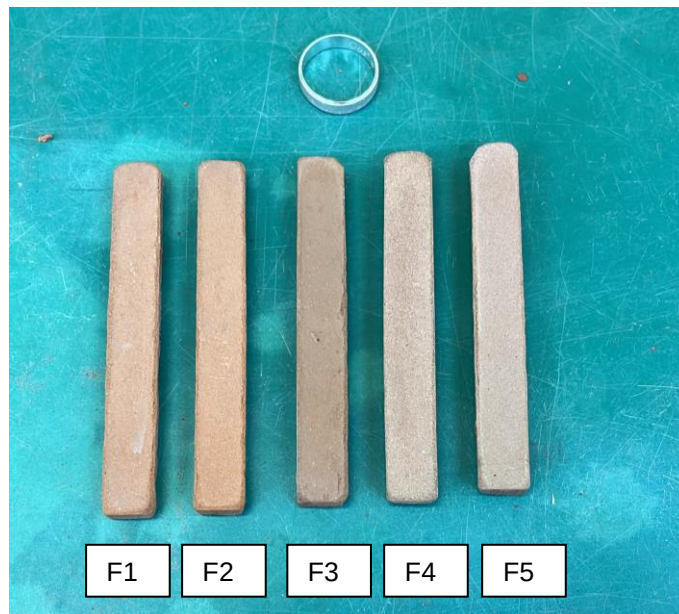
F5	1150°	9,87	20,08	Semiporoso
	1000°	11,15	15,36	Poroso
	1050°	10,36	17,02	Poroso
	1100°	9,97	18,24	Semiporoso
	1150°	9,29	21,18	Semiporoso

Fonte: Autor (2025)

5.3 ANÁLISE MACROESTRUTURAAL

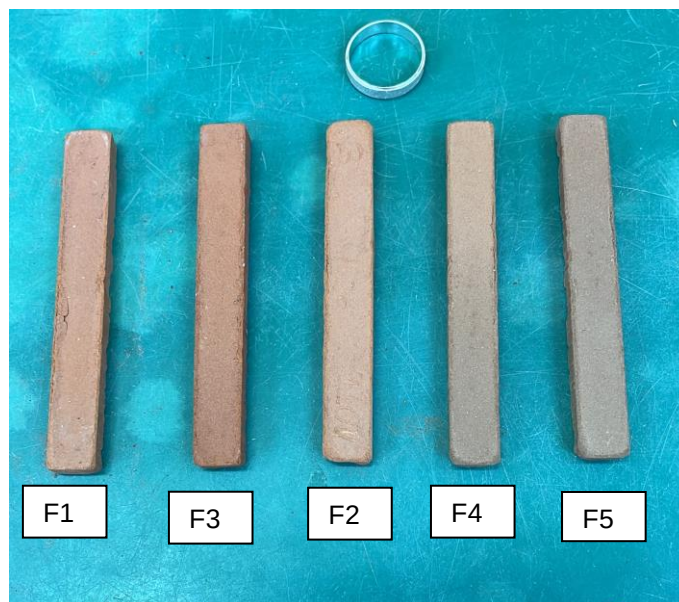
As Figuras 44, 45, 46 e 47 mostram a evolução macroestrutural dos corpos de prova de todas as composições em função da temperatura de queima. As amostras da esquerda pra direita estão em ordem crescente de formulação (F1, F2, F3, F4 e F5).

Figura 44 – Formulações à 1000°C



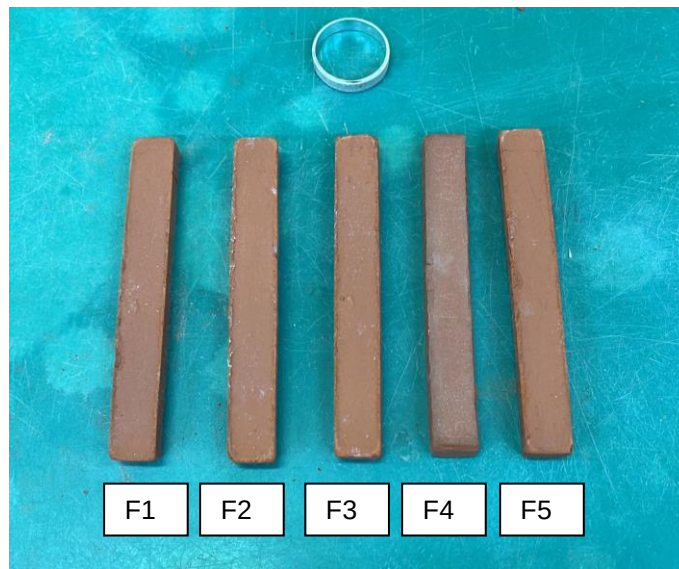
Fonte: Autor (2024)

Figura 45 – Formulações à 1050°C



Fonte: Autor (2024)

Figura 46 – Formulações à 1100°C



Fonte: Autor (2024)

Figura 47 – Formulações à 1150°C



Fonte: Autor (2024)

Verifica-se que todas as composições apresentam coloração avermelhada, atribuída à presença de óxidos de ferro nas matérias-primas, conforme identificado na análise por fluorescência de raios X (FRX). Tal característica é típica de materiais

oriundos da indústria de cerâmica vermelha.

Observa-se ainda que, com o aumento da temperatura de queima, os corpos de prova passam gradualmente a exibir tonalidades mais escuras, tendendo ao marrom, comportamento comum em materiais que contêm óxido de ferro.

Nota-se que os corpos de prova queimados a 1000°C apresentaram uma coloração esbranquiçada, sendo um comportamento típico de eflorescência. Esse fato está alinhado com os resultados da porosidade e absorção de água que, em baixas temperaturas, se mostraram mais elevados, favorecendo o transporte de soluções alcalinas e alcalinas terrosas para a superfície por capilaridade, por conta dos óxidos presentes em cada formulação, por exemplo o potássio e o cálcio. Em contrapartida, nas temperaturas mais elevadas, não houve alterações visuais relacionadas a eflorescência, o que evidencia a importância no processo de sinterização, que promove o fechamento dos poros e redução da absorção da água.

Observou-se que, nas temperaturas de 1050°C e 1100°C, as formulações apresentaram superfície regular e aspecto liso, sem evidências de deformações visuais. No entanto, nas formulações submetidas à temperatura de 1150°C, foi possível identificar o início do arredondamento das arestas dos corpos de prova, comportamento que indica a proximidade do limite térmico de queima, a partir do qual a estabilidade dimensional das peças pode ser comprometida.

De modo geral, nas temperaturas de 1050°C, 1100°C e 1150°C os corpos de prova apresentaram boa homogeneidade quanto à coloração e à textura superficial, não sendo observadas deformações relevantes ou defeitos visuais significativos que comprometessem as peças após a queima.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e nas propriedades das matérias-primas empregadas, é possível extrair algumas conclusões que evidenciam as dificuldades envolvidas na reformulação de uma massa cerâmica e no uso de matérias-primas diferentes do tradicional, dentro do estudo de revestimento cerâmico. Esses aspectos são detalhados a seguir:

- A caracterização das matérias-primas indicou uma distribuição granulométrica bastante homogênea, o que favorece um preenchimento mais eficiente da matriz de conformação durante a prensagem, além de intensificar a reatividade entre os componentes da massa cerâmica no processo de queima.
- Os resultados das análises química, mineralógica e térmica indicaram que a massa cerâmica industrial é formada por argilas fundentes de coloração avermelhada após a queima, com elevado conteúdo de ilita como principal argilomineral. Essas características são típicas das argilas utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos. Indicaram também que as matérias-primas Muscovita Monzogranito, Zoisita Anfíbolito e Calcário, agem como fundentes, que são responsáveis pela refratariedade do material final e diminuição dos poros.
- A retração linear variou de 0,37% a 6,48% notando uma relação direta com o aumento da temperatura. A presença de calcário demonstrou ser eficaz na melhora da estabilidade dimensional das peças cerâmicas, sendo possível, em determinadas composições, alcançar valores de retração linear de queima compatíveis com os requisitos para a fabricação de revestimentos porosos e semiporosos, principalmente nas formulações F3, F4 e F5.
- Os resultados da absorção de água e porosidade apontou uma relação inversa com a temperatura, ou seja, com o aumento da temperatura houve a redução da absorção e porosidade. Percebe-se que nas formulações que tiveram uma maior adição do calcário puro, F3, F4 e F5, foi obtido maiores valores na porosidade e na absorção se comparado com as formulações F1 e F2, por conta da descarbonatação, que tende a manter a porosidade mais elevada, nas temperaturas mais baixas, resultando em absorções altas.

- A tensão de ruptura à flexão de queima variou de 15,18 MPA à 34,23 MPA, sendo que os maiores valores foram obtidos nas formulações que apresentaram os menores índices de porosidade e absorção, F1 e F2, visto que os corpos cerâmicos com menos vazios e melhor sinterizados apresentam maior resistência à flexão.
- Os resultados alcançados evidenciam a viabilidade de desenvolver composições adequadas à aplicação em revestimentos cerâmicos. As matérias-primas provenientes do estado do Piauí demonstraram ser tecnicamente apropriadas e apresentar boa qualidade para utilização em massas cerâmicas destinadas a essa finalidade, como revestimento poroso, semiporoso, semigrês e grês.
- Com base nos resultados obtidos para retração linear, perda ao fogo, massa específica aparente, absorção de água, porosidade e resistência à flexão, os corpos de prova da formulação F2, submetidos à queima à 1150°C, apresentaram o melhor desempenho. Esses parâmetros possibilitaram classificá-los como revestimentos cerâmicos do tipo grês.
- Com relação a análise macroestrutural, nas temperaturas de 1050°C, 1100°C e 1150°C os corpos de prova apresentaram boa homogeneidade quanto à coloração e à textura superficial, não sendo observadas deformações relevantes que comprometessem o aspecto estético das peças após a queima.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. C. de. **Processos de fabricação de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: Cetem – Centro de Tecnologia Mineral, 2022. 55 p.
- AGUILELLA, M.; FOUCARD, L.; MALLOL, G.; SÁNCHEZ, M. J.; LÓPEZ, M.; BENAGES, R. **Estudio y control automático de la operación de extrusión de baldosas cerâmicas**. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vitrio. Vol. 51 (2) p. 83-88 (2012).
- ALBERO, J. L. A. A. **Operação de Prensagem**: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial. Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde. Cerâmica Industrial. V.5, Nº 5, P. 23-28, 2000
- ALBERO, J. L. A. A. **Operação de Prensagem**: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial. Parte II: Compactação. Cerâmica Industrial. V.5, Nº 6, P. 14-40, 2000.
- ALBERO, J. L. A. A. **Operação de prensagem**: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte V: descrição da etapa de prensagem. Revista cerâmica, V.6, Nº3, P. 26, 2001.
- ALMEIDA, K. S. de; OLIVEIRA, Y. L. de; LINHARES JUNIOR, Z.; ANCELMO, L.; SOARES, R.A.L. **Panorama da indústria cerâmica vermelha no Piauí**. In: 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Bento Gonçalves, 2014, p. 1150 -1162.
- ALVES, L. R. **Reaproveitamento de resíduos de vidro em formulações de massa cerâmica vermelha**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina - PI, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C – 973 – 88**. Water absorption, 1980.
- AQUINO, R. C. A. de. **Influência da Secagem de Massa de Revestimento Cerâmico em Indústria e Laboratório**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- Araujo, R. dos S. G. de. **Estudo da adição de feldspato em massa cerâmica de telhas prensadas para produção de adoquim**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central Mestrado em Engenharia de Materiais, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **ABCERAM**, 2023. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>> Acesso em: 21 jan. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545**: Placas cerâmicas, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-3**: Placas cerâmicas - Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-4**: Placas cerâmicas - Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10611**: Corpo de prova - forma e tipos de ensaios – padronização. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13006**: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15463**: placas cerâmicas para revestimento - porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **ANFACER**, 2019. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/brasil>>. Acesso em: 20 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **ANFACER**, 2021. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/brasil>>. Acesso em: 20 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO. **ASPACER**., 2016. Disponível em: <<http://www.aspacer.com.br/>>. Acesso em: 06 nov. 2022.

AVELINO, F. P. **Estudo de formulações para produção de revestimento cerâmico a partir de matérias-primas encontradas no estado do Piauí com adição de pó de vidro**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Instituto Federal do Piauí, Teresina, 2019.

BARBOSA, A. Q.; SANTOS, C. D. B.; COSTA, D. M. **Análise geral dos processos de fabricação de materiais cerâmicos para o setor da construção civil**.

Interfaces científicas - exatas e tecnológicas. Aracaju, 2016. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/230437003.pdf>>. Acesso em 03 de abril de 2022.

BARBOSA, D. S.; SILVA, J. E. da.; MACHADO, R. A. F.; HOTZA, D. Controle e automação na indústria cerâmica: estudo de caso na fabricação de porcelanato no Brasil. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 4, p. 23-30, 2008.

BIFFI, G. **O Grês Porcelanato**: manual de Fabricação e Técnicas de Emprego. São Paulo: Faenza (Gruppo Editoriale), 2006.

BOCH, P.; NIÈPCE, J. C. (2007). **Ceramic Materials** - Processes, Properties and Applications, ISTE.

BRASILEIRO, C. T. **Impacto e Perspectivas do Uso do Filito em Massas de Porcelanato Esmaltado**. Mundo Cerâmico, 2021.

- BUCHER, R. G. **Petrogenesis of metamorphic rocks**. 8^a. ed. [S.l.]: Springer, 2011.
- CABRAL JUNIOR, M. **Matérias-primas para a produção de porcelanato no Brasil: cenário atual, demandas e oportunidades**. Trabalho apresentado na Expo Revestir, 2018, [São Paulo, Brasil]. Disponível em: <<http://escriba.ipt.br/pdf/175099.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M. de; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte II – Indústria de Revestimento. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 2, p. 13 – 21, 2019.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 9^oed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. de A. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7^a ed, Volume 1. Rio de Janeiro, LTC, 2015.
- CARASEK, E.; TONJES, J. W.; SCHARF, M. Pré-Concentração de Chumbo e Cádmio em Um Sistema de Micro Extração Líquido-Líquido e Determinação por Espectrometria de Absorção Atômica com Chama. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 748-752, 2002.
- CARNAÚBA, T. M. G. V. **Desenvolvimento de suporte para placa de revestimento cerâmico com incorporação do resíduo sólido do tratamento de salmoura**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Materiais. Maceió, 2018. cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, v.5, p.23-27, 2000.
- CEPRO – Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí. **Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do estado do Piauí**. Teresina – PI: Fundação CEPRO, 2015.
- CHATTERJEE, A., CHITWADGI, S., KULKARNI, M., KAVIRAJI, A. K. Efeito da Razão entre Feldspatos Sódico e Potássico no Desenvolvimento de Fases e Microestrutura de Porcelanatos Queimados. **Cerâmica Industrial** 6, (5) Setembro/Outubro: 23-26, 2001.
- CONSTANTINO, A. D.; ROSA, S. E. S.; CORRÊA, A. R. **Panorama do Setor de Revestimentos Cerâmicos**. 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15303/1/Panorama%20do%20Setor%20de%20Revestimentos%20Cer%a2micos_P.pdf> Acesso em: 03 nov. 2022.
- COSTA, G.; SAMPAIO, P. T. B.; RIBEIRO, R. A. S.; MENDONÇA, R. M.; SOARES, J. J. Formulação de massa cerâmica para revestimento poroso utilizando resíduos de madeiras tropicais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 2348-2371, 2022. DOI 10.5902/1980509870383.
- Disponível em: <<https://doi.org/10.5902/1980509870383>>. Acesso em: 14 jan. 2023
- Coutinho, J., Krättner, H., Sassi, F., Schmid, R. & Sen, S. 2007. **Amphibolite and granulite**.
- DENARI, G.B., CAVALHEIRO, E.T.G., **Princípios e aplicações de análises térmicas**. Instituto de Química de São Carlos (IQSC), Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.

DIAO, I.; DIAGNE, M.; DIA, I. **Characterization of fired clay bricks for an economic contribution of the exploitation of thick clay deposit**. Materials Sciences and Applications, v. 12, p. 389-416, 2021.

DOBERSTEIN, A. W. **O Egito antigo**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2010.

EMMERICH, K.; STEUDEL, A. Análise Térmica de Matérias-primas Argilosas. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 2, mar. 2016.

EMMERT, F., PEREIRA R. **Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais**: estudo de caso. Ciência Florestal. 2016

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **UNI EN 14411**. Ceramic tiles-definitions, classification, characteristics, evaluation of conformity and marking, 2016.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **UNI EN 159**. Piastrelle di ceramica pressate a secco con assorbimento d'acqua E > 10%. Gruppo B III. 1992

Fettes D., Desmons J. 2007. **Metamorphic rocks**: a classification and glossary of terms. Cambridge, 244p

FRAMINAN, J. M., LEISTEN, R., RUIZ, R. G. Manufacturing Scheduling Systems: An Integrated View on Models, Methods and Tools, Springer, 2014, ISBN 987-1-4471-6271-1. **European Journal of Operational Research**. 249.10.1016/j.ejor.2015.09.065.

FRIZZO, R. G.; ZACCARON, A.; NANDI, V de S.; BERNARDIN, A. M. Pyroplasticity on porcelain tiles of the albite-potassium feldsparkaoilin system: A mixture design analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101432, set. 2020.

GIBERTONI, C.; PAULIN, F. P.; MORELLI, M. R. Caracterização de Cerâmicas Sinterizadas por Fluxo Viscoso. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, out./dez. 2005

HOLANDA, J. N. F.; SILVA, M. A.; PAES JÚNIOR, H. R. Reuse of ornamental rockcutting waste in aluminous porcelain. **Journal of Environmental Management**, v. 92: 936-940, 2011.

HOTZA, D. Etimologia e uso em diferentes línguas de alguns termos técnicos empregados na fabricação de cerâmica tradicional. **Cerâmica industrial**, 12, 4 (2007).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - **IBGE**. Mapa Político do Piauí. Piauí: IBGE, 2023.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Seção de materiais didáticos**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/igneas/granito/> . Acesso em: 02 mar. 2024.

JERMOLOVICIUS, A. B.; MOLISANI, A. L. Porcelana colorida translúcida para luminárias decorativas. **Cerâmica**, v. 64, p. 341–351, 2018.

Kocak, Kerim & Kurt, Hüseyin & Zedef, Veysel & Ferre, E. (2007). Characteristics of the amphibolites from Nigde metamorphics (Central Turkey), deduced from whole rock and mineral chemistry. **Geochemical Journal**. 41. 241-257. 10.2343/geochemj.41.241.

LOLLI, L.; NASSETTI, G.; MARINO, L.F.B. A preparação a seco de massas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v.5, p.23-27, 2000.

MACEDO, R. S. *et al.* Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Campina Grande, n. 54, p. 411-417, 2008.

MAIA, F. S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 2012.

MARTÍN, F. L. Processos produtivos em revestimentos cerâmicos: variáveis de processo e possíveis causas de defeitos. **Cerâmica Industrial**, 9, 5/6 (2004) 7.

MÁS, E., **Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha**, apostila 3, p. 9 a 29. Editora Polo Produções, 2005.

MATOS, G. C. de; ORTIGOSSA, L. F.; INÁCIO, M. E. M. M.; PEREIRA, V. R.; CYMROT, R. **Análise de perdas no processo produtivo via seca de uma indústria cerâmica**. XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, Paraná, 2021.

MENDONÇA, A.N.M da S.; **AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA EM DIFERENTES MEIOS AQUOSOS**. Goiânia, 2022

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. 2018. Disponível em: <
<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-2019-ano-base-2018.doc/view>> Acesso em: 18 fev. 2024.

MORENO, M. M. T. **ARGILAS: Composição Mineralógica, Distribuição Granulométrica e Consistência de Pastas**. 2012. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Livre-Docente em Argilas Para Cerâmica, Instituto de Geociências e Ciências Exatas-Unesp, Rio Claro - Sp, 2012.

NANDI, V. S.; MONTEDO, O. R. K.. Otimização do Processo de Moagem de Engobes Cerâmicos para Produção de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, Criciúma, v. 14, n. 4, p.24- 28, ago. 2009. Disponível em:
<<https://ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/5876573d7f8c9d6e028b476b>>. Acesso em: 12 set. 2023.

OLIVEIRA, A. P. de; HOTZA, D. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos**. Florianópolis: [s. n.], 2015.

PADRO, U. S.; BRESSIANI, J. C. **Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década**. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n. 1, 2013.

QUEIROZ, A. F. S.; **Ambiente em desenvolvimento – Soluções geológicas e ambientais**. Relatório técnico, análise petrográfica com ênfase em agrominerais potencias. N° 002/2023 e 011/2023. Pará, 2023.

RAMOS, S. de O.; DANTAS, G. C. B.; LIRA, H. de L.; PIMENTEL, P. M.; MARCIANO, J. E. A.. Caracterização de argilas de novos jazimentos situados em Parelhas/RN, Brasil, visando aplicação na indústria cerâmica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 1-9, nov. 2019. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0667>

REHMAN, M. U.; AHMAD, M.; RASHID, K. **Influence of fluxing oxides from waste on the production and physico-mechanical properties of fired clay brick: a review**. *Journal of Building Engineering*, v. 27, n. 8, 100965, 2020.

- ROCHA, F. N.; SUAREZ, P. A. Z.; GUIMARÃES, E. M. Argilas e suas Aplicações em Utensílios e Materiais Cerâmicos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 4, p. 1105-1120, 2014.
- RODRIGUES, A. M., PIANARO, S. A., BERG, E. A. T., SANTOS, A. H. Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grés porcelanato. **Cerâmica industrial**, 9, 1 (2004) 33.
- ROSSO, J.; CUNHA, E. D.; ROJAS-RAMÍREZ, R. A. Características Técnicas e Polimento de Porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, 2005.
- SALES JÚNIOR, J. C. C. **Avaliação da potencialidade de argilas de queima clara como matérias primas para o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos**. – Natal, RN, 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de., **Rochas & Minerais Industriais: Cálcario e Dolomito**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005, p. 327-350.
- SÁNCHEZ, E.; GARCÍA-TEM, J.; SANZ, V.; MORENO, A. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific technological evolution. **Ceramics International**, v. 36, n. 3, p. 831–845, abr. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.11.016>>. Acesso em: 20 out. 2023.
- SANTOS, O. C. **Formulação de bloco intertravado cerâmico com adição de resíduos urbanos e industriais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal-RN. 178p, 2013
- SENAI. Departamento Regional do Piauí. **Especial de tecnologia de cerâmica vermelha**. Teresina – Piauí, 2006.
- SETZ, Luiz F. G.; SILVA, A. C. **“O processamento cerâmico sem mistério”**. São Paulo, 2019.
- SILVA, P. F. **QuantFases**. Teresina: [s. n.], 2015
- SILVA, P. F.; OLIVEIRA, F. das C.; SOUSA, R. M. L.; LOPES, P. D.; CONCEIÇÃO, I. G. C. da; PAZ, G. M. da; SOARES, R. A. L. Availability of raw materials in the state of Piauí for the production of ceramic coating. **International Journal for Innovation Education and Research**, Dhaka, Bangladesh, v. 9, n. 4, p. 110–119, 2021. DOI: 10.31686/ijer.vol9.iss4.3025. Disponível em: <<https://scholarsjournal.net/index.php/ijer/article/view/3025>>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- SOARES, R. A. L. **Efeitos da adição de carbonatos em formulações de massa para revestimento cerâmico utilizando matérias-primas do Piauí**. 2010. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- SOUSA, J. P. **Caracterização tecnológica de argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha no Município do Crato - Ceará**. Fortaleza, 2017. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- SOUSA, S. J. G. **Desenvolvimento de massas cerâmicas processadas por via seca com matérias-primas do norte fluminense visando aplicação em revestimento poroso**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2008.

SOUTO, F. A. F. **Avaliação das características físicas, químicas e mineralógicas da matéria-prima utilizada na indústria de cerâmica vermelha nos municípios de Macapá e Santana-AP.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2009.

Streckeisen, A. L., 1967. **Classification and nomenclature of igneous rocks.** Final report of an inquiry. Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen, 107, 144-240.

TARVORNPANICH, T.; SOUZA, G. P.; LEE, W. E. **Microstructural Evolution in Clay-Based Ceramics II:** Ternary and Quaternary Mixtures of Clay, Flux, and Quartz Filler. J. Am. Ceram. Soc., v. 91, n. 7, p. 2272-2280, 2008.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. **Revista Cerâmica Industrial**, v.8, n.1, p. 42-46, 2003.

Wernick, E. 2003. **Rochas magmáticas.** Ed.UNESP, p. 336-339.

WINTER, J.D., 2010. **Principles of Igneous and Metamorphic Petrology**, second edition. Prentice Hall. 702 p.