



INSTITUTO FEDERAL
Piauí
Campus Teresina Central



PPGEM
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS E PROCESSOS INDUSTRIAIS

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 E
PROCESSOS INDUSTRIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JÉSSICA KAROLYNE DE SOUSA PASSOS

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE TALCO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA

TERESINA-PI

2026

JÉSSICA KAROLYNE DE SOUSA PASSOS

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE TALCO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA**

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

Área de concentração: Estrutura e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Erico Rodrigues Gomes

TERESINA-PI

2026

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

Passos, Jéssica Karolyne de Sousa

P289i Influência da incorporação de talco nas propriedades tecnológicas de massas para cerâmica vermelha / Jéssica Karolyne de Sousa Passos. - 2026.
108 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2026.

Orientador : Prof Dr. Erico Rodrigues Gomes.

1. Argilas. 2. Cerâmica vermelha. 3. Propriedades tecnológicas. 4. Sinterização. 5. Talco. I.
Título.

CDD - 620.1

JÉSSICA KAROLYNE DE SOUSA PASSOS

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE TALCO NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DE MASSAS PARA CERÂMICA VERMELHA

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

Aprovada em: 16/09/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Erico Rodrigues Gomes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Linardy de Moura Sousa
Centro Universitário Santo Agostinho

A toda minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, apoio e incentivo ao longo desta caminhada. Agradeço, especialmente, por me ensinarem, desde cedo, o valor dos estudos e do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido o dom da vida.

Ao meu professor e orientador, Dr. Érico Rodrigues Gomes, por sua orientação competente e por compartilhar todo seu conhecimento e experiência ao longo do curso.

Ao professor Dr. Roberto Arruda Lima Soares, por sua paciência, atenção e auxílio durante a execução deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos Industriais (PPGEM) do Instituto Federal do Piauí (IFPI) pela oportunidade de realização do curso.

Aos docentes do PPGEM por todo o conhecimento repassado ao longo do curso.

Aos colegas e amigos do PPGEM pelas trocas de conhecimento e experiências.

Aos meus pais, pelo cuidado, carinho, amor e educação oferecidos a mim ao longo desses anos. Aos meus irmãos e sobrinhos, pela parceria e companheirismo ao longo da vida.

Ao meu marido, Ricardo, pelo seu amor e compreensão.

Devo estar contando isso com a alma cortada,
em algum lugar, há uma distância de tempo imensa:
divergiam em um bosque duas estradas
e eu escolhi a menos viajada
e esta escolha fez toda a diferença
Robert Frost

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de talco, nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%, em massas cerâmicas constituídas por duas argilas provenientes de Teresina-PI. As matérias-primas foram caracterizadas quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e térmicas por meio de análise granulométrica, limites de Atterberg, teor residual, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA). Os corpos de prova foram conformados por prensagem utilizando-se uma matriz metálica regular com dimensões aproximadas de 80 mm x 10 mm x 10 mm e queimados nas temperaturas de 800, 850, 900 e 950 °C. As propriedades tecnológicas analisadas foram retração linear de secagem e de queima, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão. Foram examinadas, também, a macroestrutura das amostras ensaiadas. Em seguida, foi verificado se os corpos de prova atendem às especificações técnicas exigidas pelas normas que tratam sobre cerâmica vermelha. Os resultados demonstraram que a incorporação de talco influenciou as propriedades tecnológicas das massas, promovendo redução da porosidade aparente e da absorção de água, além de aumento da massa específica aparente em determinadas condições. A retração linear total variou de 2,51% a 3,59%, enquanto a absorção de água apresentou valores entre 11,62% e 14,74%. A resistência à flexão aumentou com a temperatura de queima, sendo observada redução do desempenho mecânico com maiores teores de talco. De modo geral, a incorporação de talco mostrou-se tecnicamente viável para as massas estudadas, destacando-se o teor de 10% como uma das condições de melhor desempenho global.

Palavras-chave: Argilas; talco; cerâmica vermelha; propriedades tecnológicas; sinterização.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of talc incorporation at contents of 0%, 5%, 10%, and 15% in ceramic masses composed of two clays from Teresina, Piauí, Brazil. The raw materials were characterized in terms of their physical, chemical, mineralogical, and thermal properties using particle size analysis, Atterberg limits, residual content determination, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric and differential thermal analysis (TG/DTA). The test specimens were shaped by uniaxial pressing using a regular metal mold with approximate dimensions of 80 mm × 10 mm × 10 mm and fired at temperatures of 800, 850, 900, and 950 °C. The technological properties evaluated included linear drying and firing shrinkage, loss on ignition, water absorption, apparent porosity, apparent density, and flexural strength. The macrostructure of the tested specimens was also examined. Subsequently, the specimens were assessed to determine whether they met the technical specifications established by the standards applicable to red ceramic products. The results demonstrated that talc incorporation influenced the technological properties of the ceramic masses, promoting reductions in apparent porosity and water absorption, as well as an increase in apparent specific mass under certain conditions. Total linear shrinkage ranged from 2.51% to 3.59%, while water absorption ranged from 11.62% to 14.74%. Flexural strength increased with firing temperature, whereas higher talc contents resulted in reduced mechanical performance. Overall, talc incorporation proved technically feasible for the studied ceramic masses, with the 10% talc content standing out as one of the conditions providing the best overall performance.

Keywords: Clays; talc; red ceramics; technological properties; sintering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Unidade cristalográfica (tetraédrica e octaédrica).....	24
Figura 2 - Folhas tetraédricas e octaédricas	25
Figura 3 - Estrutura cristalina do talco.....	30
Figura 4 - Processo de fabricação da cerâmica vermelha	36
Figura 5 - Sazonamento de argila	38
Figura 6 - Processo de mistura da massa cerâmica	39
Figura 7 - Processo de extrusão de blocos de vedação.....	41
Figura 8 - Processo de prensagem de massas cerâmicas.....	41
Figura 9 - Secagem natural de blocos de vedação	43
Figura 10 - Materias-primas utilizadas na pesquisa	45
Figura 11 - Fluxograma da metodologia da pesquisa	47
Figura 12 - Etapas do ensaio de teor residual.....	50
Figura 13 - Ensaio de teor residual realizado na pesquisa.....	51
Figura 14 - Aparelho de Casagrande	53
Figura 15 - Ensaio de Casagrande.....	53
Figura 16 - Ensaio de Limite de Plasticidade (LP) realizado na pesquisa	54
Figura 17 - Ensaio de Limite de Plasticidade (LP).....	55
Figura 18 - Gráfico com a curva do limite de liquidez (LL)	56
Figura 19 - Formulações das matérias-primas usadas na pesquisa	59
Figura 20 - Formulação umidificada com água destilada	60
Figura 21 - Prensa hidráulica manual.....	61
Figura 22 - Corpo de prova conformado	61
Figura 23 - Etapas (a) corpos de prova na etapa de secagem em estufa (b) corpos de prova na etapa de queima.....	62
Figura 24 - Esquema da retração linear	65
Figura 25 - Corpo de prova conformado	66
Figura 26 - Corpo de prova suspenso em recipiente com água	68
Figura 27 - Esquema do ensaio de porosidade aparente.....	68
Figura 28 - Esquema do ensaio de tensão de ruptura à flexão	70
Figura 29 - Máquina universal de ensaio mecânico	71
Figura 30 - Resultado do DRX argila 01 (ARG01).....	73
Figura 31 - Resultado do DRX argila 02 (ARG02).....	74

Figura 32 - Resultado do DRX do Talco.....	74
Figura 33 - Resultado da análise TG/DTA da amostra ARG01	78
Figura 34 - Resultado da análise TG/DTA da amostra ARG02	78
Figura 35 - Resultado da análise TG/DTA da amostra do Talco	79
Figura 36 - Resultados da Retração Linear Total (%)	87
Figura 37 - Resultados de perda ao fogo (%).....	89
Figura 38 - Resultados de Absorção de Água (%)	90
Figura 39 - Resultados da Porosidade Aparente (%)	92
Figura 40 - Resultados da Massa Específica Aparente (g/cm ³)	94
Figura 41 - Resultados da tensão de ruptura à flexão a três pontos	95
Figura 42 - Resultado da análise macroestrutural para formulações	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades tecnológicas do talco e características cristaloquímicas ...32

Quadro 2 - Principais fenômenos do processo de queima e faixas de temperatura .44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da argila em função do índice de plasticidade	57
Tabela 2 - Classificação das massas cerâmicas segundo o índice de plasticidade..	57
Tabela 3 - Composição das formulações cerâmicas utilizadas no estudo	59
Tabela 4 - Análise química por FRX.....	75
Tabela 5 - Granulometria da argila 01 (ARG01).....	80
Tabela 6 - Granulometria da argila 02 (ARG02).....	81
Tabela 7 - Resultados do segundo ensaio de granulometria do talco.....	81
Tabela 8 - Limite de liquidez.....	82
Tabela 9 - Limite de plasticidade.....	83
Tabela 10 - Índice de plasticidade.....	83
Tabela 11 - Valores de teor de resíduos das argilas	84
Tabela 12 - Resultados da umidade base úmida e base seca (%)	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Absorção de Água
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica
AE – Água de Esfarelamento
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
CaO – Óxido de cálcio
DRX – Difração de Raios X
DTA – Análise Térmica Diferencial
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro
FRX – Fluorescência de Raios X
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
IFPI – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IP – Índice de Plasticidade
 K_2O – Óxido de potássio
LEM – Laboratório Interdisciplinar de Materiais
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
MgO – Óxido de magnésio
MEA – Massa Específica Aparente
 Na_2O – Óxido de sódio
NBR – Norma Brasileira
P.F. – Perda ao Fogo
 P_2O_5 – Pentóxido de fósforo
PA – Porosidade Aparente
PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais
RLT – Retração Linear Total
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAC – Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial
 SiO_2 – Dióxido de silício
TG – Termogravimetria
TG/DTA – Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial

TiO₂ – Dióxido de titânio

TRF – Tensão de Ruptura à Flexão

UFPI – Universidade Federal do Piauí

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Geral.....	20
1.2.2 Específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 HISTÓRICO DOS MATERIAIS CERÂMICOS	21
2.2 MATÉRIAS-PRIMAS	22
2.2.1 Argila	22
2.2.1.1 Argilominerais.....	23
2.2.1.2 Tipos de argilas	26
2.2.1.2.1 Argilas comuns (comom clay)	26
2.2.1.2.2 Caulim	27
2.2.1.2.3 Argilas plásticas (ball clay)	28
2.2.1.2.4 Bentonita	28
2.2.2 Talco.....	29
2.2.2.1 Reservas de talco no Brasil.....	31
2.2.2.2 Emprego do talco	32
2.3 PROCESSO PRODUTIVO	34
2.3.1 Exploração	37
2.3.2 Sazonamento	37
2.3.3 Preparação da massa	39
2.3.4 Conformação.....	40
2.3.4.1 Extrusão	40
2.3.4.2 Prensagem	41
2.3.5 Secagem	42

2.3.6 Queima.....	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 MATERIAIS	45
3.2 MÉTODOS	46
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS-PRIMAS	48
3.3.1 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)	49
3.3.2 Difração de Raios X (DRX).....	49
3.3.3 Ensaio de determinação do teor de resíduo (%R).....	50
3.3.4 Análise Granulométrica por Peneiramento	51
3.3.5 Análise de Plasticidade	52
3.3.5.1 Ensaio de Plasticidade	55
3.3.5.1.1 Água de Amassamento (AA).....	55
3.3.5.1.2 Água de Esfarelamento (AE) ou Limite de Plasticidade (LP)	55
3.3.5.1.3 Limite de Liquidez (LL)	56
3.3.5.1.4 Índice de Plasticidade (IP).....	56
3.3.6 Determinação da Umidade.....	57
3.4 FORMULAÇÃO DAS MASSAS CERÂMICAS.....	58
3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60
3.6 SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	63
3.7 QUEIMA DOS CORPOS DE PROVA	63
3.8 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS CORPOS CERÂMICOS APÓS A QUEIMA	64
3.8.1 Retração Linear	64
3.8.2 Absorção de Água (AA).....	65
3.8.3 Porosidade Aparente (PA).....	67
3.8.4 Massa Específica Aparente (MEA).....	68
3.8.5 Perda ao Fogo (PF).....	69

3.8.6 Tensão de Ruptura à Flexão (TRF).....	70
3.8.7 Análise Macroestrutural.....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	73
4.2 ANÁLISE QUÍMICA POR FRX.....	75
4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TÉRMICA DIFERENCIAL (TG/DTA).....	77
4.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO	80
4.5 LIMITES DE ATTERBERG E PLASTICIDADE	82
4.6 ENSAIO TEOR RESIDUAL	84
4.7 UMIDADE BASE ÚMIDA E UMIDADE BASE SECA.....	85
4.8 RETRAÇÃO LINEAR TOTAL (RLT).....	87
4.9 PERDA AO FOGO	88
4.10 ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA).....	90
4.11 POROSIDADE APARENTE (PA)	91
4.12 MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEA)	93
4.13 TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (TRF).....	95
4.14 ANÁLISE MACROESTRUTURAL	97
5 CONCLUSÕES	99
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102

1 INTRODUÇÃO

A indústria de cerâmica vermelha ocupa posição de destaque no setor da construção civil, sendo responsável pela produção de blocos, tijolos e telhas amplamente utilizados em edificações. O desempenho tecnológico desses materiais depende diretamente das características das matérias-primas empregadas e das transformações físico-químicas que ocorrem durante as etapas de processamento e queima. Nesse contexto, a seleção e a formulação adequadas das massas cerâmicas constituem fatores fundamentais para garantir a qualidade e a eficiência dos produtos finais (SANTOS 1989; REED, 2012; VIEIRA; MONTEIRO; PINATTI, 2019).

As argilas representam a principal matéria-prima utilizada na fabricação de cerâmica vermelha. São materiais naturais constituídos predominantemente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, que apresentam elevada plasticidade quando umedecidos. Entretanto, devido à diversidade de suas origens geológicas, as argilas apresentam significativa variabilidade mineralógica, química e granulométrica, influenciando diretamente propriedades como plasticidade, retração, absorção de água, porosidade e resistência mecânica dos produtos cerâmicos (GOMES, 1988; SANTOS, 1989). Dessa forma, a caracterização das matérias-primas torna-se indispensável para o desenvolvimento de formulações capazes de atender às exigências técnicas da indústria cerâmica (SILVA et al., 2018).

Embora o Brasil possua grande disponibilidade de recursos minerais aplicáveis à indústria cerâmica, muitas empresas ainda desenvolvem suas formulações com base em métodos empíricos, sem o conhecimento detalhado das características das matérias-primas utilizadas. No estado do Piauí, essa realidade é observada em diversas unidades produtivas, onde a limitada caracterização científica dos recursos minerais disponíveis pode comprometer a otimização dos processos e o aproveitamento adequado das matérias-primas regionais (SOARES, 2008).

Entre os minerais com potencial de aplicação na indústria cerâmica destaca-se o talco, um silicato hidratado de magnésio amplamente utilizado em diversos segmentos industriais devido às suas propriedades físico-químicas. O Brasil possui expressiva produção desse mineral, enquanto o estado do Piauí apresenta ocorrências ainda pouco exploradas tecnologicamente. Estudos recentes demonstram que a incorporação de talco em massas cerâmicas pode modificar os mecanismos de sinterização, influenciando a densificação, a porosidade e outras

propriedades tecnológicas dos produtos obtidos (CAMPOS, 2011; SANTOS et al., 2021).

Diante desse cenário, torna-se necessário ampliar o conhecimento sobre a utilização do talco proveniente de jazidas piauienses em formulações para cerâmica vermelha, contribuindo para o aproveitamento de recursos minerais regionais e para o desenvolvimento de produtos com desempenho tecnológico adequado às demandas da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por matérias-primas alternativas e pelo aprimoramento das formulações cerâmicas tem se tornado cada vez mais importante para a indústria de cerâmica vermelha, uma vez que as propriedades tecnológicas dos produtos finais estão diretamente relacionadas à composição das massas utilizadas. Nesse contexto, o aproveitamento de recursos minerais disponíveis regionalmente representa uma estratégia capaz de agregar valor econômico às jazidas locais e reduzir a dependência de matérias-primas provenientes de outras regiões.

O talco destaca-se como um material de interesse tecnológico devido à sua elevada concentração de silicatos de magnésio e ao seu potencial de atuar como modificador microestrutural em sistemas cerâmicos. Estudos demonstram que a incorporação de minerais ricos em silicatos e óxidos pode modificar os mecanismos de sinterização, favorecendo a densificação da matriz cerâmica e alterando significativamente a evolução da porosidade durante a queima (EL OUAHABI et al., 2023; VIEIRA; MONTEIRO; SÁNCHEZ, 2018).

Além disso, materiais não plásticos, como o talco, podem contribuir para o melhor empacotamento das partículas e para a formação de estruturas mais compactas durante a queima, reduzindo a presença de defeitos e melhorando o desempenho tecnológico dos produtos cerâmicos (DONDI; RAYMUNDO; ZANELLI, 2023; SILVA et al., 2023). Apesar desse potencial, ainda são escassos os estudos relacionados à utilização de talco proveniente de jazidas do estado do Piauí em massas destinadas à produção de cerâmica vermelha.

Dessa forma, esta pesquisa se justifica pela necessidade de avaliar a influência da incorporação de diferentes teores de talco nas propriedades tecnológicas de massas cerâmicas estruturais, contribuindo tanto para a ampliação do conhecimento

científico sobre o aproveitamento desse recurso mineral quanto para o desenvolvimento de formulações mais eficientes e adequadas à realidade da indústria cerâmica regional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a influência da incorporação de talco nas propriedades tecnológicas de massas cerâmicas utilizadas na produção de cerâmica vermelha.

1.2.2 Específicos

- Investigar o efeito da incorporação de diferentes teores de talco (0%, 5%, 10% e 15%) nas propriedades físicas das massas cerâmicas, incluindo retração linear, umidade, porosidade aparente, massa específica aparente, perda ao fogo e absorção de água;
- Analisar o comportamento mecânico das formulações por meio do ensaio de resistência à flexão;
- Correlacionar os resultados obtidos com a microestrutura e com os mecanismos de sinterização, visando identificar a composição mais adequada para aplicação em cerâmica vermelha, incluindo os mecanismos de empacotamento e sinterização;
- Verificar a conformidade das propriedades tecnológicas com a literatura científica e as normas aplicáveis à cerâmica vermelha;
- Avaliar a viabilidade técnica do uso do talco como aditivo na indústria cerâmica regional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DOS MATERIAIS CERÂMICOS

A argila acompanha a história da humanidade desde os seus primórdios. Esse material natural e abundante foi um dos primeiros recursos transformados pelo homem, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento das civilizações. O termo cerâmica vem da palavra grega *kéramos*, que significa “matéria queimada” ou “argila queimada”, a partir disso, pode-se subentender que as propriedades desejáveis desses materiais são obtidas por um processo de queima das argilas (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). Devido à sua grande resistência, é comum encontrar cerâmicas em escavações arqueológicas, tornando-se um reflexo da própria trajetória da civilização (NAPOLI, 2015).

O homem primitivo, ao sair das cavernas e se tornar um agricultor, criou os primeiros utensílios de argila para armazenar água, alimentos e sementes. Os primeiros registros de cerâmica remontam à pré-história: vasos de barro com tons naturais de argila ou escurecidos por óxidos de ferro (NAPOLI, 2015).

A indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo, devido à facilidade de fabricação e abundância da matéria-prima, existindo há cerca de dez a quinze mil anos. No período neolítico, o homem pré-histórico começou a vedar cestas de vime com o barro. Com o tempo, percebeu que poderia moldar recipientes apenas com o barro, sem o uso do vime. Mais adiante, ao notar que o calor endurecia esse material, surgiu a cerâmica propriamente dita e que, nessa fase da humanidade, foi largamente empregada para os mais diversos fins (BAUER, 2008).

Os objetos de cerâmicas evoluíram junto com a humanidade. Ao longo dos anos, o conhecimento sobre suas propriedades e possibilidades de uso foi se expandindo, passando de práticas rudimentares à aplicação em tecnologias sofisticadas. Até cerca de 60 anos atrás, predominavam as chamadas cerâmicas tradicionais, como louças, porcelanas, tijolos, telhas e vidros. Hoje, as argilas são matérias-primas estratégicas em setores que vão desde a construção civil à indústria aeroespacial, de componentes eletrônicos, computadores, farmacêutica (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

2.2 MATÉRIAS-PRIMAS

2.2.1 Argila

De acordo com Santos (1989), argila é um material natural, terroso, de granulação fina, com diâmetro inferior à 2 μm , que adquire plasticidade quando umedecida com água; quimicamente, as argilas são constituídas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Todas as argilas são formadas por partículas cristalinas extremamente pequenas de um grupo limitado de minerais, denominados argilominerais. Uma amostra de argila pode conter um único tipo de argilomineral ou uma combinação de vários deles em proporções variadas. Além dos argilominerais, as argilas podem conter outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não-cristalinos ou amorfos.

No contexto da granulometria, a fração argila refere-se ao conjunto de partículas com os menores diâmetros presentes em uma amostra de solo ou sedimento, geralmente aquelas com tamanho inferior a 2 μm . No entanto, o limite superior de tamanho das partículas que compõem essa fração pode variar conforme a área do conhecimento considerada, sendo definido de maneira diferente em diferentes ramos da ciência (SANTOS, 1989). De acordo com a ABNT, as argilas possuem um diâmetro inferior a 0,005 mm, ou 5 μm . Em estudos de solos, a tendência usual é a de usar 2 μm como o limite superior de dimensões da fração argila. Embora não haja uma classificação granulométrica universalmente aceita para os argilominerais presentes em sedimentos argilosos, diversos estudos de análise granulométrica indicam uma tendência predominante de esses minerais estarem concentrados na fração com diâmetro inferior a 2 μm . Além disso, argilominerais com dimensões originalmente superiores tendem a se desagregar facilmente para abaixo desse limite quando a argila é dispersa em água (SANTOS, 1989).

Bauer (2008), define argilas como sendo um material terroso natural que, quando misturado com água, adquire a propriedade de apresentar alta plasticidade, sendo constituída essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas, formadas por um número restrito de substâncias, os argilominerais. A classificação e a nomenclatura de uma argila não devem ser confundidas com a classificação e a nomenclatura dos argilominerais constituintes da mesma. Na classificação

mineralógica, tanto as distintas variedades de argila, quanto os aproximadamente quarenta argilominerais identificados são designados por nomes específicos. Esses argilominerais são agrupados em classes mineralógicas, entre as quais se destacam a caulinita, esmectita, vermiculita, micas hidratadas, cloritas, serpentinas, paligorsquita-sepiolita e talco-pirofilita (COELHO; SANTOS; SANTOS, 2006).

As argilas classificam-se, ainda, de acordo com sua geologia, em argilas primárias ou residuais e secundárias, sedimentares ou transportadas. As argilas primárias ocorrem no lugar em que se formaram a partir da rocha matriz. As sedimentares foram transportadas do seu lugar de formação pelos agentes naturais, ou seja, os depósitos se formaram a distâncias significativas do local de formação a partir da rocha matriz (BAUER, 2008).

Ainda segundo Santos (1989), as argilas, com raras exceções, constituem sistemas complexos devido à diversidade de condições geológicas em que se formam. Podem apresentar variações na composição mineralógica, tanto qualitativa quanto quantitativa, dentro dos próprios argilominerais, incluindo diferenças relativas entre os minerais presentes e no grau de substituição isomórfica nas redes cristalinas. Além disso, os componentes não argilosos, que podem ser cristalinos (como silicatos, hidróxidos, óxidos, carbonatos, nitratos, sulfatos e sulfetos) ou amorfos (como sílica amorfa, hidróxidos, ácidos húmicos e seus sais, os humatos), também podem variar significativamente em composição e proporção. Dessa forma, não é possível descrever uma argila por um número pequeno de propriedades. De modo geral, as propriedades de uma argila são determinadas por um conjunto de fatores, entre os quais se destacam:

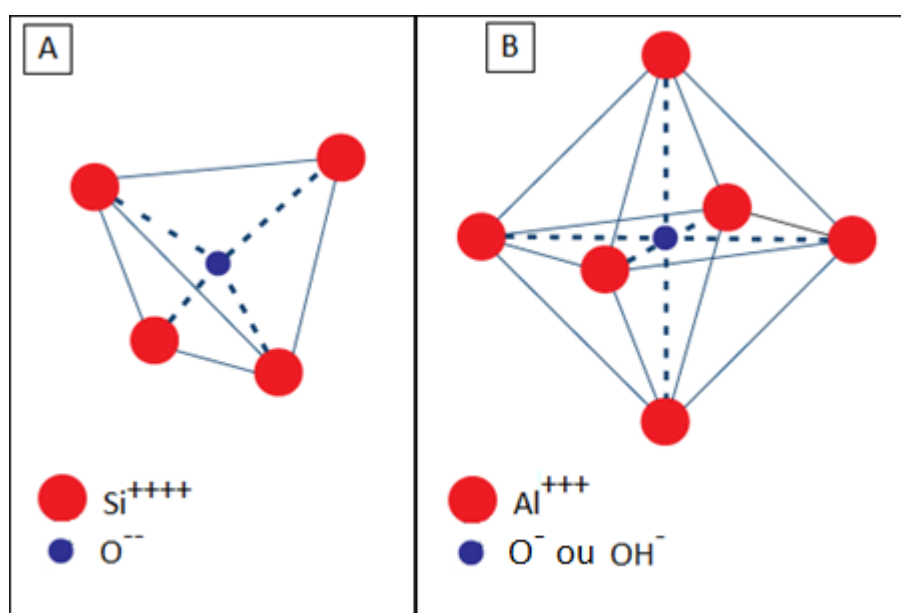
- A composição química e mineralógica dos argilominerais qualitativa e quantitativa e distribuição granulométrica das partículas;
- A composição mineralógica dos não-argilominerais qualitativa e quantitativa e distribuição granulométrica das partículas;
- Natureza e teor de componentes orgânicos.

2.2.1.1 Argilominerais

Os argilominerais são silicatos hidratados que apresentam estrutura cristalina em camadas (lamelar) ou de estrutura fibrosa. São formados por folhas, planos ou camadas contínuas de tetraedros SiO_4 , organizados em arranjos hexagonais, os quais

se condesam em folhas ou camadas octaédricas. Esses minerais são compostos, predominantemente, por partículas de dimensões muito reduzidas (SANTOS, 1989). De acordo com Caputo (2015), as unidades cristalográficas fundamentais dos argilominerais silicatados compõem-se de duas maneiras: uma com configuração de um tetraedro de silício, no qual existe um átomo de silício equidistante de quatro átomos de oxigênio e outra representada por um octaedro, com um átomo de alumínio central envolvido por seis átomos de oxigênio ou grupos de oxidrilas (Figura 1).

Figura 1 - Unidade cristalográfica (tetraédrica e octaédrica)

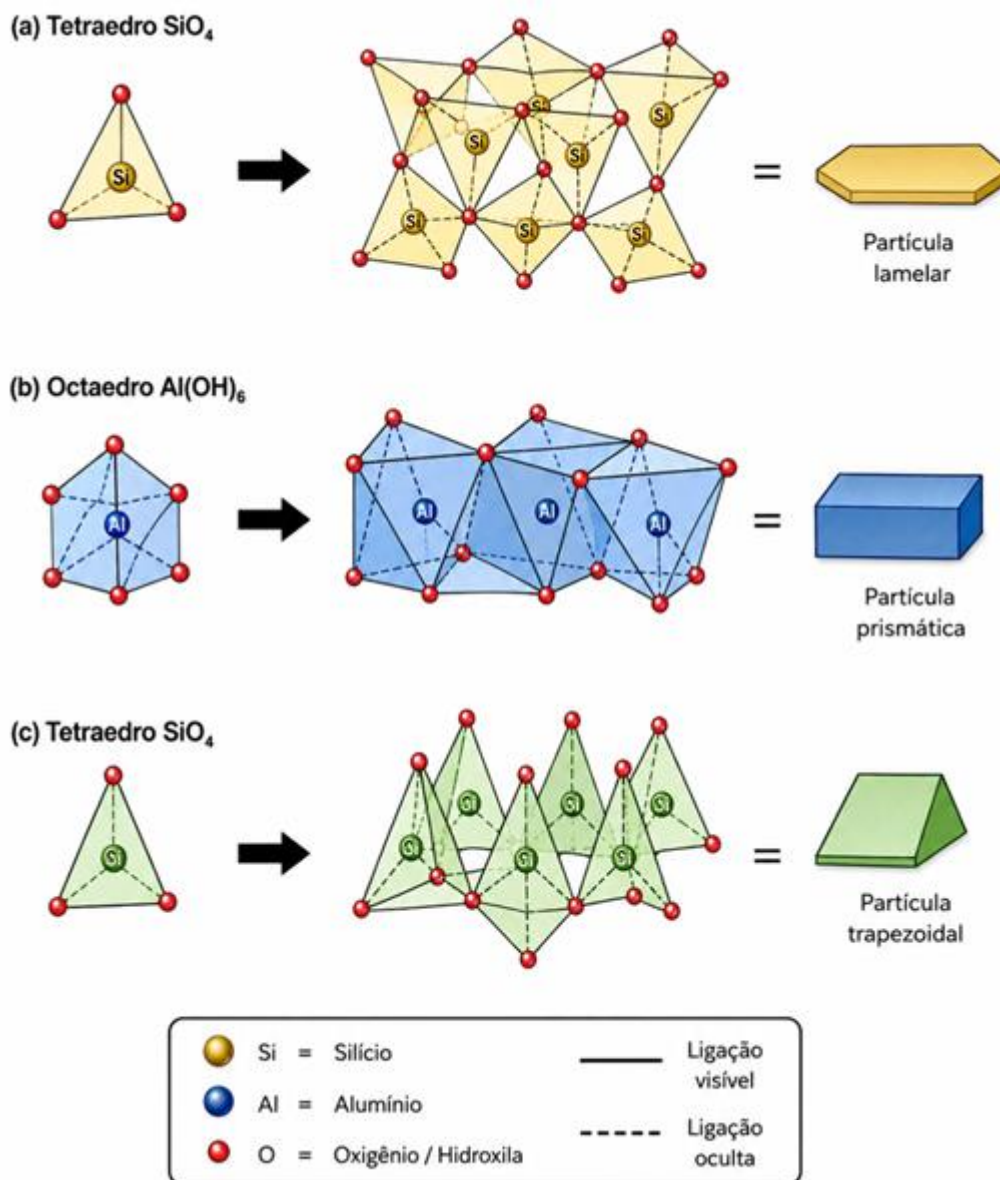


Fonte: Adaptado de Fonseca, A. C. L. (2018)

Conforme Coelho, Santos e Santos (2006), existem cerca de quarenta argilominerais. Os argilominerais se subdividem em: silicatos cristalinos com estrutura em camadas ou lamelar (filossilicatos) e silicatos cristalinos com estrutura fibrosa. Os diferentes argilominerais filossilicatos são classificados em grupos com base nas semelhanças em composição química e na estrutura cristalina. As estruturas cristalinas dos filossilicatos são classificadas em dois tipos: estruturas 1:1 ou difórmicos e estruturas 2:1 ou trifórmicos. Nas estruturas 1:1, estão os grupos da caulinita, das serpentinas, dos argilominerais ferríferos. Nas estruturas 2:1, estão os grupos do talco-pirofilita, das micas, das esmectitas, das vermiculitas, das cloritas. Podem existir diferentes sequências, regulares e irregulares, para o empilhamento das

folhas ou camadas, formando vários tipos de argilominerais, conforme pode-se observar na Figura 2.

Figura 2 - Folhas tetraédricas e octaédricas



Fonte: Adaptado de Neumann *et al* (2000)

A identificação dos argilominerais em uma amostra de argila é relativamente simples quando esta é composta por um único tipo de argilomineral, ou seja, a amostra é considerada pura. No entanto, quando há a presença de uma mistura de argilominerais pertencentes a diferentes grupos, o processo torna-se mais complexo. Isso se deve tanto à possibilidade de interferências nos métodos de identificação

utilizados, quanto à limitação de detecção de certos argilominerais quando estes estão presentes em teores muito baixos, cujo os limites variam conforme o tipo de argilomineral e o método analítico empregado (SANTOS, 1989)

2.2.1.2 Tipos de argilas

Atualmente, é mais comum classificar os argilominerais em vez de se classificar diretamente as argilas, pois essa abordagem oferece uma compreensão mais precisa de suas características. Ainda assim, existem diversos glossários que apresentam definições para diversos tipos de argila. De acordo com Santos (1989), a Comissão de Geologia da *American Ceramic Society* publicou, em 1939, o primeiro relatório que reunia uma lista de nomes de argilas e os respectivos significados. A publicação desse relatório serviu de base para a realização de outros estudos complementares, que contribuíram para o avanço e consolidação do conhecimento sobre a classificação e a nomenclatura das argilas.

Argilas industriais são um grupo de argilas que existem em quantidade economicamente suficientes para serem amplamente utilizadas em processos industriais. As principais são: caulim, argila plástica (*ball clay*), argilas refratárias (*fire clay*), bentonitas, argilas comuns (cerâmica vermelha), vermiculita e outras (COELHO; SANTOS; SANTOS, 2007).

2.2.1.2.1 Argilas comuns (*comom clay*)

As argilas comuns ou *comom clay* abrangem uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa e queimam em várias tonalidades de vermelho, a temperaturas variáveis entre 800 e 1250 °C. Os argilominerais predominantes são caulinita, montmorilonita e principalmente illita, além de conterem impurezas como matéria orgânica, quartzo, calcário, pirita e outros. Essas argilas geralmente possuem granulometria muito fina, característica que, juntamente com a presença de matéria orgânica, resulta em diferentes graus de plasticidade. Além disso, destacam-se pela boa trabalhabilidade e resistência a verde, a seco e após o processo de queima, aspectos importantes para fabricação de uma grande variedade de produtos cerâmicos (CABRAL JÚNIOR *et al.*, 2008).

Segundo Santos (1989), grandes quantidades dessas argilas são usadas em cerâmica vermelha ou estrutural, sendo empregadas como matéria-prima na fabricação de blocos de alvenaria e estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos. Além dos usos tradicionais, esses materiais possuem outras aplicações, como na fabricação de vasos ornamentais, utensílios domésticos, cimento, agregado leve e revestimentos (CABRAL JÚNIOR *et al.*, 2008).

As argilas comuns podem ser também classificadas de acordo com a quantidade de coloides que contêm: as “fortes” ou “gordas” são muito plásticas, devido à alumina, apresentem grande deformação no processo de cozimento; e as “fracas” ou “magras”, que possuem excesso de sílica, são mais porosas e frágeis (GUIMARÃES; THEDOLDI; LIMA, 2021).

2.2.1.2.2 Caulim

Bauer (2008) define caulim como um tipo de argila com amplo predomínio do argilomineral caulinita, que é a forma mais pura de argilominerais. O grau de pureza determina o tipo de uso. LUZ *et al.* (2008) descreve o caulim como uma rocha de granulometria fina, constituída de material argiloso, geralmente com baixo teor de ferro e coloração branca ou quase branca.

Os caulins formam-se a partir do intemperismo ou hidrotermalismo de rochas feldspáticas. Podem ser chamados de residuais ou primários quando estão no local da rocha de origem e sedimentar ou secundários quando são transportados por correntes fluviais e posteriormente sedimentados. Os caulins primários podem ser facilmente distinguidos dos caulins secundários pelo teor de TiO_2 . Os caulins primários possuem teor de argilominerais de aproximadamente 10% e os argilominerais predominantes são caulinita e/ou haloisita, isolados ou em mistura de diferentes proporções. Por sua vez, os caulins secundários possuem teor de argilominerais superiores a 90% e o argilomineral mais comum é a caulinita (SANTOS, 1989).

O caulim é uma importante matéria-prima, sendo utilizado em diversas indústrias, como na fabricação de papel, cerâmica branca, fibra de vidro, plásticos, tintas, borrachas, catalisadores para craqueamento de petróleo, concreto de alto desempenho e refratários. As duas principais aplicações do caulim são na indústria de papel, onde é empregado como carga e cobertura, e na produção de cerâmicas de alta qualidade. As principais propriedades tecnológicas que despertaram o interesse

pela aplicação industrial desse tipo de argila incluem: inércia química, alvura, baixa condutividade térmica e elétrica, maciez e pouca abrasividade, baixo custo de produção e variedade de produtos, entre outras (LUZ *et al.*, 2008)

2.2.1.2.3 Argilas plásticas (*ball clay*)

O termo argila plástica é utilizado para designar uma argila de origem sedimentar com plasticidade muito elevada, granulometria muito fina, cuja cor após a queima seja branca. Esta denominação tem origem no antigo método de exploração utilizado na Inglaterra, que consistia em cortar a argila em cubos e arredondá-los para seu transporte, não possuindo nenhum significado mineralógico. Tais argilas são compostas essencialmente por caulinita, com teores variáveis de illita, mica, quartzo e montmorilonita e matérias orgânicas. Existe uma diferença, do ponto de vista cristalográfico e granulométrico, entre a caulinita da argila plástica e a caulinita do caulim. A caulinita do caulim é moderadamente grossa e bem cristalizada, enquanto a da argila plástica apresenta uma distribuição granulométrica mais fina e mal cristalizada. Além disso, a matéria orgânica nestas argilas pode estar presente desde a forma de fragmentos de lignina até como ácido húmico na forma de coloide protetor nas partículas argilosas. Em geral, os principais fatores que tornam as argilas plásticas são: granulometria muito fina, pequenas quantidades de montmorilonitas e existência de matéria orgânica rica em ácido húmico (MENEZES *et al.*, 2003; ANDRADE *et al.*, 2008; MOTTA *et al.*, 2008).

De acordo com Menezes *et al.* (2003), as argilas plásticas são usadas como agentes de suspensão, carga e agentes ligantes em várias indústrias. Na indústria cerâmica, são valorizadas por fornecer alta plasticidade, alta resistência a seco, cor branca após a queima e propriedades reológicas ideais para colagem, sendo empregadas em massas para confecção de produtos cerâmicos como azulejos, porcelanas, louças e isolantes elétricos.

2.2.1.2.4 Bentonita

O termo bentonita foi aplicado a um tipo de argila plástica e coloidal de um depósito descoberto em Fort Benton, Wyoming, nos Estados Unidos, local onde essa argila foi pela primeira vez caracterizada como um tipo especial de argila. Todos os

tipos de bentonita têm algum ou vários argilominerais do grupo esmectita, com montmorilonita como argilomineral predominante (LUZ e OLIVEIRA, 2008). De acordo com Silva e Ferreira (2008), a formação da bentonita ocorre a partir da desvitrificação seguida de alteração química de um material vítreo, de origem ígnea, normalmente um tufo ou cinza vulcânica em ambientes alcalinos com circulação restrita de água.

As bentonitas podem ser classificadas em dois tipos: bentonitas que incham e bentonitas que não incham. As bentonitas que incham possuem o sódio como principal cátion interlamelar e são caracterizadas por sua propriedade específica de inchar até vinte vezes o volume da argila seca, quando em contato com água. As bentonitas que não incham apresentam cálcio ou magnésio como cátion principal. Essa troca do cátion sódico pelo cátion de cálcio ou magnésio faz com que a bentonita perca a propriedade de inchar em água. Embora possam haver usos comuns para ambos os tipos de bentonitas, existem usos que são específicos para cada tipo (SANTOS, 1989).

Ainda de acordo com Santos (1989), para ser denominada bentonita, uma argila deve atender a determinados requisitos. Geologicamente, bentonita é uma argila montmorilonítica originada pela alteração de cinzas vulcânicas ácidas no próprio local de formação. No entanto, alguns depósitos de argilas esmectíticas, não originárias de cinzas vulcânicas, produzem argilas esmectíticas sódicas ou cálcicas de propriedades tecnológicas equivalentes às das verdadeiras, através de reações químicas em presença de água com compostos de sódio ou cálcio.

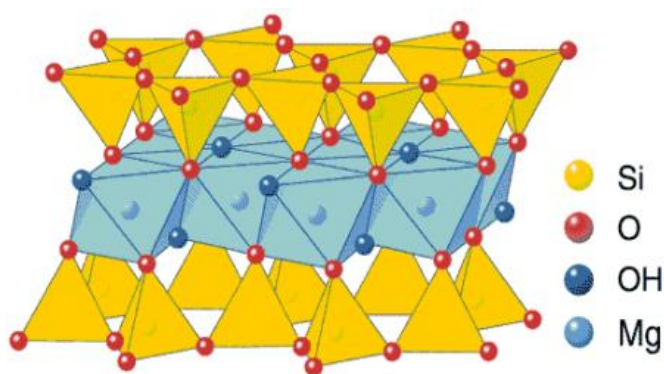
Em função de suas propriedades, as argilas bentoníticas têm mais aplicações industriais do que todos os outros tipos de argilas industriais reunidas, sendo um material versátil e de perfil adequado para obtenção de produtos ou insumos de elevado valor agregado (SILVA e FERREIRA, 2008). As bentonitas têm amplo uso industrial na preparação de fluidos de perfuração, como aglomerante de areias de moldagem, na preparação de argilas descorantes de óleos, em impermeabilização de bacias e outros usos (LUZ e OLIVEIRA, 2008).

2.2.2 Talco

O talco é um mineral da subclasse filossilicato, constituído de magnésio hidratado, e possui a fórmula química $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$, em que seus elementos estão organizados através do arranjo espacial “t-o-t”, que consiste em uma

configuração em “sanduíche”. Nesse arranjo, duas camadas tetraédricas (t), compostas por átomos de silício e oxigênio, envolvem uma camada octaédrica (o), composta por magnésio e hidroxila. O talco puro possui em sua composição química teórica 31,7% de MgO, 63,5% de SiO₂ e 4,8% de H₂O. As ligações químicas predominantes no talco são ligações de Van der Waals, que conferem uma zona de fraqueza ao longo do plano cristalográfico (0001), resultando em uma clivagem basal perfeita, além de uma superfície hidrofóbica, untuosa ao tato e com poder lubrificante e adsorvente de óleos e gorduras (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1966; PONTES e ALMEIDA, 2008).

Figura 3 - Estrutura cristalina do talco



Fonte: Adaptado de Camara (2003)

De acordo com Camara (2003), a estrutura cristalina do mineral talco pode ocorrer com simetria monoclinica ou triclinica, sendo a monoclinica mais frequente. Para a célula unitária monoclinica, os parâmetros da estrutura cristalina são: $a = 5,27 \text{ \AA}$, $b = 9,12 \text{ \AA}$, $c = 9,42 \text{ \AA}$, $\beta = 100,01^\circ$ e grupo espacial C2/c. Para a célula unitária triclinica, os parâmetros da estrutura cristalina são: $a = 5,293 \text{ \AA}$, $b = 9,179 \text{ \AA}$, $c = 9,496 \text{ \AA}$, $\alpha = 90,57^\circ$, $\beta = 98,91^\circ$, $\gamma = 90,09^\circ$ e grupo espacial C1.

O talco é o principal componente das rochas denominadas por pedra-sabão ou esteatitos e apresenta hábito placóide ou lamelar, podendo também ser fibroso ou granular. É comum haver certa confusão quando se fala nos minerais talco e pirofilita. Estes minerais podem ser utilizados de forma substitutiva em algumas aplicações industriais, pois ambos possuem propriedades similares. A textura lamelar e o aspecto sedoso ao tato confundem esses minerais. Embora a estrutura cristalina do talco seja semelhante à da pirofilita, o talco possui as posições octaédricas ocupadas por magnésio e a pirofilita, por alumínio. O talco é encontrado em rochas talcosas (estático,

saponito e pedra-sabão) e a pirofilita, em rochas pirofilitosas (agalmatolito). Ambas as rochas são metamórficas e podem conter diversas impurezas e minerais acessórios, que podem impactar positivamente ou negativamente sua aplicação comercial (CAMPOS, 2001; DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1966)

De acordo com Pontes e Almeida (2008), o talco é um mineral de origem secundária, ou seja, são formados a partir da alteração de minerais silicatos de magnésio: olivina, piroxênios, rodonita, wollastonita, pectolita e anfibólios. Podem ocorrer juntamente com a clorita, serpentina, calcita, quartzo, tremolita, dolomita, hematita e Magnesita. É encontrado tanto em rochas ígneas, quanto em rochas metamórficas. As características dos minérios de talco podem variar de um depósito para outro. A presença de impurezas nos minérios de talco pode alterar as suas características e propriedades físicas e químicas, como reatividade, abrasividade, inocuidade e brancura, além de comprometer a amplitude da aplicação (CAMARA, 2003).

Segundo Campos (2001), as principais propriedades tecnológicas que qualificam o talco para uso industrial são: alta resistência ao choque térmico, baixa condutividade térmica e elétrica, leveza, baixo teor de umidade, inércia química e alto poder de absorção de óleo e graxa. A densidade desse mineral está entre 2,7 a 2,8, apresentando também baixa dureza (assume o valor mais baixo na escala de Mohs, ou seja, igual a 1), alta área de superfície e hidrofobicidade natural, além de exibir um brilho nacarado e gorduroso e uma suavidade e untuosidade ao tato (PONTES; ALMEIDA, 2008; ROMANO; ARAUJO, 2018).

2.2.2.1 Reservas de talco no Brasil

As maiores ocorrências de talco no Brasil estão nos estados do Paraná, São Paulo e na cidade de Brumado, na Bahia. Os minérios extraídos dessas reservas fornecem material de boa qualidade industrial, sendo usado, inclusive, na produção de cosméticos, que é considerada uma das aplicações mais nobres e com maior valor agregado. No estado de Minas Gerais também há depósitos de talco, porém, possuem qualidade inferior, apresentando uma tonalidade esverdeada persistente de difícil remoção, inviabilizando sua utilização para finalidade industriais mais nobres (ROMANO e ARAUJO, 2018). De acordo com Fabris (2006), o Ceará e o Piauí possuem depósitos de talco que não são contados como reservas devido a suas

propriedades tecnológicas, características de mercado, qualidade do minério e o tamanho dos depósitos.

2.2.2.2 Emprego do talco

De acordo com Camara (2003), as propriedades físicas e químicas do talco fazem com ele seja um mineral versátil para múltiplas aplicações. Os usos industriais estão diretamente relacionados às suas propriedades tecnológicas, que refletem suas características cristal químicas. A aplicabilidade do talco em diferentes usos é determinada principalmente pela granulometria, composição química (grau de pureza), mineralogia e alvura. Os segmentos industriais que mais utilizam o talco são: cerâmica, papel e papelão, borracha, tintas e vernizes, defensivos agrícolas, produtos farmacêuticos e veterinários, cosméticos e perfumaria, sabão e velas, têxtil e produtos alimentares (PONTES; ALMEIDA, 2008; CAMPOS, 2001).

O Quadro 1, obtido de Pontes e Almeida (2008) mostra a relação entre as principais propriedades tecnológicas do talco e suas características cristal químicas.

Quadro 1 - Propriedades tecnológicas do talco e características cristal químicas

Propriedades tecnológicas	Características Intrínsecas
Inércia química e alvura	Composição química
Baixa condutibilidade térmica Baixa condutibilidade elétrica Resistência ao choque térmico	Composição química e Estrutura cristalina
Alta capacidade de absorção de óleos e graxas Alto poder lubrificante Suavidade ao tato	Hidrofobicidade natural e Estrutura cristalina
Alta área de superfície	Gênese e estrutura cristalina

Fonte: Pontes e Almeida (2008)

Na indústria cerâmica, a adição de talco favorece o aumento da resistência ao choque térmico, aumento da resistência mecânica, diminuição da retração à queima, diminuição de maturação da massa, diminuição da expansão por absorção de água, aumento da resistência ao ataque de álcalis, aumento da resistência elétrica em altas

temperaturas e diminuição da perda dielétrica. A quantidade de talco empregada vai depender do processo adotado, bem como das características do produto desejado. De maneira geral, o uso do talco na indústria cerâmica é bastante abrangente, sendo utilizado para produção de azulejos, canecos, cerâmica técnica, cerâmica industrial, ladrilhos cerâmicos, louças de mesa, louças sanitárias, pastilhas, isolantes elétricos e outros. Quando utilizado na massa cerâmica para revestimentos, azulejos e cerâmica artesanal, o percentual do mineral na composição varia de 7 a 15% (CAMPOS, 2001; PONTES; ALMEIDA, 2008; FABRIS 2006).

Na indústria de produção de papel e celulose, as principais características requeridas são: alvura, composição e propriedades químicas, abrasividade, geometria das partículas e densidade. O talco é utilizado como lubrificante, dessa forma, evita a aderência do papel fabricado aos rolos do equipamento. Além disso, é empregado também como carga (“filler”) e pigmento alvejante, devendo ser livre de impureza e apresentar inércia química, de modo a evitar reações com outros materiais presentes na fabricação do papel. O consumo de talco na indústria de papel é bastante elevado, a fim de garantir alta retenção e adequada opacidade ao papel (GOMES, 2018; PONTES; ALMEIDA, 2008; CAMPOS, 2001).

Na indústria alimentícia, o talco é utilizado na produção de óleos comestíveis (como clarificante), balas e gomas de mascar. Além disso, seu uso promove a proteção contra insetos no plantio e beneficiamento do arroz e soja. Também pode ser aplicado como veículo em rações e concentrados para suínos, ou seja, ajuda na mistura de ingredientes, carregando e dispersando de maneira uniforme outros componentes presentes na ração (CAMPOS, 2001; PONTES; ALMEIDA, 2008). Na pesquisa de Mallet *et al.* (2005), observou-se que, quando se incorpora talco como suplemento na dieta de frangos, há melhor desempenho em ganho de peso das aves.

Na indústria de defensivos agrícolas e fertilizantes, o emprego do talco se dá como carga inerte, especialmente na produção de inseticidas, herbicidas e fungicidas. Caracteriza-se pela fluidez, não decantando e sem reduzir a eficácia dos produtos químicos (GOMES, 2018; PONTES; ALMEIDA, 2008; CAMPOS, 2001).

Na indústria de produtos farmacêuticos e veterinários, o talco é empregado na produção de comprimidos, drágeas e capsulas. Ademais, pode ser utilizado como carga na fabricação de pós, granulados, pomadas e cremes, atuando como ingrediente inerte que dá volume, melhora a consistência e facilita a aplicação dos produtos (GOMES, 2018; PONTES; ALMEIDA, 2008; CAMPOS, 2011).

Na indústria de cosméticos (perfumarias, sabões e velas), o talco precisa ter alta qualidade e pureza, sendo um insumo de significativa importância e participação nesse setor. Possui propriedades conhecidas há bastante tempo de limpeza e desodorização. A aplicação deste mineral na indústria de cosméticos é bastante ampla e está em constante renovação. O talco para cosméticos é um produto de alto custo, pois a presença de determinadas impurezas, comuns em muitos tipos de talco, pode provocar reações indesejáveis na pele humana. Por isso, essas impurezas precisam ser removidas ou reduzidas a níveis seguros para essa aplicação, o que é realizado por meio de processos de beneficiamento do minério. O setor de cosméticos impõe rigorosos requisitos para o uso do talco, aceitando apenas variedades de cor impecável e praticamente isentas das impurezas comumente encontradas na maioria dos talcos. Para ser adequado ao uso em cosméticos, o talco deve estar livre de dolomita, tremolita e calcita, pois estas são substâncias abrasivas que comprometem sua suavidade e provocam um leve efeito abrasivo na pele (BARRETO, 2021; GOMES, 2018; PONTES; ALMEIDA, 2008).

Na indústria de borrachas, o talco é empregado como agente de pulverização para lubrificar os moldes, prevenindo a adesão das superfícies durante a fabricação dos produtos. Além disso, variedades de talco de menor qualidade são utilizadas na composição de algumas borrachas semiduras para válvulas (FABRIS, 2006; CAMPOS, 2001; PONTES; ALMEIDA, 2008).

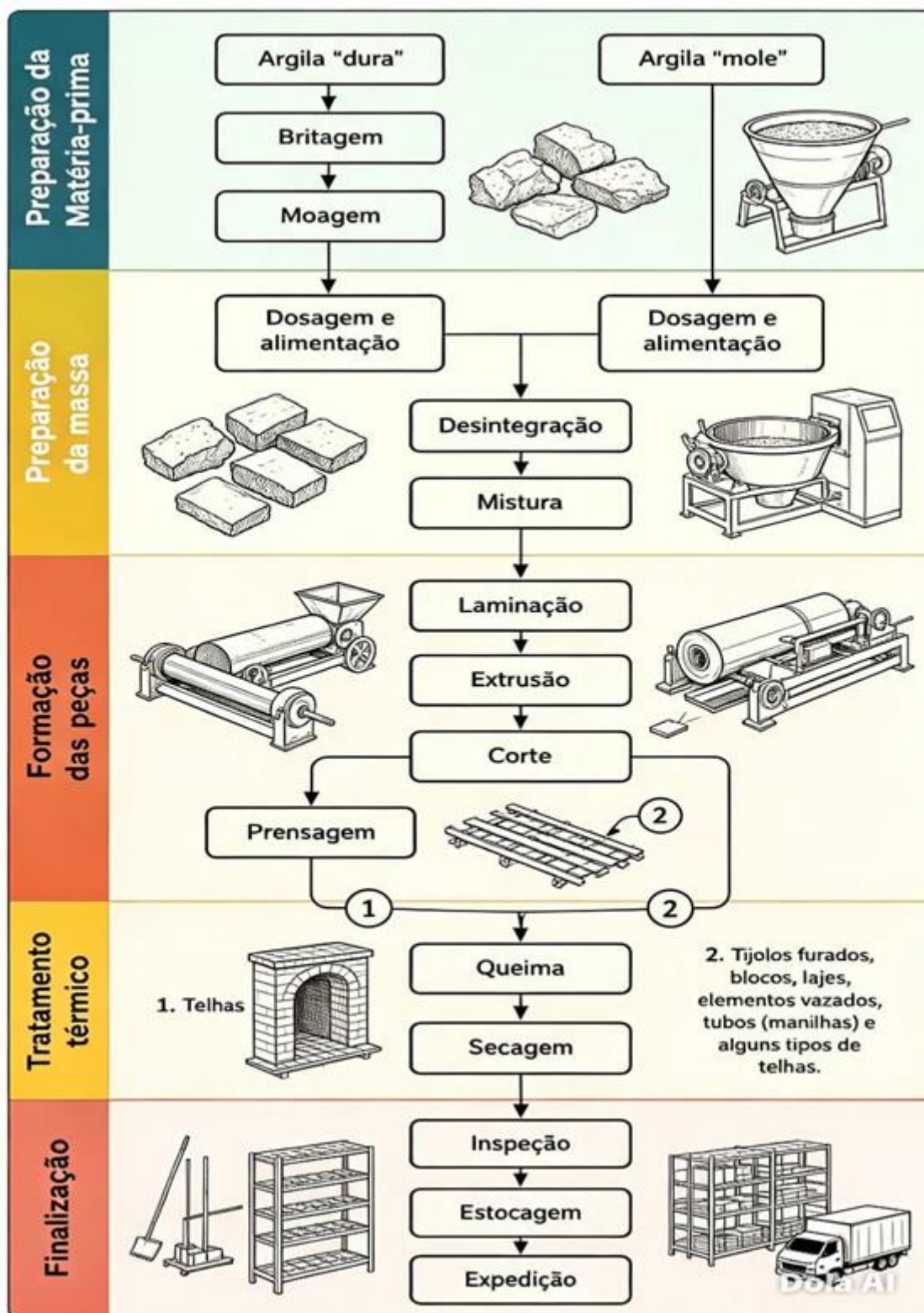
2.3 PROCESSO PRODUTIVO

De acordo com Santos (1989), observa-se como característica comum, nos diversos processos empregados pela indústria cerâmica, o uso de matérias-primas na forma fragmentada ou particulada, isto é, apresentadas como pós. Em função disso, os parâmetros que controlam o processamento cerâmico são, em grande parte, determinados pelas propriedades físicas e químicas das partículas que compõem essas matérias-primas. As propriedades físicas compreendem aspectos como dimensões, forma, densidade, estrutura cristalina, área específica, distribuição granulométrica e outras. Já as propriedades químicas referem-se ao teor de impurezas, estequiometria e defeitos estruturais, reatividade no estado sólido, características termoquímicas, termodinâmicas e outras.

As características finais dos produtos cerâmicos são influenciadas não apenas pelas matérias-primas utilizadas na formulação da massa, mas também pelo processo produtivo e pelo controle de suas variáveis, considerando as interações entre os aspectos tecnológicos e os parâmetros de processamento em cada etapa da produção (OLIVEIRA, 2000). A fabricação de materiais cerâmicos envolve uma sequência de etapas de produção destinadas ao processamento de sólidos e líquidos, nas quais, ao menos uma delas, requer a ocorrência de reações em temperaturas elevadas, a fim de conferir aos produtos cerâmicos as propriedades funcionais desejadas. As principais etapas envolvidas no processamento de materiais cerâmicos podem ser agrupadas resumidamente da seguinte forma: preparação das matérias-primas; conformação, que envolve a formação e moldagem, e fabricação; processamento térmico; acabamento. O domínio dos processos e a compreensão do comportamento das matérias-primas ao longo das diferentes etapas de produção são fundamentais para o desenvolvimento de novos processos e para a inovação em materiais cerâmicos (SANTOS, 1989).

A Figura 4 apresenta o fluxograma dos processos de fabricação de cerâmica vermelha, com detalhamento das etapas de produção.

Figura 4 - Processo de fabricação da cerâmica vermelha

Fonte: Adaptado de Aguiar *et al* (2022)

2.3.1 Exploração

A maior parte das matérias-primas empregadas na indústria cerâmica tradicional é de origem natural, proveniente de depósitos distribuídos pela crosta terrestre (ABCERAM, 2019). Na mineração da argila, predominam empreendimentos de pequeno porte. Em grande parte dessas minerações, verifica-se a inexistência de planejamento técnico apropriado, sendo recorrente a adoção de métodos extrativos artesanais e a inexistência de controle técnico sobre os processos envolvidos. A escolha do método de lavra está diretamente relacionada a fatores como a topografia do depósito, a distribuição espacial das camadas de argila, as características físicas do material, a escala de produção, o nível de investimento necessário e os tipos de cuidados ambientais (CABRAL JÚNIOR *et al*, 2008).

A seleção da matéria-prima é influenciada por diversos fatores, uma vez que cada tipo de cerâmica demanda um tipo de argila (REGO, 2008). Mesmo quando realizada de forma empírica, essa escolha considera aspectos como teor de argila, granulometria, a profundidade da jazida, as características de plasticidade e umidade do material, além da proximidade em relação à unidade fabril (PEREIRA, 2017).

No Brasil, a extração de argila é realizada a céu aberto. É fundamental o planejamento das vias de acesso e saída para caminhões, escavadeiras e demais equipamentos, de modo a garantir a eficiência das operações. A matéria-prima removida deverá ser depositada em local que não interfira na extração e não eleve o custo operacional. Os equipamentos utilizados para extração incluem, de forma geral, retroescavadeiras e o transporte da jazida à fábrica é feito por caminhão basculante. Para materiais com maior grau de compactação ou dureza, pode-se recorrer ao uso de explosivos para promover sua fragmentação (MAIA, 2012; PEREIRA, 2017).

2.3.2 Sazonamento

Após a lavra, as argilas são preparadas para serem utilizadas como matéria-prima da indústria cerâmica. Um procedimento comum é o sazonalamento da argila (CABRAL JÚNIOR *et al*, 2008). A estocagem, sazonalamento ou apodrecimento da matéria-prima consiste na formação de pilhas de argila ao relento por, no mínimo, seis meses, geralmente numa distância próxima da fábrica. Esse processo é fundamental para a melhoria da plasticidade e trabalhabilidade da massa cerâmica, pois, devido à

ação de intempéries e condições ambientais, há a retirada de sais solúveis, decomposição da matéria orgânica, diminuição das tensões em virtude da ocorrência de reações químicas, o que facilita as etapas seguintes de mistura, processamento, conformação e moldagem das peças (PEREIRA, 2017).

Outro aspecto relevante dessa etapa é que o período de descanso contribui para a redução de deformações e rupturas das peças durante a secagem, além de minimizar a formação de gases na fase de queima (HAGEMANN, 2011). Após o período de sazonalamento é recomendável que a argila seja armazenada em um pátio coberto e protegida com lona, a fim de evitar o excesso de umidade ou o ressecamento. Em seguida, a utilização do depósito se dará em cortes perpendiculares ao solo e o material será encaminhado para a etapa de preparação da massa (PEREIRA, 2017).

A falta do sazonalamento compromete a etapa de preparação da massa, resultando em baixa plasticidade, o que exige maior adição de água durante o amassamento, e favorecendo a presença de matéria orgânica, a qual pode aumentar o índice de vazios (SPOSTO *et al*, 2007).

Figura 5 - Sazonamento de argila



Fonte: Aguiar *et al* (2022)

2.3.3 Preparação da massa

A preparação da massa consiste na mistura dos diversos tipos de argila, água e resíduos, quando aplicáveis, com a finalidade de homogeneizar a composição da mistura, buscando corrigir ou uniformizar a granulometria e remover materiais indesejáveis ou incorporar novos materiais, desde que não prejudiquem a qualidade do produto final (PEREIRA, 2017). A formulação adequada da massa cerâmica constitui uma etapa crucial para garantir a qualidade do produto final, minimizar perdas no processo produtivo e aprimorar o desempenho ambiental da produção.

A formulação, em geral, é realizada de maneira empírica, buscando-se uma composição ideal com base na caracterização da plasticidade e no ponto de queima, tendo como principal objetivo assegurar uma boa trabalhabilidade e resistência mecânica após a queima (REGO e SOARES, 2015).

Os materiais cerâmicos são geralmente produzidos a partir de uma combinação de duas ou mais matérias-primas. Mesmo nos processos tradicionais de confecção de cerâmica vermelha, é comum a mistura de diferentes tipos de argila, em proporções variadas, devido às distintas características que cada uma apresenta. O uso de um único tipo de argila é raro (ALMEIDA, 2015).

Conforme Bauer (2008), a formação da pasta propriamente dita é constituída pelas etapas de maceração, correção e termina com o amassamento. Durante esse processo podem ser empregados os seguintes equipamentos: desagregadores, cilindros, moinhos e marombas.

Figura 6 - Processo de mistura da massa cerâmica



Fonte: ANICER (2013)

2.3.4 Conformação

De acordo com Maia (2012), a conformação é a etapa do processo que dá a forma desejada à pasta cerâmica. Dentre os principais métodos utilizados, destacam-se a tornearia, a colagem, a extrusão e a prensagem. A escolha do método mais apropriado depende de diversos fatores, como as características da massa cerâmica, as dimensões das peças, as exigências de fabricação, das tolerâncias especificadas e aspectos econômicos envolvidos. A conformação de produtos de cerâmica vermelha para construção civil como tijolos, blocos cerâmicos e telhas, pode ser realizada por dois tipos de técnicas: extrusão e prensagem.

A escolha do método de conformação das peças costuma ser determinada pelos interesses do fabricante, uma vez que há diferenças significativas entre as cerâmicas obtidas por extrusão e aquelas produzidas por prensagem (AGUIAR *et al*, 2022).

2.3.4.1 Extrusão

O processo de extrusão consiste em forçar, por pressão, a passagem da massa cerâmica através de um bocal apropriado, formando assim uma coluna extrudada com seção transversal, formato e dimensões desejadas (AGUIAR *et al*, 2022).

A máquina usual de extrusão é conhecida como maromba ou extrusora e tem a função de homogeneizar, desagregar e compactar as massas cerâmicas. O bocal ou molde é usualmente conhecido como boquilha. Para cada tipo de produto há uma boquilha específica (RÊGO, 2008).

A Figura 7 apresenta uma máquina extrusora em operação de produção de blocos de vedação. A massa cerâmica previamente preparada é inserida na máquina, onde sofre compactação e é empurrada por um pistão ou eixo helicoidal em direção a um molde, formando assim uma coluna extrudada com seção transversal, formato e dimensões desejados. Em seguida, a coluna é cortada por fios ou facas, formando os blocos individuais com comprimento desejado.

Figura 7 - Processo de extrusão de blocos de vedação

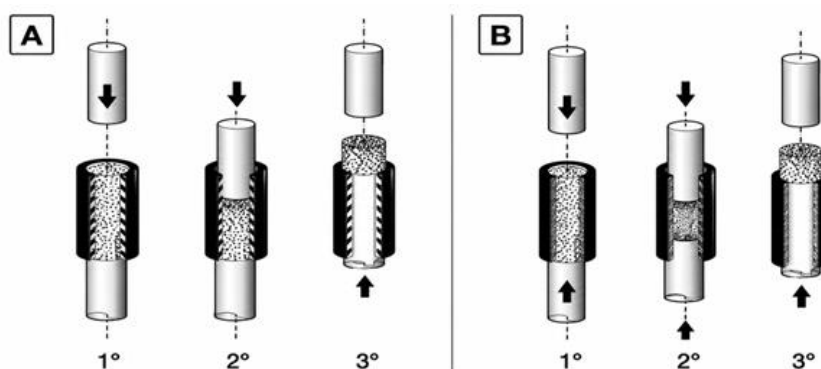


Fonte: Autor (2025)

2.3.4.2 Prensagem

O processo de prensagem consiste na compactação, sob pressão, de um pó cerâmico granulado contido no interior de uma matriz rígida ou de molde flexível. Essa operação é dividida em três etapas principais: o preenchimento da cavidade do molde com o material, compactação da massa por aplicação de pressão e, por fim, a extração da peça conformada (PEREIRA, 2017). Como indicado por Aguiar *et al* (2022), são utilizadas massas com pouco ou nenhum teor de umidade nos processos de prensagem. Podendo, ainda, serem utilizados diversos tipos de prensas, como fricção, hidráulica e hidráulica mecânica.

Figura 8 - Processo de prensagem de massas cerâmicas



Fonte: Correia (2020)

A Figura 8 mostra o processo de prensagem de massa cerâmica com êmbolo ou macho superior em sentido uniaxial por ação simples e ação dupla, respectivamente, sendo posteriormente extraída pelo êmbolo inferior.

2.3.5 Secagem

A secagem é a primeira etapa do tratamento térmico e tem papel fundamental nas propriedades do produto final (PEREIRA, 2017). Essa etapa é tão importante quanto o processo de queima, porque, após a conformação, ainda permanecem de 5 a 35% de água nas peças. Se a argila for levada ainda úmida para o forno, a umidade interior ficará retida pela crosta externa, favorecendo o aparecimento de tensões internas e possíveis fissuras ou defeitos que comprometem a qualidade das peças. A secagem deve ser uniforme, a fim de se evitar distorções (BAUER, 2008).

A secagem pode ser realizada de forma natural, ao ar livre, ou de maneira artificial, com emprego de secadores ou ar quente proveniente dos próprios fornos da indústria. Além disso, quando há necessidade de se produzir peças delgadas com alta precisão, pode ser utilizado o método de secagem por radiação infravermelha (BAUER, 2008). O processo de secagem costuma ser um dos mais custosos da produção de cerâmica vermelha, por isso, muitas empresas ainda utilizam a secagem natural das peças (AGUIAR *et al*, 2022). No entanto, a secagem natural não pode ser muito demorada, por comprometer financeiramente a produção. Geralmente, o tempo da secagem pode levar de 1 a 6 semanas, considerando as condições ambiente. Segundo Bauer (2008), a estação do ano pode influenciar no tempo de secagem, sendo que no inverno a produção costuma cair significativamente.

Após secagem, o material fica sensível a choques, portanto, deve-se evitar os solavancos e trepidações, principalmente no transporte manual, e o excesso de carga nos carros. Além disso, é recomendável que o material seja levado ao forno o mais rápido possível, pois a argila tem o poder de reabsorver a umidade contida no ar, deixando o material fraco.

A Figura 9 apresenta o processo de secagem natural de blocos de vedação em uma indústria cerâmica.

Figura 9 - Secagem natural de blocos de vedação



Fonte: Autor (2025)

2.3.6 Queima

A queima representa a etapa mais importante na fabricação de materiais cerâmicos. Durante esse processo, ocorrem diversas reações físico-químicas, com diferentes características: algumas são rápidas, outras mais lentas; certas reações devem ser completadas, enquanto outras precisam ser evitadas; algumas devem ocorrer no início do aquecimento, outras apenas no final. Isso torna o controle da queima um desafio complexo, influenciado não apenas pela temperatura atingida, mas também pela taxa de aquecimento e resfriamento, pela atmosfera do forno, pelo tipo de equipamento utilizado, pelo combustível empregado, entre outros fatores. Além disso, o consumo de combustível nesta etapa costuma ser elevado. Dessa forma, há interesse em maximizar a eficiência do processo de queima, reduzindo as perdas de calor por irradiação térmica (BAUER, 2008).

Durante a queima, ocorrem diversas transformações, as quais dependem da composição dos materiais presentes na massa cerâmica (CORREIA, 2020). O conhecimento das transformações que ocorrem é de grande interesse tecnológico, pois é a partir delas que se definem as propriedades finais requeridas dos produtos cerâmicos (AGUIAR *et al*, 2022). A temperatura da queima é determinada pela composição e pelas propriedades desejadas para a peça. Geralmente, as

temperaturas finais para a maioria dos produtos situam-se entre 800 e 1250° C. As etapas que compõem o processo de queima são: aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada, patamar durante certo tempo na temperatura especificada e resfriamento (CORREIA, 2020). O controle rigoroso dessa etapa é fundamental para garantir a qualidade e a uniformidade dos materiais cerâmicos produzidos.

O Quadro 2 mostra os principais fenômenos observados durante o processo de queima e suas respectivas faixas de temperatura.

Quadro 2 - Principais fenômenos do processo de queima e faixas de temperatura

Fenômenos observados	Faixa de temperatura (°C)
Eliminação da água livre e adsorvida em argilominerais	150 a 250
Eliminação de água estrutural de argilominerais	350 a 650
Decomposição de carbonatos (liberação de CO ₂)	400 a 800
Decomposição térmica de matéria orgânica	400 a 600
Transformação polimórfica do quartzo (α para β)	573
Início da fusão de álcalis e óxido de ferro	700 a 900
Início da sinterização	800
Início da fusão do CaO e FeO, com formação de silicatos	1000
Formação de fase vítrea com redução de tamanho de poros	1200

Fonte: Correia (2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado no Laboratório de Cerâmica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), com o apoio de laboratórios parceiros responsáveis pelas caracterizações química, mineralógica e térmica das matérias-primas. O estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de talco, nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15% em massas argilosas, proveniente do município de Dirceu Arcoverde-PI, sobre as propriedades tecnológicas de massas cerâmicas destinadas à fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram duas argilas provenientes da Cerâmica Torrões, localizada no município de Teresina-PI, e um talco oriundo do município de Dirceu Arcoverde-PI. As argilas utilizadas foram nomeadas neste trabalho como ARG01 e ARG02. A adoção dessa nomenclatura teve como finalidade padronizar a identificação das argilas durante todas as etapas experimentais, desde a caracterização das matérias-primas até a avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos cerâmicos. A Figura 10 apresenta as materiais-primas utilizadas na pesquisa.

Figura 10 - Materias-primas utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor (2026)

3.2 MÉTODOS

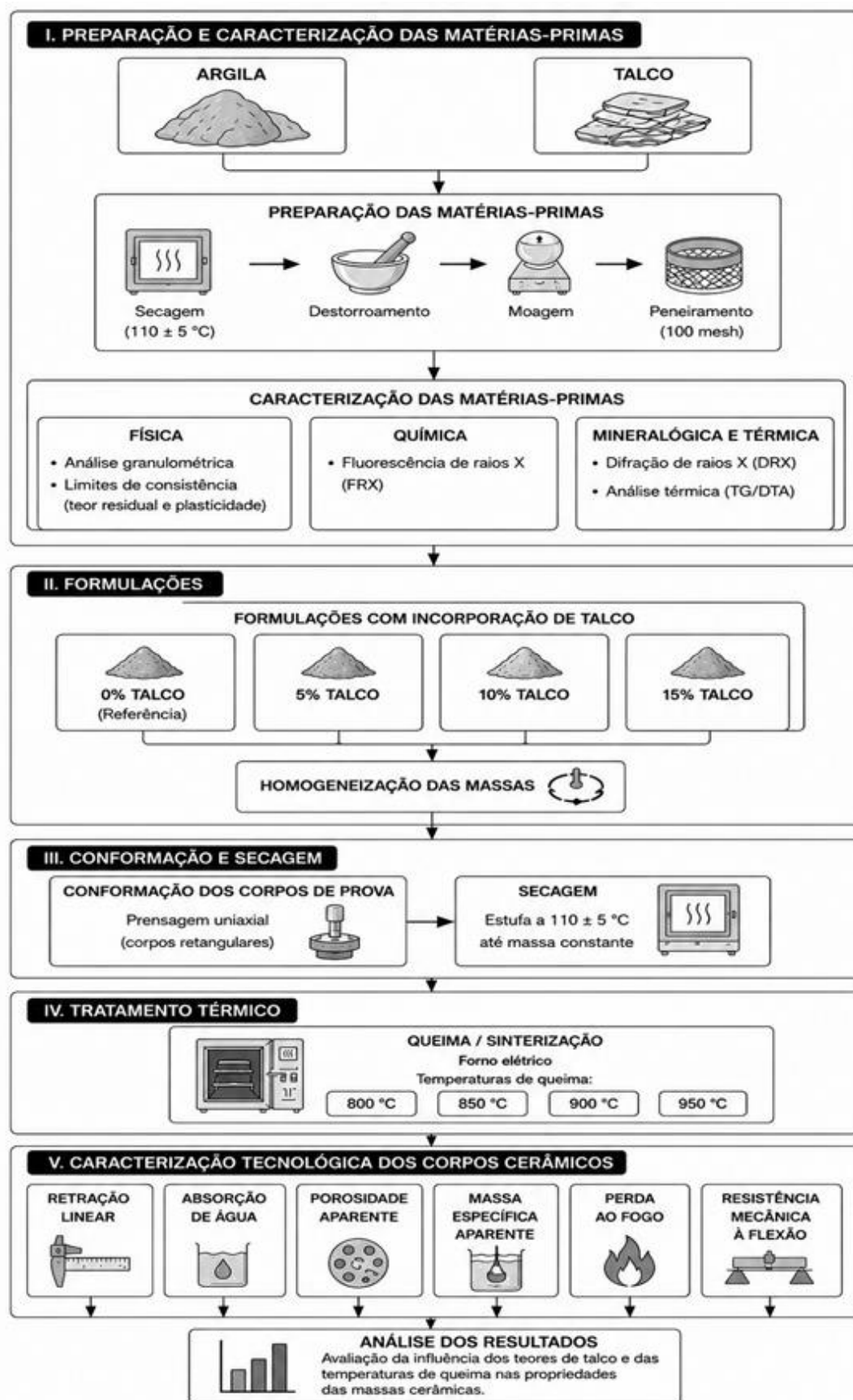
Inicialmente, as matérias-primas foram submetidas às etapas de preparação, compreendendo secagem, destorroamento, moagem e peneiramento, realizadas no Laboratório de Cerâmica do IFPI, de modo a obter uma granulometria adequada para os diferentes ensaios de caracterização e para a elaboração das formulações cerâmicas. Nesse mesmo laboratório foram conduzidos os ensaios de granulometria, índice de plasticidade, teor de resíduo, conformação dos corpos de prova e ensaio de resistência mecânica.

As caracterizações química, mineralógica e térmica das matérias-primas foram realizadas no Instituto SENAI de Tecnologia em Cerâmica (IST Cerâmica), por meio do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM), localizado em Criciúma–SC. Nesse laboratório foram executadas as análises de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (TGA), sendo esta última conduzida até a temperatura máxima de 1110 °C, permitindo a identificação das principais transformações térmicas das matérias-primas durante o aquecimento.

Após a caracterização inicial, foram elaboradas formulações contendo diferentes teores de talco, as quais foram homogeneizadas e conformadas em corpos de prova prismáticos. Em seguida, os corpos cerâmicos foram submetidos às etapas de secagem e queima. O processo de sinterização foi realizado no Laboratório do Departamento de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Piauí (UFPI), seguindo um ciclo térmico previamente estabelecido para as temperaturas de queima adotadas nesta pesquisa.

Posteriormente, os corpos de prova queimados foram submetidos aos ensaios tecnológicos para determinação das propriedades físicas e mecânicas, incluindo retração linear, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência mecânica à flexão, possibilitando avaliar a influência da incorporação do talco no desempenho das massas cerâmicas desenvolvidas. A Figura 11 mostra o fluxograma da metodologia da pesquisa.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autor (2026)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS-PRIMAS

As matérias-primas utilizadas neste estudo foram caracterizadas individualmente por meio de ensaios físicos, químicos, mineralógicos e térmicos. Essas análises tiveram como objetivo determinar as propriedades fundamentais dos materiais e compreender sua influência sobre o comportamento tecnológico das massas cerâmicas produzidas. Para tanto, foram realizados ensaios de análise granulométrica por peneiramento, determinação da umidade, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA).

Inicialmente, a argila foi seca à temperatura ambiente e, posteriormente, submetida ao processo de destorroamento em moinho de martelos da marca TRAPP, pertencente ao Laboratório de Engenharia de Materiais (LEM) do Instituto Federal do Piauí (IFPI). O equipamento possuía peneira acoplada com abertura de malha de 2,47 mm, permitindo a redução do tamanho das partículas. Em seguida, o material foi peneirado em peneira de 50 mesh (0,297 mm), etapa essencial para obtenção de uma granulometria homogênea e adequada às etapas subsequentes de processamento.

Após essa etapa, aproximadamente 3 kg de cada argila e talco foram separados e submetidos à secagem em estufa a 110 °C até massa constante, com o objetivo de eliminar a umidade e preparar as amostras para as análises de caracterização, sendo estas a fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (TGA). Para a determinação da plasticidade, as amostras secas em estufa foram separadas em porções de aproximadamente 500 g e peneiradas individualmente em peneira de 80 mesh (180 µm), conforme a granulometria recomendada para esse tipo de ensaio.

As caracterizações físicas incluíram a análise granulométrica por peneiramento e a determinação da umidade das matérias-primas. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), enquanto a identificação das fases cristalinas foi realizada por difração de raios X (DRX). O comportamento térmico das argilas foi investigado por meio das técnicas de termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA), com o objetivo de identificar as principais alterações de massa e os eventos térmicos associados ao aquecimento das amostras, incluindo a perda de água adsorvida, a desidroxilação dos argilominerais, a decomposição de compostos e as transformações de fase em função da temperatura.

3.3.1 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição química das matérias-primas foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX), a qual permite a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras. Trata-se de uma técnica não destrutiva, amplamente empregada na caracterização de materiais devido à sua rapidez, precisão e confiabilidade.

As análises foram realizadas utilizando amostras previamente preparadas conforme descrito na seção 3.3. Os resultados permitiram determinar, de forma qualitativa e quantitativa, os principais óxidos constituintes das matérias-primas, fornecendo informações essenciais para a compreensão de seu comportamento durante o processamento e a sinterização das massas cerâmicas.

3.3.2 Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) foi utilizada para a caracterização mineralógica das matérias-primas, permitindo a identificação das fases cristalinas presentes nas argilas. A técnica baseia-se na difração dos raios X pelos planos cristalográficos do material, gerando padrões característicos que possibilitam a identificação das fases minerais por comparação com padrões de referência.

As análises foram realizadas no Instituto SENAI de Tecnologia em Cerâmica (IST Cerâmica), por meio do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM), localizado em Criciúma–SC, empregando um difratômetro de raios X com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação dos difratogramas obtidos com os padrões disponíveis na base de dados do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Nesse mesmo laboratório, foram realizadas as análises de fluorescência de raios X (FRX), termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA). As análises térmicas foram conduzidas até a temperatura de 1110 °C, permitindo avaliar o comportamento e as principais transformações térmicas das matérias-primas durante o aquecimento, incluindo a perda de água adsorvida, a desidroxilação dos argilominerais e a ocorrência de eventos endotérmicos e exotérmicos.

O método de difração de raios X (DRX) baseia-se na interação entre a radiação incidente, de comprimento de onda (λ), e os planos cristalográficos do material, espaçados por uma distância interplanar (d). A difração ocorre quando os raios X incidem sobre a estrutura cristalina, produzindo máximos de interferência construtiva para determinados ângulos de difração (θ), de acordo com a Lei de Bragg, descrita pela Equação 1 (CULLITY; STOCK, 2014). Esse princípio permite a identificação das fases cristalinas presentes no material por meio da análise dos difratogramas obtidos.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

λ é o comprimento de onda;

d é a distância entre os planos cristalinos; e

θ é ângulo de Bragg.

3.3.3 Ensaio de determinação do teor de resíduo (%R)

Para a realização do ensaio de resíduo foi utilizado 100g de cada argila seca com granulometria abaixo de #200 mesh. Em seguida cada amostra foi colocada na peneira com malha de abertura #325 mesh. Cada amostra foi lavada com água corrente em torneira. As etapas do ensaio foram exemplificadas na Figura 12.

Figura 12 - Etapas do ensaio de teor residual



Fonte: Autor (2026)

A Figura 13 apresenta imagens do ensaio de teor residual das duas argilas do estudo.

Figura 13 - Ensaio de teor residual realizado na pesquisa



Fonte: Autor (2026)

Antes de colocar na estufa para secar foi removido o excesso da água com muito cuidado, para não passar material e logo após a amostra foi para secar em estufa por aproximadamente duas horas, esperou-se o resfriamento e em seguida foi pesado a massa da amostra. Isso foi repetido três vezes para cada argila. A massa do resíduo retido na peneira #325 e seco em estufa e os resultados dos ensaios foram diretamente expressos na forma percentual, calculados pela fórmula apresentada na Equação 2.

$$\%R = \frac{Mr}{Mt} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

%R é a porcentagem de resíduo, em %;

Mr é a massa do resíduo retido na peneira #325 e seco em estufa, em g;

Mt é a massa total da amostra, em gramas.

3.3.4 Análise Granulométrica por Peneiramento

A análise granulométrica é um procedimento empregado para determinar a distribuição do tamanho das partículas de uma matéria-prima, constituindo uma etapa fundamental na caracterização de materiais cerâmicos. Essa propriedade influencia diretamente o empacotamento das partículas, a plasticidade da massa, a retração durante a secagem e a queima, bem como as propriedades físicas e mecânicas do produto final. O ensaio consiste na separação das partículas em função de seu tamanho por meio de peneiramento, sendo os resultados expressos pelas

porcentagens de material retido, retido acumulado e passante em cada peneira, permitindo a construção da curva de distribuição granulométrica.

A determinação da granulometria das matérias-primas foi realizada através da utilização de um agitador vibratório e um conjunto de peneiras da série Tyler, composto pelas malhas #8 (2,380 mm), #16 (1,190 mm), #30 (0,590 mm), #50 (0,297 mm), #100 (0,149 mm), #200 (0,075 mm), #270 (0,053 mm) e #400 (0,038 mm), além do fundo, destinado à coleta das partículas com dimensões inferiores à menor abertura de malha. A seleção das peneiras foi baseada na metodologia descrita por Netto (2019) para a caracterização granulométrica de matérias-primas cerâmicas.

Os ensaios foram realizados em agitador vibratório pertencente ao Laboratório Interdisciplinar de Materiais (LEM) do Instituto Federal do Piauí (IFPI). As amostras foram submetidas ao peneiramento durante aproximadamente 10 minutos. Ao término do ensaio, determinou-se a massa retida em cada peneira, sendo posteriormente calculadas as porcentagens de massa retida, retida acumulada e passante.

3.3.5 Análise de Plasticidade

A plasticidade corresponde à capacidade de um material deformar-se sob a ação de uma força externa sem sofrer ruptura, sendo uma das propriedades mais importantes das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica. Essa característica influencia diretamente a conformação das peças, a trabalhabilidade da massa e o desempenho durante as etapas de secagem e queima.

A determinação da plasticidade das argilas foi realizada por meio dos Limites de Atterberg, compreendendo o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). Os ensaios foram conduzidos no Laboratório Interdisciplinar de Materiais (LEM) do Instituto Federal do Piauí (IFPI), utilizando o aparelho de Casagrande para determinação do limite de liquidez (Figura 14), conforme as normas ABNT NBR 6459:2017 e ABNT NBR 7180:2016, que substituem as versões antigas dessas normas.

Figura 14 - Aparelho de Casagrande



Fonte: MARINHO (2020)

Para a preparação das amostras, as argilas foram secas, destorroadas e peneiradas em peneira de abertura 0,180 mm (80 mesh), conforme estabelecido pelas normas. Em seguida, adicionou-se água destilada gradativamente até obtenção de uma pasta homogênea e de consistência plástica, sendo a mistura homogeneizada durante aproximadamente 15 a 30 minutos.

Na determinação do Limite de Liquidez (LL), a pasta foi colocada na concha do aparelho de Casagrande, ocupando aproximadamente $2/3$ (dois terços) de sua capacidade. Utilizando o cinzel padronizado, foi aberta uma ranhura no centro da amostra e a manivela do equipamento foi acionada à velocidade aproximada de duas rotações por segundo, até que a ranhura se fechasse. O procedimento foi repetido para diferentes teores de umidade, obtendo-se 5 (cinco) determinações distribuídas entre aproximadamente 15 e 35 golpes, conforme recomendado pela norma (Figura 15).

Figura 15 - Ensaio de Casagrande



Fonte: Autor (2026)

Após cada determinação, uma porção da amostra foi retirada da região onde ocorreu o fechamento da ranhura, acondicionada em cápsulas de alumínio

previamente identificadas e submetida à secagem em estufa a 110 ± 5 °C por aproximadamente 24 horas, para determinação do teor de umidade correspondente a cada número de golpes. O valor do Limite de Liquidez (LL) foi obtido por meio da curva de fluxo, construída a partir da relação entre o teor de umidade e o número de golpes. O teor de umidade correspondente a 25 golpes foi adotado como o Limite de Liquidez, conforme estabelece a ABNT NBR 6459:2017.

Para a determinação do Limite de Plasticidade (LP), parte da mesma pasta foi moldada manualmente sobre uma placa de vidro fosco até formar cilindros com aproximadamente 3 mm de diâmetro. A Figura 16 apresenta o ensaio de (LP).

Figura 16 - Ensaio de Limite de Plasticidade (LP) realizado na pesquisa



Fonte: Autor (2026)

O ensaio foi repetido até que os cilindros apresentassem fissuras ao atingir esse diâmetro, sendo então determinada a umidade correspondente, conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 7180:2016. O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, conforme a Equação 3:

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

IP é o Índice de Plasticidade (%);

LL é o Limite de Liquidez (%);

LP é o Limite de Plasticidade (%).

Os valores obtidos foram utilizados para classificar as matérias-primas quanto ao seu grau de plasticidade, conforme as classificações propostas por SENAI-SP (2002) e Gouveia (2008).

3.3.5.1 Ensaio de Plasticidade

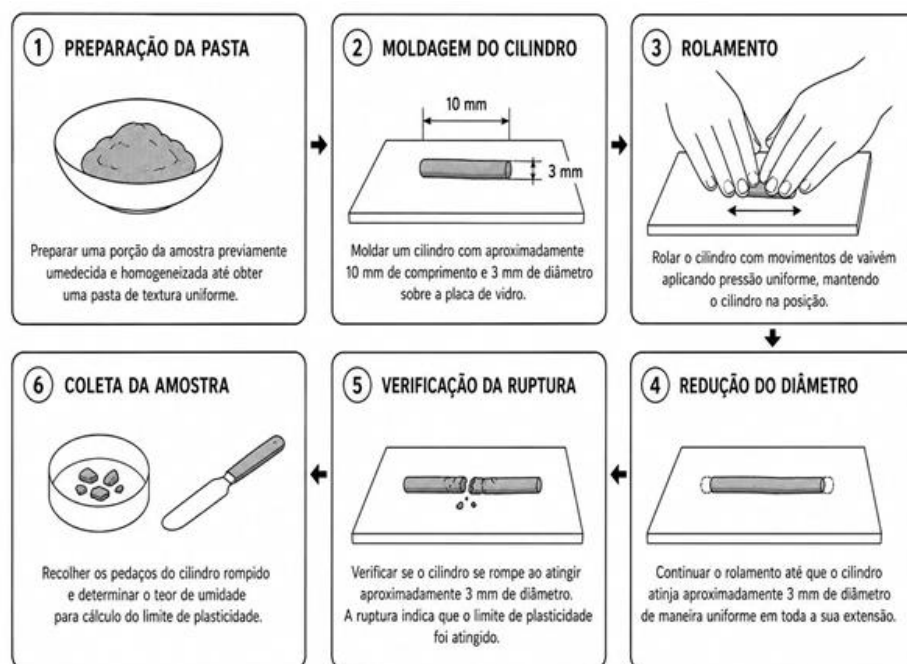
3.3.5.1.1 Água de Amassamento (AA)

A água de amassamento corresponde à quantidade de água necessária para conferir trabalhabilidade adequada à massa cerâmica, permitindo sua conformação sem aderência excessiva às mãos ou ocorrência de fissuras.

3.3.5.1.2 Água de Esfarelamento (AE) ou Limite de Plasticidade (LP)

A água de esfarelamento (AE) ou Limite de Plasticidade (LP) representa o menor teor de umidade no qual o material ainda apresenta comportamento plástico. Abaixo desse limite, a massa torna-se quebradiça e perde sua capacidade de deformação. A Figura 17 apresenta as etapas do ensaio para determinação de limite de plasticidade (LP).

Figura 17 - Ensaio de Limite de Plasticidade (LP)

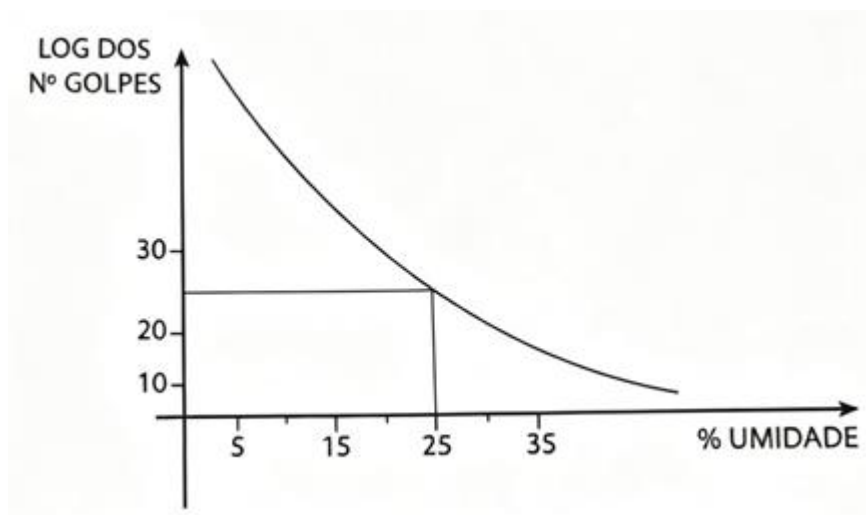


Fonte: Adaptado de SENAI-SP (2002)

3.3.5.1.3 Limite de Liquidez (LL)

O limite de liquidez corresponde ao teor de umidade em que o material passa do estado plástico para o estado líquido, sendo determinado experimentalmente pelo aparelho de Casagrande. O valor do LL é dado pela % da umidade correspondente a 25 golpes. Para encontrar o teor de umidade correspondente a 25 golpes, conforme a norma, basta traçar uma reta no golpe de nº 25, até que ela cruze a curva do gráfico construído pelos cinco pontos do ensaio realizado, e traçar outra reta até encontrar o eixo x (% umidade), conforme a Figura 18.

Figura 18 - Gráfico com a curva do limite de liquidez (LL)



Fonte: Adaptado de SENAI-SP (2002)

3.3.5.1.4 Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade representa a faixa de umidade na qual o material apresenta comportamento plástico, sendo calculado pela diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade. Após a determinação do valor do índice de plasticidade deve-se classificar esse valor. A Tabela 1 apresenta a classificação das argilas através do valor de índice de plasticidade.

Tabela 1 - Classificação da argila em função do índice de plasticidade

Classificação da Argila	Índice de Plasticidade (IP) (%)
Excessivamente plástica	19 a 25
Excelente	17 a 18
Boa	15 a 16
Regular	13 a 14

Fonte: Adaptado de SENAI-SP (2002)

Nesse contexto, a classificação das matérias-primas pode ser avaliada segundo a sua plasticidade, de acordo com os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das massas cerâmicas segundo o índice de plasticidade

Classificação	Índice de Plasticidade (IP)
Fracamente plástica	$1 \leq IP \leq 7$
Medianamente plástica	$7 < IP \leq 15$
Altamente plástica	$IP > 15$

Fonte: Adaptado de Gouveia (2008)

3.3.6 Determinação da Umidade

O teor de umidade corresponde à quantidade de água presente naturalmente na matéria-prima e constitui uma importante propriedade para o processamento cerâmico, uma vez que influencia diretamente a conformação e a secagem dos corpos cerâmicos.

Para determinação da umidade, as amostras foram inicialmente pesadas em seu estado natural para obtenção da massa úmida. Posteriormente, foram secas em estufa a 110 °C até atingirem massa constante. Após resfriamento em dessecador, as amostras foram novamente pesadas para obtenção da massa seca. Os resultados foram expressos em porcentagem, sendo calculados em base úmida e base seca.

Após a secagem das amostras em estufa a 110 °C até massa constante, o teor de umidade foi determinado em base úmida e base seca. A umidade em base úmida foi calculada pela Equação 4, considerando a relação entre a massa de água e a massa total da amostra úmida:

$$U_{bu}(\%) = (M_u - M_s)/M_u * 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em seguida, a umidade em base seca foi obtida pela Equação 5, que relaciona a massa de água com a massa seca da amostra:

$$U_{bs}(\%) = (M_u - M_s)/M_s * 100 \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

M_u é a massa da amostra úmida (g);

M_s é a massa da amostra seca (g).

Essas equações são as mais utilizadas em estudos de caracterização de argilas e materiais cerâmicos, sendo amplamente empregadas em pesquisas de engenharia de materiais, geotecnia e tecnologia cerâmica.

3.4 FORMULAÇÃO DAS MASSAS CERÂMICAS

Após a etapa de caracterização das matérias-primas, foram definidas as formulações das massas cerâmicas utilizadas neste estudo. O objetivo dessa etapa foi avaliar a influência da incorporação de talco nas propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos produzidos.

As formulações foram elaboradas utilizando uma mistura das argilas coletadas e talco, mantendo-se constantes as proporções entre as argilas e variando-se apenas o teor de talco incorporado à massa. A formulação sem adição de talco foi adotada como massa de referência, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com as demais composições. A Tabela 3 apresenta as formulações desenvolvidas para a pesquisa.

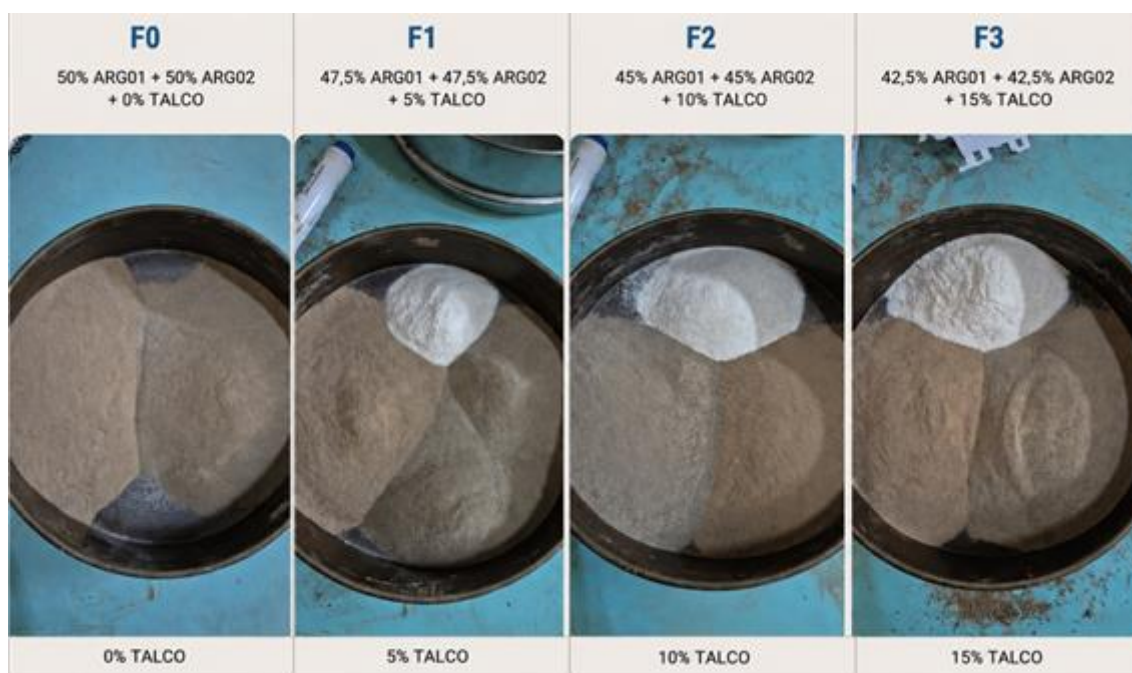
Tabela 3 - Composição das formulações cerâmicas utilizadas no estudo

Matérias-primas	F0	F1	F2	F3
ARG01 (%)	50,0	47,5	45,0	42,5
ARG02 (%)	50,0	47,5	45,0	42,5
Talco (%)	0,0	5,0	10,0	15,0
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Autor (2026)

Para a preparação das formulações, as matérias-primas foram inicialmente pesadas em balança digital de precisão, obedecendo às proporções previamente estabelecidas. Em seguida, os materiais foram misturados a seco até obtenção de uma composição homogênea. A Figura 19 apresenta as matérias-primas formuladas usadas na pesquisa, antes da mistura física entre elas.

Figura 19 - Formulações das matérias-primas usadas na pesquisa



Fonte: Autor (2026)

Posteriormente, adicionou-se água de forma gradual até atingir a umidade adequada para o processo de conformação. Após a umidificação, as massas foram novamente homogeneizadas manualmente para garantir uma distribuição uniforme da água e do talco em toda a composição. A Figura 20 apresenta as matérias-primas misturadas e umidificadas com água destilada e com umidade variando de 10% a

12%. Foram acrescentados aproximadamente 10% de volume de água em relação ao peso total da formulação. Cada formulação teve 3 (três) quilogramas e 10%, ou seja, 30 ml de água destilada em cada formulação.

Figura 20 - Formulação umidificada com água destilada



Fonte: Autor (2026)

Após a mistura, as massas foram acondicionadas em recipientes plásticos hermeticamente fechados por um período de 24 horas. Essa etapa teve como finalidade promover a distribuição homogênea da umidade no interior da massa cerâmica, favorecendo a plasticidade e melhorando as condições de conformação dos corpos de prova.

3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a preparação e homogeneização das formulações cerâmicas, iniciou-se a etapa de conformação dos corpos de prova. A conformação é uma das etapas mais importantes do processamento cerâmico, pois influencia diretamente a densidade inicial das peças e, conseqüentemente, as propriedades tecnológicas desenvolvidas após a secagem e a queima.

Os corpos de prova foram produzidos por meio de prensagem uniaxial, técnica amplamente utilizada em pesquisas envolvendo materiais cerâmicos devido à sua capacidade de produzir amostras com dimensões padronizadas e boa uniformidade

estrutural. Para a conformação, a massa cerâmica previamente homogeneizada foi ajustada para um teor de umidade de aproximadamente 8%, valor situado na faixa usualmente empregada para a prensagem de massas cerâmicas, favorecendo a compactação e a obtenção de corpos de prova com adequada resistência a verde e integridade após a desmoldagem. Para cada corpo de prova, foram utilizados aproximadamente 20 g de massa cerâmica. A Figura 21 apresenta a prensa utilizada para a conformação dos corpos de prova.

Figura 21 - Prensa hidráulica manual



Fonte: Autor (2026)

A Figura 22 apresenta um corpo de prova pesando aproximadamente 20 gramas após a conformação por prensagem.

Figura 22 - Corpo de prova conformado



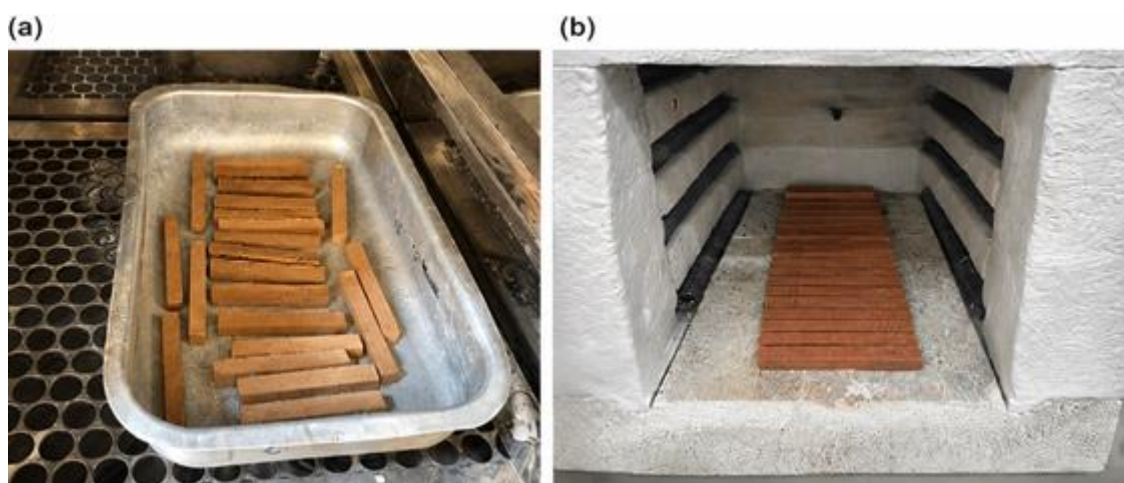
Fonte: Autor (2026)

A conformação foi realizada utilizando uma matriz metálica retangular com dimensões internas de 80 mm x 10 mm x 10 mm. A massa cerâmica foi inserida na matriz e submetida à compactação por prensagem uniaxial, promovendo a aproximação das partículas e reduzindo a quantidade de vazios presentes no material conformado.

Após a prensagem, os corpos de prova foram cuidadosamente retirados da matriz e identificados de acordo com suas respectivas formulações. Em seguida, foram encaminhados para a etapa de secagem, visando a remoção gradual da água utilizada durante o preparo das massas cerâmicas.

Foram produzidos corpos de prova para todas as formulações estudadas, os quais posteriormente foram submetidos ao tratamento térmico nas temperaturas de 800 °C, 850 °C, 900 °C e 950 °C. As etapas de secagem e caracterização tecnológica foram realizadas no Laboratório de Cerâmica do Instituto Federal do Piauí (IFPI), Campus Teresina Central, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais (PPGEM). A queima dos corpos de prova foi realizada no Laboratório do Departamento de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Piauí. A Figura 23 (a) apresenta a etapa de secagem dos corpos de provas e a Figura 23 (b) apresenta a etapa de queima.

Figura 23 - Etapas (a) corpos de prova na etapa de secagem em estufa (b) corpos de prova na etapa de queima



Fonte: Autor (2026)

Após a queima, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de retração linear, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, tensão de ruptura à flexão e análise macroestrutural, com o objetivo de avaliar a influência da incorporação de talco no comportamento tecnológico das massas cerâmicas desenvolvidas.

3.6 SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A etapa de secagem constitui uma das fases mais importantes do processamento cerâmico, pois é responsável pela remoção gradual da água incorporada durante a conformação. Uma secagem inadequada pode provocar defeitos como empenamentos, fissuras e trincas, comprometendo a qualidade final do produto.

Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos à secagem natural em temperatura ambiente durante um período de 48 horas. Essa etapa permitiu a evaporação gradual da água livre presente na massa cerâmica, reduzindo a ocorrência de tensões internas. Após a secagem natural, os corpos de prova foram transferidos para estufa de secagem, onde permaneceram a uma temperatura de 110 °C por aproximadamente 24 horas ou até atingirem massa constante.

Ao final do processo de secagem, os corpos de prova foram retirados da estufa, resfriados em temperatura ambiente e submetidos às medições dimensionais e pesagens necessárias para os cálculos das propriedades tecnológicas avaliadas posteriormente.

3.7 QUEIMA DOS CORPOS DE PROVA

A etapa de queima foi realizada com o objetivo de promover as transformações físico-químicas responsáveis pelo desenvolvimento das propriedades finais dos materiais cerâmicos. Durante o tratamento térmico ocorrem processos importantes como eliminação da água residual, decomposição de minerais, formação de novas fases cristalinas e desenvolvimento da sinterização, resultando no aumento da resistência mecânica e na redução da porosidade do material.

Os corpos de prova foram queimados em forno elétrico programável nas temperaturas de 800 °C, 850 °C, 900 °C e 950 °C, temperaturas selecionadas por

representarem a faixa normalmente utilizada na fabricação de produtos de cerâmica vermelha. O aquecimento foi realizado de forma controlada, utilizando taxa de aquecimento adequada para evitar defeitos associados a choques térmicos. Após atingir a temperatura de patamar, os corpos de prova permaneceram no interior do forno pelo tempo necessário para garantir a uniformidade térmica e o desenvolvimento das reações de sinterização.

Concluído o ciclo térmico, o resfriamento ocorreu naturalmente no interior do forno até que os corpos de prova atingissem temperatura segura para manuseio. Após o resfriamento, os corpos cerâmicos foram identificados, pesados e submetidos aos ensaios tecnológicos.

3.8 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS CORPOS CERÂMICOS APÓS A QUEIMA

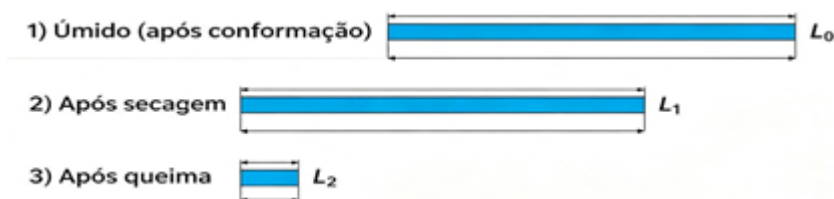
Após o tratamento térmico, os corpos de prova foram caracterizados por meio de ensaios tecnológicos que permitiram avaliar a influência da incorporação de talco sobre o comportamento físico e mecânico das formulações estudadas.

Foram determinados os valores de retração linear, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão. Também foi realizada a análise macroestrutural dos corpos queimados.

3.8.1 Retração Linear

A retração linear é uma propriedade tecnológica utilizada para avaliar a variação dimensional sofrida pelo material durante o processo de queima. Essa propriedade está diretamente relacionada ao grau de sinterização da massa cerâmica. Valores elevados de retração geralmente indicam maior aproximação entre as partículas e maior densificação do material, enquanto valores muito baixos podem indicar sinterização insuficiente. Os comprimentos utilizados para a determinação do ensaio de retração estão mostrados no esquema da Figura 24.

Figura 24 - Esquema da retração linear



Fonte: Autor (2026)

A determinação da retração linear foi realizada através da medição do comprimento dos corpos de prova antes e após a queima, utilizando paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Os valores foram calculados utilizando a Equação 6.

$$RL(\%) = \left[\frac{(L_i - L_f)}{L_i} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

RL é a retração linear (%);

L_i é o comprimento inicial do corpo de prova;

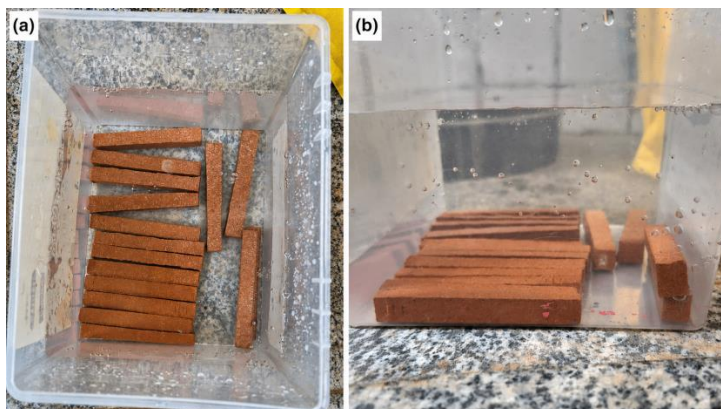
L_f é o comprimento final do corpo de prova.

3.8.2 Absorção de Água (AA)

A absorção de água é uma das propriedades tecnológicas mais importantes para a avaliação da qualidade de produtos cerâmicos, uma vez que está diretamente relacionada à quantidade de poros abertos presentes no material após a queima. Em geral, materiais que apresentam elevados valores de absorção de água possuem maior quantidade de poros interconectados, enquanto menores valores indicam maior densificação da massa cerâmica e melhor eficiência do processo de sinterização.

A determinação da absorção de água foi realizada por meio da diferença entre a massa seca e a massa saturada dos corpos de prova após a queima. Inicialmente, os corpos de prova queimados foram pesados em balança analítica para obtenção da massa seca (M_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água destilada à temperatura ambiente por um período de 24 horas, permitindo o preenchimento dos poros abertos pela água. A Figura 25 apresenta os corpos de provas submetidos em água para a realização do ensaio de absorção de água.

Figura 25 - Corpo de prova conformado



Fonte: Autor (2026)

Após o período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água e o excesso de umidade superficial foi removido cuidadosamente com auxílio de pano úmido. Em seguida, realizou-se nova pesagem para obtenção da massa úmida ou saturada (M_u). O ensaio de absorção de água é amplamente utilizado na indústria cerâmica como parâmetro de controle da qualidade dos produtos, permitindo avaliar o grau de vitrificação alcançado durante a queima e a adequação do material às exigências normativas. Os valores de absorção de água foram calculados em porcentagem utilizando a Equação 7.

$$AA(\%) = \left[\frac{(M_u - M_s)}{M_s} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

AA é a absorção de água (%);

M_u é a massa úmida ou saturada do corpo de prova (g);

M_s é a massa seca do corpo de prova após a queima (g).

Para cada formulação e temperatura de queima foi calculada a média aritmética dos valores obtidos, possibilitando a comparação do comportamento das massas cerâmicas estudadas.

3.8.3 Porosidade Aparente (PA)

A porosidade aparente corresponde à relação entre o volume de poros abertos e o volume aparente total do corpo cerâmico. Essa propriedade exerce influência direta sobre diversas características tecnológicas dos materiais cerâmicos, tais como absorção de água, resistência mecânica, durabilidade e comportamento térmico. A determinação da porosidade aparente foi realizada utilizando os mesmos corpos de prova empregados no ensaio de absorção de água. Para isso, foram obtidos três valores de massa: massa seca (M_s), massa saturada ou úmida (M_u) e massa imersa (M_i).

A massa imersa foi determinada através do método hidrostático, utilizando balança equipada com dispositivo para pesagem em água. Esse procedimento permitiu determinar o volume aparente dos corpos de prova e, consequentemente, calcular sua porosidade aparente. Os valores de porosidade aparente foram calculados por meio da Equação 8.

$$PA(\%) = \left[\frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_i)} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

PA = porosidade aparente (%);

M_u = massa saturada do corpo de prova (g);

M_s = massa seca do corpo de prova (g);

M_i = massa imersa do corpo de prova (g).

A Figura 26 apresenta a determinação da porosidade aparente pelo método de Arquimedes, na qual o corpo de prova previamente saturado em água é suspenso em um recipiente com água, utilizando-se uma cesta metálica. Esse procedimento permite determinar a massa imersa da amostra, parâmetro utilizado em conjunto com as massas seca e saturada para calcular a porosidade aparente do material. O método baseia-se no princípio do deslocamento de volume e permite quantificar a fração de poros abertos acessíveis à água no corpo de prova.

Figura 26 - Corpo de prova suspenso em recipiente com água



Fonte: Autor (2026)

A Figura 25 apresenta o esquema das etapas para a determinação do ensaio de porosidade aparente, através do método de Arquimedes.

Figura 27 - Esquema do ensaio de porosidade aparente



Fonte: Autor (2026)

3.8.4 Massa Específica Aparente (MEA)

A massa específica aparente representa a relação entre a massa do material cerâmico e seu volume aparente, incluindo os poros permeáveis presentes na estrutura. Essa propriedade é amplamente utilizada para avaliar o grau de compactação e densificação alcançado após a sinterização.

Em materiais cerâmicos, o aumento da massa específica aparente está normalmente associado à redução da porosidade e ao desenvolvimento de uma microestrutura mais compacta, fatores que contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas. A determinação da massa específica aparente foi realizada

utilizando os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e porosidade aparente. O cálculo foi efetuado por meio da Equação 9.

$$MEA(g/cm^3) = \frac{Ms}{(Mu - Mi)} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

MEA é a massa específica aparente (g/cm³);

Ms é a massa seca do corpo de prova após a queima (g);

Mu é a massa saturada do corpo de prova (g);

Mi é a massa imersa do corpo de prova (g).

Os resultados permitiram avaliar o efeito da incorporação de talco e da elevação da temperatura de queima sobre o processo de densificação das massas cerâmicas.

3.8.5 Perda ao Fogo (PF)

A perda ao fogo é uma propriedade tecnológica utilizada para avaliar a redução de massa sofrida pelos corpos cerâmicos durante o processo de queima. Essa perda está associada principalmente à eliminação da água de constituição dos argilominerais, decomposição da matéria orgânica, decomposição de carbonatos eventualmente presentes na matéria-prima e volatilização de alguns compostos durante o tratamento térmico.

A determinação da perda ao fogo é importante porque fornece informações sobre as transformações físico-químicas ocorridas durante a queima e auxilia na compreensão do comportamento das matérias-primas utilizadas nas formulações cerâmicas. Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa até massa constante e pesada em balança analítica para obtenção da massa seca (Ms). Após a queima nas temperaturas de 800 °C, 850 °C, 900 °C e 950 °C, os corpos de prova foram novamente pesados para determinação da massa após a queima (Mq). Os valores de perda ao fogo foram calculados em porcentagem utilizando a Equação 10.

$$PF(\%) = \left[\frac{(M_s - M_q)}{M_s} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

PF é a perda ao fogo (%);

Ms é a massa seca do corpo de prova antes da queima (g);

Mq é a massa do corpo de prova após a queima (g).

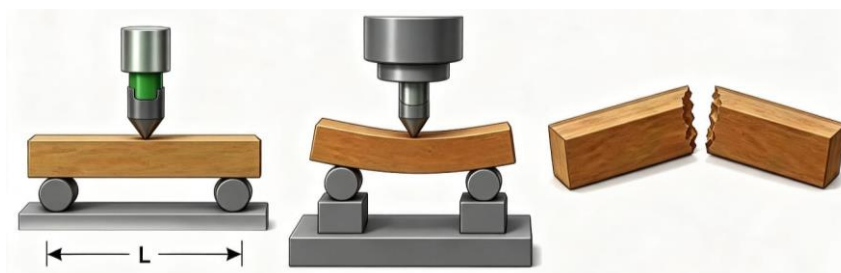
Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência da incorporação de talco e da temperatura de queima sobre as transformações térmicas ocorridas nas massas cerâmicas estudadas.

3.8.6 Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)

A resistência mecânica dos corpos cerâmicos foi avaliada por meio do ensaio de tensão de ruptura à flexão em três pontos. Essa propriedade representa a capacidade de o material resistir aos esforços mecânicos aplicados até a ocorrência da ruptura, sendo um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade tecnológica de produtos cerâmicos destinados à construção civil.

O aumento da resistência à flexão está normalmente relacionado à redução da porosidade, ao aumento da densificação e ao desenvolvimento de ligações mais eficientes entre as partículas durante o processo de sinterização. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos, utilizando dispositivo de flexão em três pontos. Os corpos de prova foram posicionados sobre dois apoios paralelos, sendo aplicada uma carga crescente no centro da amostra até a ocorrência da ruptura. A Figura 28 apresenta o esquema da posição do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 28 - Esquema do ensaio de tensão de ruptura à flexão



Fonte: Autor (2026)

Durante o ensaio foram registrados os valores da carga máxima suportada por cada corpo de prova, permitindo o cálculo da tensão de ruptura à flexão. A resistência mecânica foi determinada através da Equação 11.

$$TRF = \frac{(3PL)}{(2bh^2)} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

TRF é a tensão de ruptura à flexão (MPa);

P é a carga máxima aplicada no momento da ruptura (N);

L é a distância entre os apoios (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

h é a altura ou espessura do corpo de prova (mm).

Para cada formulação e temperatura de queima foram ensaiados vários corpos de prova, sendo os resultados apresentados através dos valores médios obtidos. A análise desta propriedade permitiu avaliar o efeito da incorporação de talco e da temperatura de sinterização sobre o desempenho mecânico das massas cerâmicas desenvolvidas. A Figura 27 apresenta a máquina universal de ensaio mecânico, pertencente ao laboratório do Instituto Federal do Piauí (IFPI).

Figura 29 - Máquina universal de ensaio mecânico



Fonte: Autor (2026)

3.8.7 Análise Macroestrutural

A análise macroestrutural foi realizada com o objetivo de avaliar visualmente a qualidade dos corpos cerâmicos após a queima, identificando possíveis defeitos provenientes das etapas de conformação, secagem e tratamento térmico. Após o resfriamento dos corpos de prova, realizou-se inspeção visual e registro fotográfico das amostras queimadas nas diferentes temperaturas estudadas. Foram observados aspectos relacionados à uniformidade superficial, coloração, presença de trincas, fissuras, empenamentos, deformações dimensionais e demais defeitos macroscópicos que pudessem comprometer a qualidade tecnológica do material.

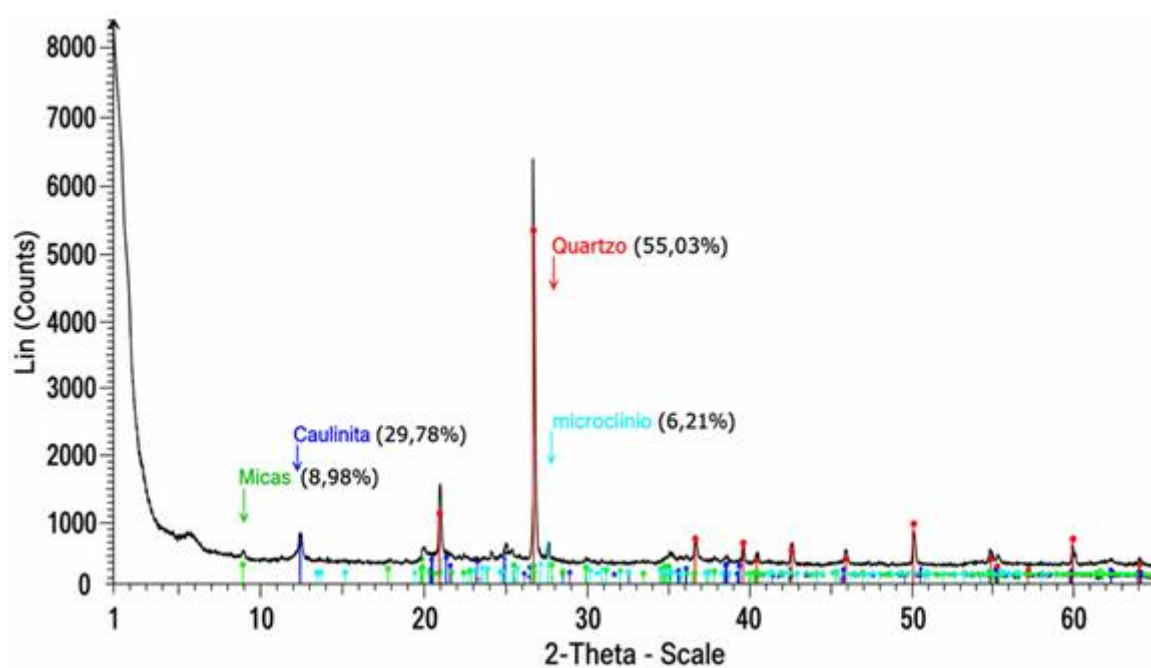
A observação da coloração dos corpos cerâmicos também permitiu avaliar qualitativamente os efeitos da temperatura de queima e da incorporação de talco sobre o aspecto final das peças produzidas. Os registros fotográficos obtidos foram utilizados para complementar a interpretação dos resultados dos ensaios tecnológicos, permitindo estabelecer correlações entre as características visuais observadas e as propriedades físicas e mecânicas determinadas experimentalmente. Dessa forma, a análise macroestrutural constituiu uma importante ferramenta de avaliação qualitativa do comportamento das formulações estudadas, contribuindo para a compreensão dos efeitos promovidos pela incorporação de talco nas massas de cerâmica vermelha.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

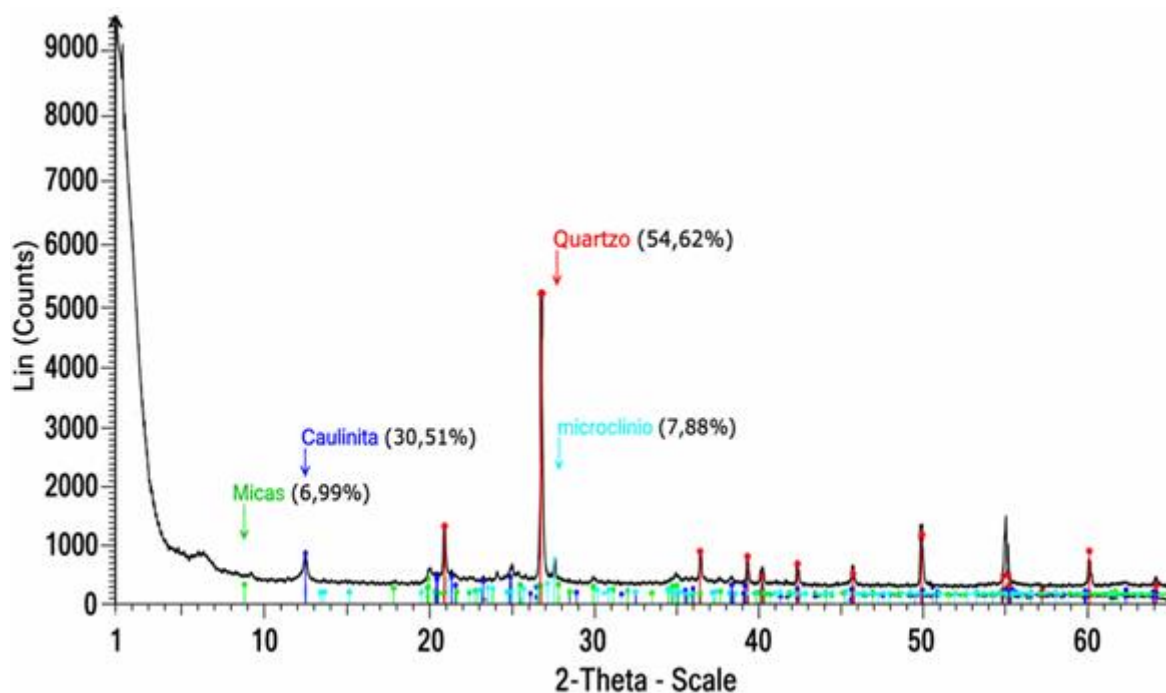
As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os difratogramas de raios X das matérias-primas utilizadas: argila 01 (AGR01), argila 02 (AGR02) e talco, respectivamente.

Figura 30 - Resultado do DRX argila 01 (ARG01)



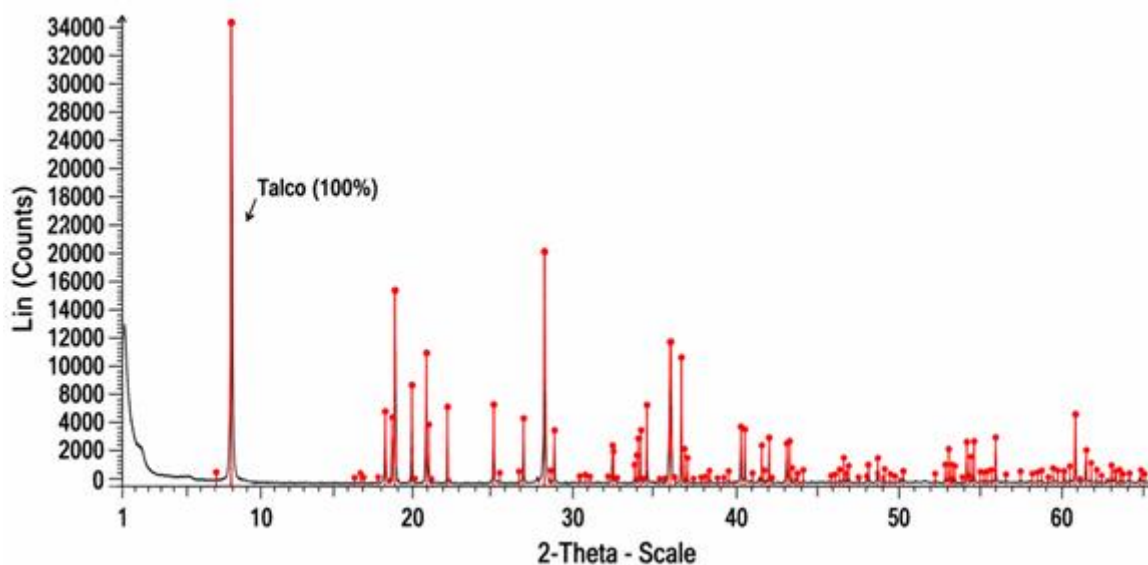
Fonte: Autor (2026)

Figura 31 - Resultado do DRX argila 02 (ARG02)



Fonte: Autor (2026)

Figura 32 - Resultado do DRX do Talco



Fonte: Autor (2026)

A análise dos difratogramas evidenciou que as argilas apresentam padrões mineralógicos semelhantes, indicando a presença das mesmas fases cristalinas predominantes, com destaque para o quartzo (SiO_2) e a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

A similaridade mineralógica observada entre as argilas pode estar associada à proximidade geográfica das jazidas, refletindo condições semelhantes de formação geológica. O quartzo foi identificado como a fase predominante, caracterizando-se como um componente não plástico e praticamente inerte durante a sinterização. Sua presença exerce importante papel no controle da plasticidade da massa, contribuindo para a estabilidade dimensional das peças, facilitando a secagem e auxiliando na eliminação de gases durante a queima. A caulinita, por sua vez, constitui o principal argilomineral responsável pela plasticidade necessária ao processo de conformação das massas cerâmicas. Esses comportamentos são amplamente descritos na literatura para matérias-primas destinadas à produção de cerâmica vermelha (SANTOS, 1989; VIEIRA; MONTEIRO; PINATTI, 2019).

No difratograma do talco, observa-se a presença de fases características desse mineral, com composição rica em silicatos de magnésio. O talco apresenta comportamento distinto em relação às argilas, atuando como material não plástico e contribuindo para modificações microestruturais durante a queima, o que também é discutido por Silva et al. (2021) ao avaliar adições minerais em massas cerâmicas.

4.2 ANÁLISE QUÍMICA POR FRX

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise química por fluorescência de raios X (FRX) das argilas e do talco.

Tabela 4 - Análise química por FRX

ARGILA 01 (AGR01)											
Componente	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	P.F
Resultado (%)	13,29	0,09	5,65	1,48	0,52	<0,05	0,35	0,07	72,27	1,20	5,06
ARGILA 02 (AGR02)											
Componente	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	P.F
Resultado (%)	13,19	0,09	5,73	1,52	0,52	<0,05	0,36	0,07	72,24	1,20	5,05
TALCO											
Componente	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	P.F
Resultado (%)	0,61	<0,05	0,63	<0,05	31,35	<0,05	0,09	0,07	62,23	<0,05	5,04

Fonte: Autor (2026)

As argilas analisadas apresentam composição química típica de materiais utilizados na cerâmica vermelha, com predominância de dióxido de silício (SiO_2), com valores próximos de 72%, seguido de óxido de alumínio (Al_2O_3), em torno de 13%. Esses óxidos estão associados à presença de quartzo e argilominerais, sendo fundamentais para o comportamento tecnológico da massa cerâmica, conforme também relatado por Silva et al. (2021).

Conforme Sousa Santos (1989) os percentuais de óxido de alumina são de 6,8% a 38,0% para uso na cerâmica vermelha, diante disso, os resultados obtidos estão de acordo com o recomendado. Tradicionalmente, as massas cerâmicas apresentam composição triaxial, constituída por argilas, quartzo e feldspatos, onde cada componente exerce funções específicas: as argilas conferem plasticidade, o quartzo atua como material inerte regulador da retração e os feldspatos funcionam como fundentes, promovendo a formação de fase líquida durante a queima. Silva et al. (2021) reforçam que essa composição influencia diretamente os mecanismos de sinterização e as propriedades finais dos produtos cerâmicos.

Os óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, representados principalmente por K_2O , Na_2O , CaO e MgO , embora presentes em menores quantidades, desempenham papel relevante durante a sinterização. Esses óxidos atuam como fundentes, reduzindo a temperatura de fusão do sistema e favorecendo a formação de fase líquida, o que contribui para a densificação da estrutura e para a melhoria das propriedades tecnológicas dos materiais cerâmicos (SANTOS, 1989; REED, 2012).

Em relação ao talco, observa-se elevada concentração de SiO_2 (62,23%) e MgO (31,35%), indicando seu potencial como material modificador da massa cerâmica. O talco apresentou elevados teores de SiO_2 e MgO , composição característica dos silicatos hidratados de magnésio. A incorporação desse mineral em massas cerâmicas pode modificar os mecanismos de sinterização, favorecendo a formação de fases ricas em magnésio e contribuindo para alterações na densificação, porosidade e resistência mecânica dos produtos finais. Esse comportamento tem sido amplamente relatado para sistemas cerâmicos contendo talco como aditivo mineral (SILVA et al., 2021; PICHER et al., 2023; YAHYA et al., 2023;).

A correlação entre os resultados de DRX e FRX confirma a compatibilidade entre a composição química e as fases mineralógicas identificadas. Os elevados teores de SiO_2 observados nas análises químicas estão diretamente associados à

presença de quartzo identificada nos difratogramas, enquanto os teores de Al_2O_3 confirmam a presença de argilominerais, principalmente a caulinita.

Os picos intensos de quartzo apresentados na análise de DRX, corroboram com alto percentual de óxido de silício apresentado nas análises FRX, esse componente mineralógico desempenha uma função muito importante, pois é um regulador de plasticidade da massa contribuindo para a conformação do bloco, facilita a etapa de secagem e a saída de gases durante a queima, além de garantir a estabilidade das peças, ajuda a viscosidade da fase líquida formada durante a queima e o coeficiente de expansão térmica (CROZETTA et al., 2016).

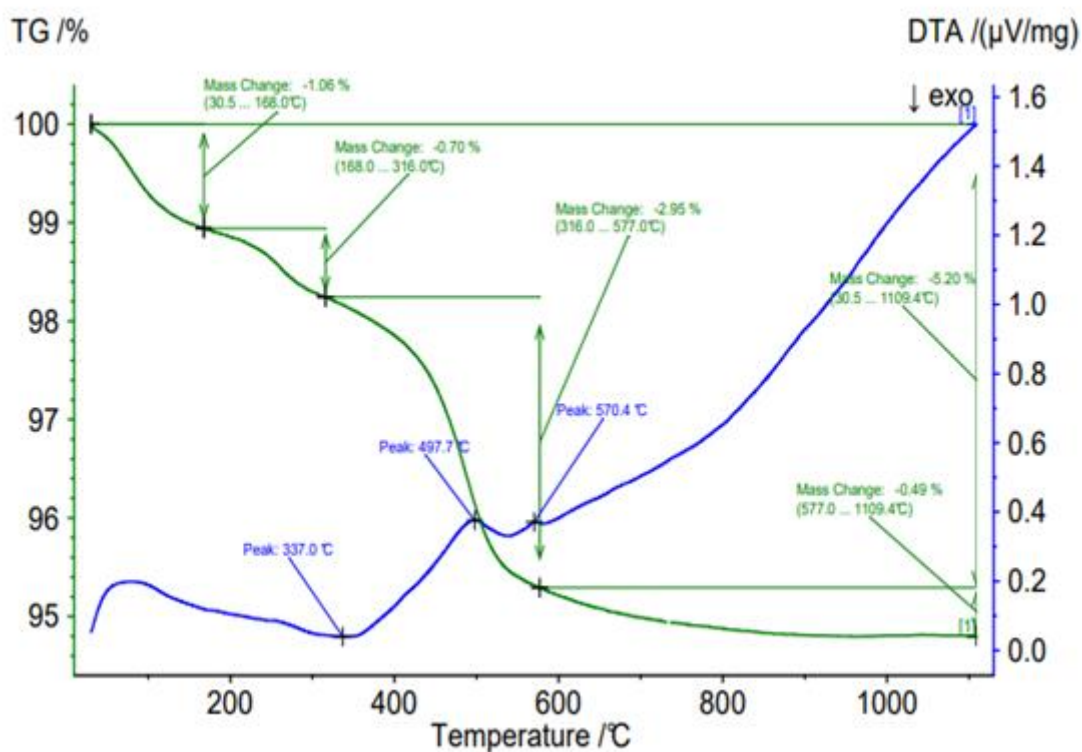
Essa relação entre composição química e mineralógica é fundamental para compreender o comportamento das massas cerâmicas, uma vez que influencia diretamente propriedades como plasticidade, retração, porosidade e resistência mecânica. Além disso, a presença de óxidos fundentes identificados por FRX está relacionada à formação de fase líquida durante a queima, contribuindo para a densificação da estrutura cerâmica. Esse comportamento está em concordância com Silva et al. (2021), que destacam a importância da interação entre composição química e fases mineralógicas no desenvolvimento das propriedades tecnológicas.

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TÉRMICA DIFERENCIAL (TG/DTA)

A análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA) foi empregada para avaliar as modificações de massa e os eventos térmicos associados ao aquecimento das matérias-primas até aproximadamente 1110 °C. Os resultados evidenciaram comportamentos distintos entre as argilas ARG01 e ARG02 e o talco, permitindo identificar diferentes etapas de perda de massa e eventos térmicos característicos.

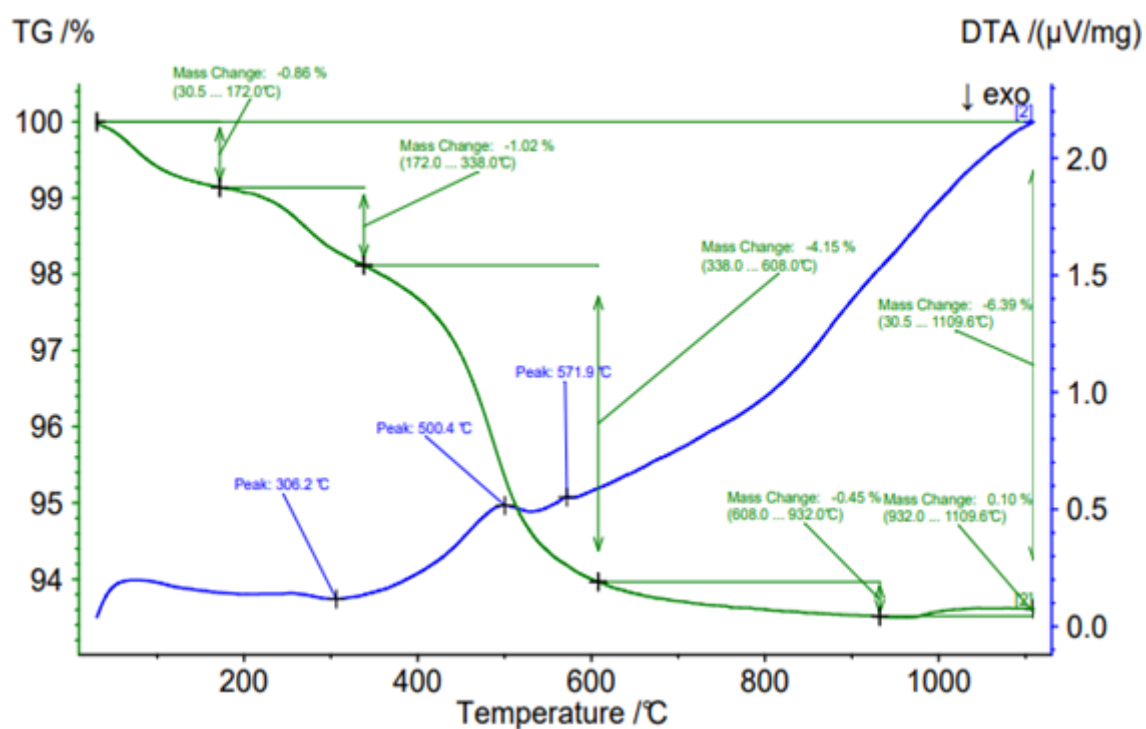
A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para a análise térmica de termogravimetria (TG) da ARG01. Observa-se uma redução da massa da amostra ao longo do intervalo de temperatura analisado, partindo de aproximadamente 100% e atingindo cerca de 94,80%, o que corresponde a uma perda total de massa de aproximadamente 5,20%. Para a ARG02, a Figura 34 apresenta os resultados obtidos na análise térmica de termogravimetria (TG). Observa-se uma redução da massa da amostra ao longo do intervalo de temperatura analisado, partindo de aproximadamente 100% e atingindo cerca de 93,61%, o que corresponde a uma perda total de massa de aproximadamente 6,39%.

Figura 33 - Resultado da análise TG/DTA da amostra ARG01



Fonte: Autor (2026)

Figura 34 - Resultado da análise TG/DTA da amostra ARG02

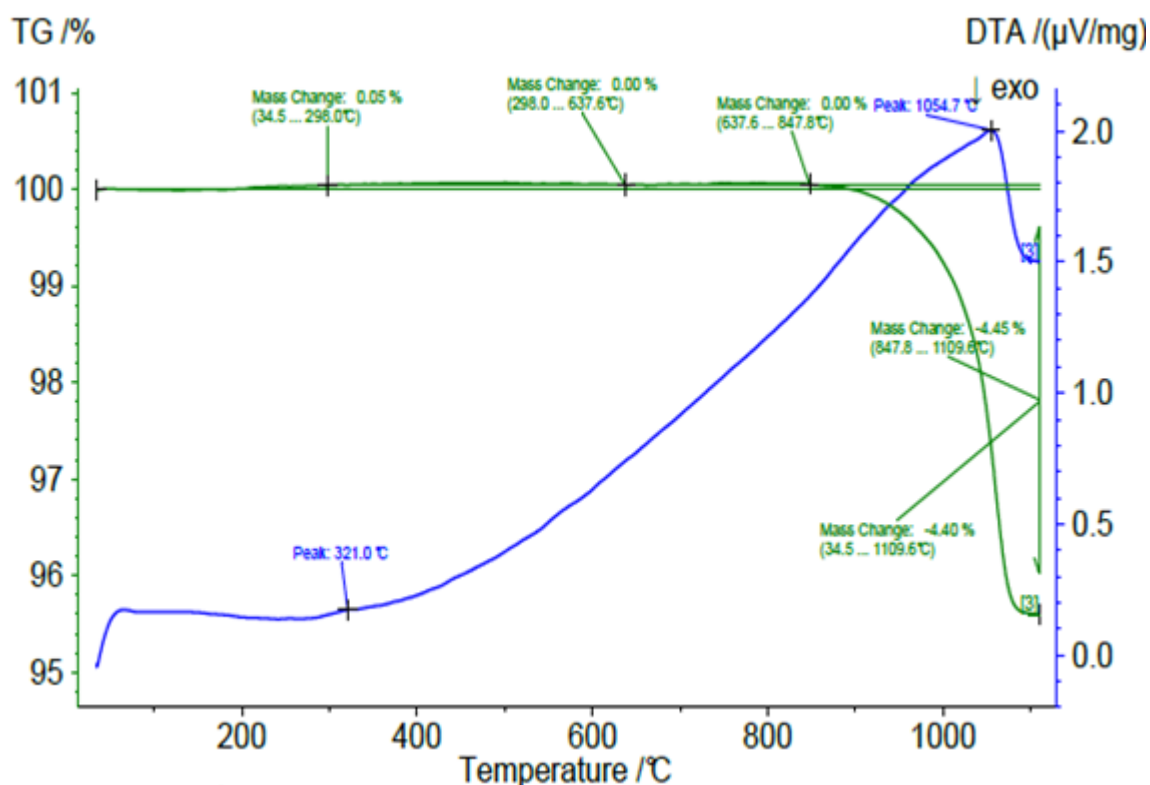


Fonte: Autor (2026)

A comparação entre as argilas demonstra que a ARG02 apresentou maior perda total de massa (6,39%) em relação à ARG01 (5,20%), indicando maior quantidade de componentes suscetíveis a transformações térmicas ou liberação de espécies voláteis durante o aquecimento. Em ambas as argilas, a região situada aproximadamente entre 450 e 650 °C é particularmente relevante, uma vez que corresponde à faixa associada à desidroxilação da caulinita e à formação de metacaulinita.

Para o talco (Figura 35), os resultados obtidos na análise térmica de termogravimetria (TG) indicam uma pequena variação de massa ao longo do intervalo de temperatura analisado. A amostra apresentou massa inicial próxima de 100%, atingindo aproximadamente 95,60% ao final da análise, o que corresponde a uma perda total de massa de aproximadamente 4,40%.

Figura 35 - Resultado da análise TG/DTA da amostra do Talco



Fonte: Autor (2026)

Os resultados indicam, portanto, que as argilas apresentam maior perda de massa acumulada durante o aquecimento do que o talco, especialmente nas faixas

associadas às transformações dos argilominerais. O talco, por sua vez, apresentou maior estabilidade térmica nas faixas intermediárias de temperatura, com a principal perda de massa concentrada em temperaturas superiores a aproximadamente 847 °C. Esse comportamento é relevante para a formulação das massas cerâmicas, pois demonstra que a incorporação do talco pode introduzir um componente com comportamento térmico distinto daquele apresentado pelas argilas.

4.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados do ensaio de granulometria por peneiramento, evidenciando a distribuição do tamanho das partículas das matérias-primas analisadas. As Tabelas 5 e 6 correspondem às granulometrias das amostras de argila utilizadas na composição da massa cerâmica, enquanto a Tabela 7 refere-se à granulometria do talco, realizada pela segunda vez com mais aberturas de peneiras, com o objetivo de complementar e confirmar a caracterização do material não plástico.

Tabela 5 - Granulometria da argila 01 (ARG01)

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
#8 – 2,380	36,0	3,61	3,61	96,38
#16 – 1,190	278,0	27,91	31,53	68,47
#30 – 0,590	242,0	24,30	55,82	44,17
#50 – 0,297	154,0	15,46	71,29	28,71
#100 – 0,149	130,0	13,05	84,34	15,66
#200 – 0,075	94,0	9,44	93,77	6,22
Fundo	62,0	6,22	100,00	0,00
	996	100		

Fonte: Autor (2026)

Tabela 6 - Granulometria da argila 02 (ARG02)

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
#8 – 2,380	20	2,01	2,01	97,99
#16 – 1,190	290	29,12	31,12	68,88
#30 – 0,590	230	23,09	54,22	45,78
#50 – 0,297	174	17,47	71,69	28,31
#100 – 0,149	106	10,64	82,33	17,67
#200 – 0,075	106	10,64	92,97	7,03
Fundo	70	7,03	100	0,00
	996	100		

Fonte: Autor (2026)

Tabela 7 - Resultados do segundo ensaio de granulometria do talco

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
#30 – 0,600	5,53	1,84	1,84	96,16
#50 – 0,300	103,12	34,37	36,22	63,78
#80 – 0,180	90,40	30,13	66,35	33,65
#100 – 0,150	7,65	2,55	68,90	31,10
#200 – 0,075	86,93	28,98	97,88	2,12
#270 – 0,053	3,1	1,03	98,91	1,09
#400 – 0,038	2,83	0,94	99,85	0,15
Fundo	0,44	0,15	100,00	0,00
	996	100		

Fonte: Autor (2026)

A análise dos resultados evidencia que as matérias-primas apresentam distribuição granulométrica heterogênea, com predominância de partículas de granulometria média, especialmente nas peneiras #50 (0,300 mm) e #80 (0,180 mm), característica que favorece o empacotamento das partículas na massa cerâmica. Observa-se também a presença significativa de frações finas, indicada pela retenção

na peneira #200 (0,075 mm), contribuindo para o preenchimento dos vazios entre partículas maiores e promovendo uma estrutura mais densa.

Comparativamente, as argilas apresentam distribuição mais ampla de tamanhos de partículas, enquanto o talco se destaca por apresentar granulometria mais fina e comportamento não plástico. Os resultados do segundo ensaio granulométrico do talco (Tabela 7), realizado com maior número de peneiras, confirmam essa característica, evidenciando maior detalhamento da distribuição e predominância de partículas finas. Essa condição reforça o papel do talco como material de preenchimento, atuando nos interstícios da matriz argilosa e contribuindo para a melhoria do empacotamento.

Esse efeito resulta em uma redução do volume de vazios e favorece os processos de densificação durante a sinterização, influenciando diretamente propriedades como porosidade, massa específica aparente e absorção de água. De acordo com Vieira, Monteiro e Pinatti (2019), a distribuição granulométrica exerce influência direta sobre propriedades tecnológicas importantes, como plasticidade, retração e resistência mecânica.

Dessa forma, os resultados indicam que as matérias-primas e o talco apresentam características granulométricas adequadas para aplicação em cerâmica vermelha, contribuindo para uma melhor compactação da massa e para o desenvolvimento de propriedades físicas e mecânicas satisfatórias após a queima.

4.5 LIMITES DE ATTERBERG E PLASTICIDADE

Os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg permitiram avaliar o comportamento plástico das argilas (ARG01 e ARG02), considerando os valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP). Os valores determinados experimentalmente estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Limite de liquidez

Amostra	Limite de Liquidez (LL)
ARG01	29,32%
ARG02	31,52%

Fonte: Autor (2026)

Tabela 9 - Limite de plasticidade

Amostra	Limite de Plasticidade (LP)
ARG01	14,54%
ARG02	22,41%

Fonte: Autor (2026)

Tabela 10 - Índice de plasticidade

Amostra	Índice de Plasticidade (IP)
ARG01	14,78%
ARG02	9,11%

Fonte: Autor (2026)

Para a argila 01 (ARG01), foi obtido Limite de Liquidez de 29,32% e Limite de Plasticidade de 14,54%, resultando em um Índice de Plasticidade de 14,78%. Para a argila 02 (ARG02), os valores determinados foram de 31,52% para o LL, 22,41% para o LP e 9,11% para o IP. Os valores de IP foram obtidos pela diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, conforme a relação $IP = LL - LP$.

Comparativamente, a ARG02 apresentou maior LL e LP que a ARG01, indicando que essa matéria-prima necessita de maior teor de água para atingir tanto a transição para o estado líquido quanto o limite inferior de comportamento plástico. Entretanto, a ARG01 apresentou maior Índice de Plasticidade (14,78%), enquanto a ARG02 apresentou IP de 9,11%. Essa diferença demonstra que a faixa de umidade em que a ARG01 apresenta comportamento plástico é mais ampla que a observada para a ARG02.

De acordo com a classificação adotada no trabalho, baseada em Gouveia (2008), materiais com IP entre 7 e 15% são classificados como medianamente plásticos, enquanto valores superiores a 15% correspondem a materiais altamente plásticos. Assim, tanto a ARG01 quanto a ARG02 podem ser classificadas como medianamente plásticas, embora a ARG01 apresente maior plasticidade relativa entre as duas matérias-primas.

A maior plasticidade apresentada pela ARG01 pode estar relacionada à sua composição mineralógica e à presença de argilominerais, especialmente a caulinita, identificada na caracterização mineralógica das matérias-primas. A plasticidade das

argilas está diretamente relacionada à capacidade de retenção de água e à presença e características da fração argilosa. Nesse sentido, os valores obtidos indicam que ambas as matérias-primas apresentam comportamento adequado para participação na formulação de massas cerâmicas, sendo necessário, entretanto, o controle da proporção entre os componentes para garantir condições apropriadas de conformação.

Diante dos resultados obtidos, pode-se dizer que das duas argilas estudadas, apresentaram valores próximos ao intervalo recomendado, que é conforme Santos (1989), os percentuais para o índice de plasticidade, encontram-se entre 10 a 35% para a utilização da argila na fabricação de tijolos cerâmicos

4.6 ENSAIO TEOR RESIDUAL

A determinação do teor residual foi realizada com o objetivo de avaliar a quantidade de material retido após o procedimento de peneiramento empregado na caracterização das matérias-primas. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela correspondente, sendo expressos em gramas de material residual.

A ARG01 apresentou massa residual de 26,10 g, enquanto a ARG02 apresentou 17,37 g (Tabela 11). Dessa forma, a ARG01 apresentou quantidade de material residual superior à ARG02, correspondendo a uma diferença absoluta de 8,73 g entre as duas matérias-primas.

Tabela 11 - Valores de teor de resíduos das argilas

Amostra	Teor residual (g)
ARG01	26,10
ARG02	17,37

Fonte: Autor (2026)

A maior quantidade de material residual observada para a ARG01 indica maior presença de partículas que permaneceram retidas durante o procedimento experimental. Conforme a discussão apresentada no trabalho, a fração residual está relacionada principalmente à presença de materiais de caráter não plástico, especialmente componentes de natureza arenosa. Essa interpretação é coerente com

a caracterização das matérias-primas, na qual foi identificada a presença de fases minerais como o quartzo.

A diferença entre os valores obtidos para as duas argilas evidencia que a distribuição granulométrica e a proporção de frações mais grosseiras constituem características importantes para o comportamento das matérias-primas durante o processamento cerâmico. Uma maior quantidade de material residual pode contribuir para a redução da plasticidade da massa e, simultaneamente, favorecer o empacotamento das partículas, dependendo da distribuição granulométrica e da natureza mineralógica da fração retida.

4.7 UMIDADE BASE ÚMIDA E UMIDADE BASE SECA

Os resultados de umidade em base úmida e base seca estão apresentados na Tabela 12. Para a umidade em base úmida, os valores variaram entre 9,17% e 11,50%, enquanto para a umidade em base seca os resultados oscilaram entre 10,08% e 12,99%.

Tabela 12 - Resultados da umidade base úmida e base seca (%)

Umidade base Úmida				
Formulações	800°C	850°C	900°C	950°C
0%	10,98	11,39	11,50	10,92
5%	10,17	10,95	10,98	10,14
10%	9,85	10,18	9,83	9,84
15%	9,17	10,15	9,19	9,18
Umidade base Seca				
	800°C	850°C	900°C	950°C
0%	12,33	12,86	12,99	12,26
5%	11,32	12,40	12,33	11,29
10%	10,93	11,33	10,91	10,91
15%	10,08	11,29	10,12	10,11

Fonte: Autor (2026)

A formulação sem adição de talco (0%) apresentou os maiores valores de umidade em ambas as bases, com destaque para a temperatura de 900 °C, na qual

foram obtidos 11,50% de umidade em base úmida e 12,99% em base seca. Em contrapartida, os menores valores foram observados na formulação contendo 15% de talco, registrando 9,17% de umidade em base úmida a 800 °C e 10,08% em base seca na mesma temperatura.

Verificou-se uma tendência de redução da umidade com o aumento do teor de talco incorporado à massa cerâmica. As formulações com 10% e 15% de talco apresentaram os menores valores de umidade, enquanto a formulação de referência (0% de talco) exibiu os maiores resultados em todas as temperaturas avaliadas.

A umidade é um parâmetro importante no processamento cerâmico, pois influencia diretamente a plasticidade da massa, a conformação das peças e o comportamento durante a secagem. Teores adequados de umidade favorecem a compactação das partículas e minimizam a ocorrência de defeitos, como trincas, fissuras e deformações.

A incorporação de talco na massa cerâmica tende a reduzir a retenção de água, pois esse mineral apresenta baixa plasticidade e menor afinidade com a água quando comparado às argilas. Dessa forma, sua presença contribui para melhorar o controle das etapas de secagem e processamento, reduzindo a ocorrência de defeitos tecnológicos, como retração excessiva, fissuração e empenamento, que podem surgir durante a secagem ou a queima das peças cerâmicas (SANTOS, 1989; REED, 1995).

A redução dos teores de umidade com o aumento da incorporação de talco está relacionada à menor afinidade desse material com a água, uma vez que apresenta caráter não plástico. Diferentemente dos argilominerais, que possuem elevada capacidade de adsorção de água devido à sua estrutura lamelar, o talco contribui para a diminuição da retenção hídrica da massa cerâmica. Esse comportamento é consistente com Silva et al. (2021), que destacam que a adição de materiais minerais não plásticos pode reduzir a umidade de processamento, influenciando diretamente a trabalhabilidade e a etapa de secagem. Além disso, Callister e Rethwisch (2016) ressaltam que a presença de fases não plásticas reduz a plasticidade e a capacidade de retenção de água, contribuindo para maior estabilidade dimensional durante o processamento.

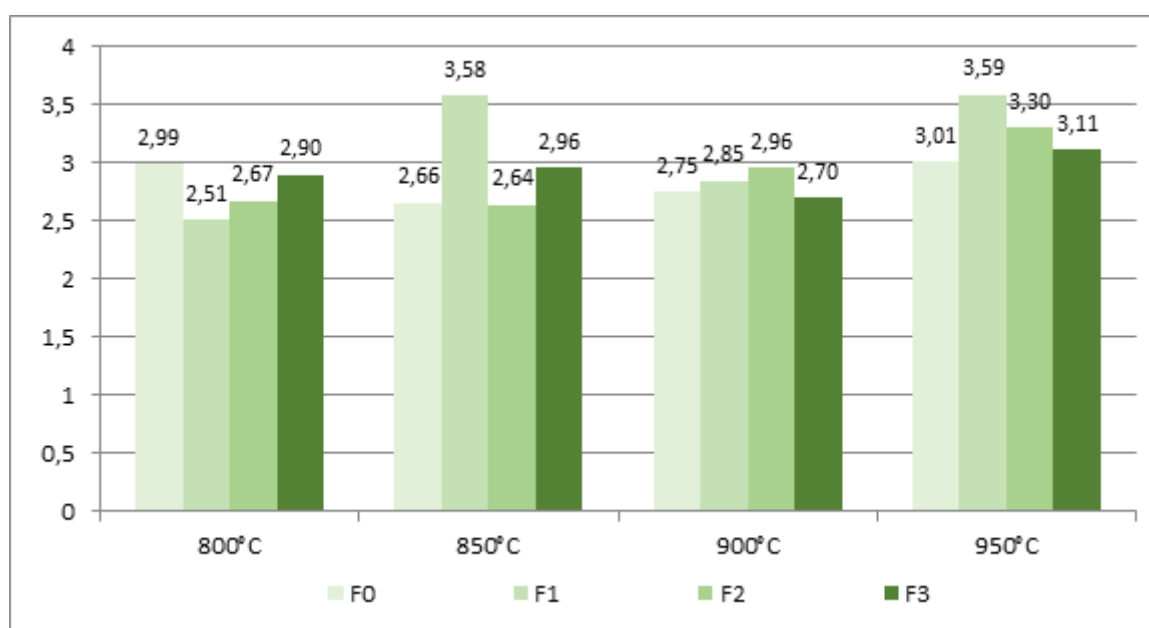
De acordo com estudos sobre tecnologia cerâmica, a adição de talco, silicato de magnésio hidratado classificado como material não plástico, pode contribuir para reduzir a plasticidade da massa e diminuir sua capacidade de retenção de água, uma vez que esse mineral apresenta menor afinidade com a água em comparação aos

minerais argilosos. Dessa forma, a presença de talco na composição da massa cerâmica pode resultar em menores teores de umidade durante o processamento, influenciando diretamente propriedades tecnológicas importantes, como trabalhabilidade, retração e estabilidade dimensional (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

4.8 RETRAÇÃO LINEAR TOTAL (RLT)

A Figura 36 apresenta os resultados da retração linear total das formulações contendo diferentes teores de talco (0%, 5%, 10% e 15%) nas temperaturas de 800, 850, 900 e 950 °C. Os valores obtidos variaram entre 2,51% e 3,59%, evidenciando baixa variação dimensional entre as formulações estudadas.

Figura 36 - Resultados da Retração Linear Total (%)



Fonte: Autor (2026)

Observa-se que os maiores valores de retração foram obtidos para a formulação contendo 5% de talco nas temperaturas de 850 °C e 950 °C, ambas com valor de 3,58% e 3,59% respectivamente, enquanto a menor retração foi registrada para a mesma formulação (F1) na temperatura de 800 °C (2,51%). Os resultados evidenciam a tendência de aumento da retração com a elevação da temperatura de

queima, comportamento associado ao avanço do processo de sinterização e à consequente redução dos vazios presentes na estrutura cerâmica.

Segundo Jung et al. (2012), o aumento da temperatura promove maior aproximação entre as partículas constituintes da massa cerâmica, ocasionando redução dos poros e aumento da densificação do material. Como consequência, ocorre diminuição das dimensões dos corpos de prova e aumento da retração linear. Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de talco não provocou alterações significativas na estabilidade dimensional das amostras, mantendo os valores dentro da faixa aceitável para materiais destinados à produção de cerâmica vermelha.

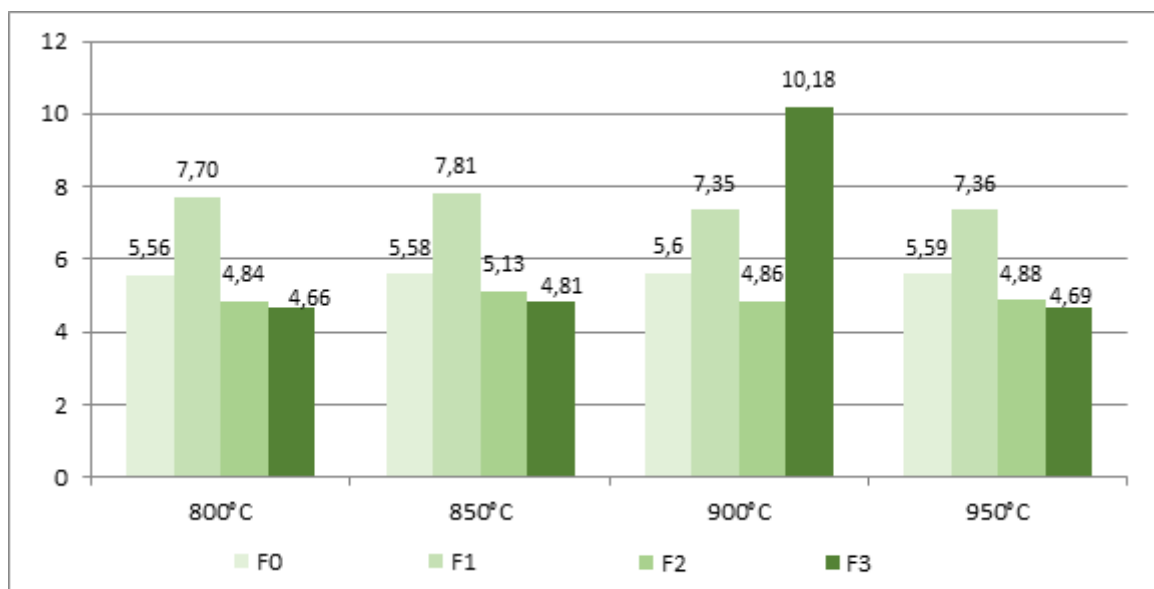
Os valores recomendados de retração linear de secagem para materiais de cerâmica vermelha geralmente devem permanecer abaixo de aproximadamente 8%, pois retrações superiores podem provocar tensões internas capazes de gerar deformações e fissuras durante a secagem das peças cerâmicas. Dessa forma, o controle desse parâmetro é essencial para garantir a estabilidade dimensional e a integridade estrutural dos produtos cerâmicos durante o processamento. Estudos sobre o comportamento de massas cerâmicas indicam que valores de retração linear de secagens inferiores a esse limite são considerados adequados para a fabricação de blocos e outros produtos de cerâmica vermelha (HOLANDA, 2002; SILVA, 2021).

De acordo com Souza Santos (1989), os resultados obtidos situam-se dentro de uma faixa adequada para a produção industrial de cerâmica vermelha, cujo limite máximo de retração é de 12%. Assim, pode-se afirmar que os resultados encontrados nesta pesquisa estão em conformidade com os parâmetros indicados para a fabricação de artigos da indústria de cerâmica vermelha.

4.9 PERDA AO FOGO

Os resultados da perda ao fogo estão apresentados na Figura 37, com valores variando entre aproximadamente 4,66% e 10,18%, em função da formulação e da temperatura de sinterização.

Figura 37 - Resultados de perda ao fogo (%)



Fonte: Autor (2026)

De modo geral, observou-se que a formulação contendo 5% de talco apresentou os maiores valores de perda ao fogo quando comparada às demais composições. Esse comportamento pode estar associado à eliminação de água estrutural, à decomposição de compostos voláteis e às transformações mineralógicas que ocorrem durante o aquecimento.

A perda ao fogo está diretamente relacionada à desidroxilação dos argilominerais e à oxidação da matéria orgânica presente na massa cerâmica, conforme descrito por Souza (1975). Durante esse processo, ocorre a liberação de água quimicamente combinada, especialmente da caulinita, além da queima de matéria orgânica, o que contribui para a redução de massa das amostras.

As argilas utilizadas apresentaram valores de perda ao fogo próximos ao limite superior do intervalo típico para argilas cauliníticas (6,0% a 15,7%). Esse comportamento está associado principalmente à desidroxilação dos argilominerais e à oxidação de matéria orgânica, podendo contribuir para o aumento da porosidade nas peças cerâmicas após o tratamento térmico (SOUZA, 1975).

Durante a queima, também ocorrem reações químicas complexas entre os constituintes da massa cerâmica, levando à formação de novos compostos que influenciam diretamente as propriedades finais do material, como resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica, conforme discutido por Dias (2011). Apesar disso, os valores obtidos neste estudo permaneceram dentro das faixas normalmente observadas para massas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha.

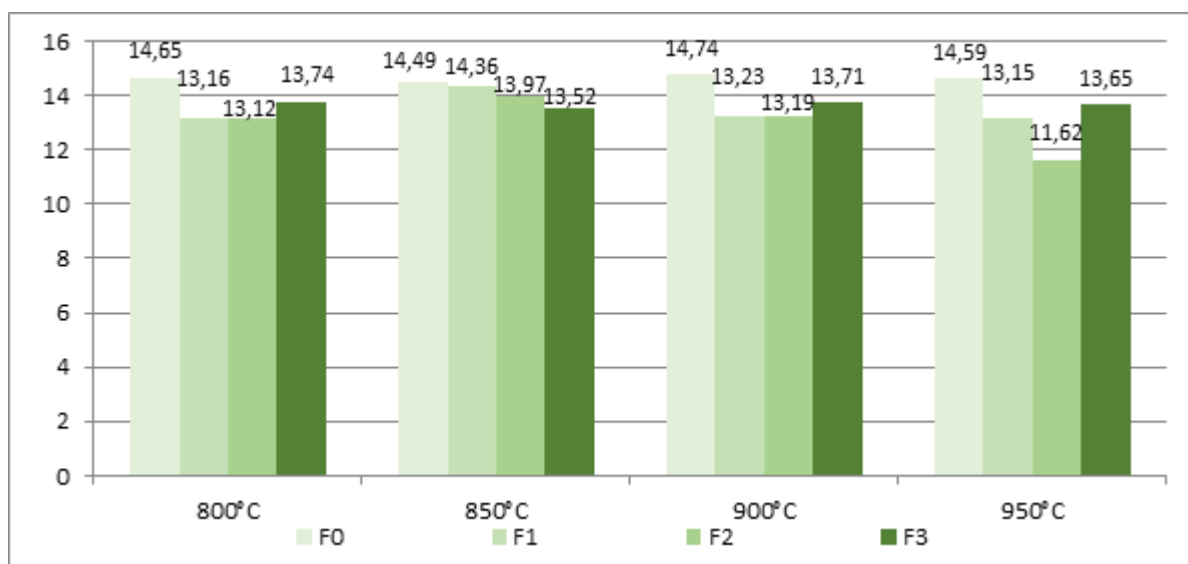
Na temperatura de 950°C, todas as formulações apresentaram resultados compatíveis com os valores recomendados na literatura. De acordo com Fernandes et al. (1998), a perda ao fogo típica para argilas empregadas em cerâmica vermelha, após queima em forno túnel, situa-se em torno de 4,3%.

De maneira geral, a perda ao fogo, embora associada à formação de poros devido à eliminação de voláteis, também desempenha um papel importante na estabilização dimensional das peças e na consolidação da microestrutura cerâmica. Assim, a remoção controlada desses constituintes durante a queima contribui para a obtenção de materiais com melhor desempenho tecnológico.

4.10 ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA)

A Figura 38 apresenta os resultados de absorção de água das formulações estudadas. Os valores variaram entre 11,62% e 14,74%, permanecendo dentro da faixa estabelecida pela ABNT NBR 15270-1 (2017) para blocos cerâmicos, que recomenda valores entre 8% e 22%.

Figura 38 - Resultados de Absorção de Água (%)



Fonte: Autor (2026)

Observou-se que a formulação contendo 10% de talco apresentou os menores valores de absorção de água nas temperaturas mais elevadas, refletindo a redução da porosidade e o aumento da densificação da estrutura cerâmica. Por outro lado, a

formulação sem adição de talco apresentou os maiores valores de absorção, atingindo 14,74% a 900 °C.

A absorção de água está diretamente relacionada à quantidade de poros abertos presentes na peça. Dessa forma, a redução da porosidade observada para as formulações com 10% de talco resultou também em menores índices de absorção. Esse comportamento confirma a eficiência do processo de sinterização na consolidação da estrutura cerâmica e evidencia o potencial da adição de talco para melhorar as propriedades tecnológicas do material. De modo geral, todas as formulações apresentaram desempenho satisfatório para aplicação em cerâmica vermelha, atendendo aos requisitos normativos e demonstrando compatibilidade tecnológica com o processo produtivo.

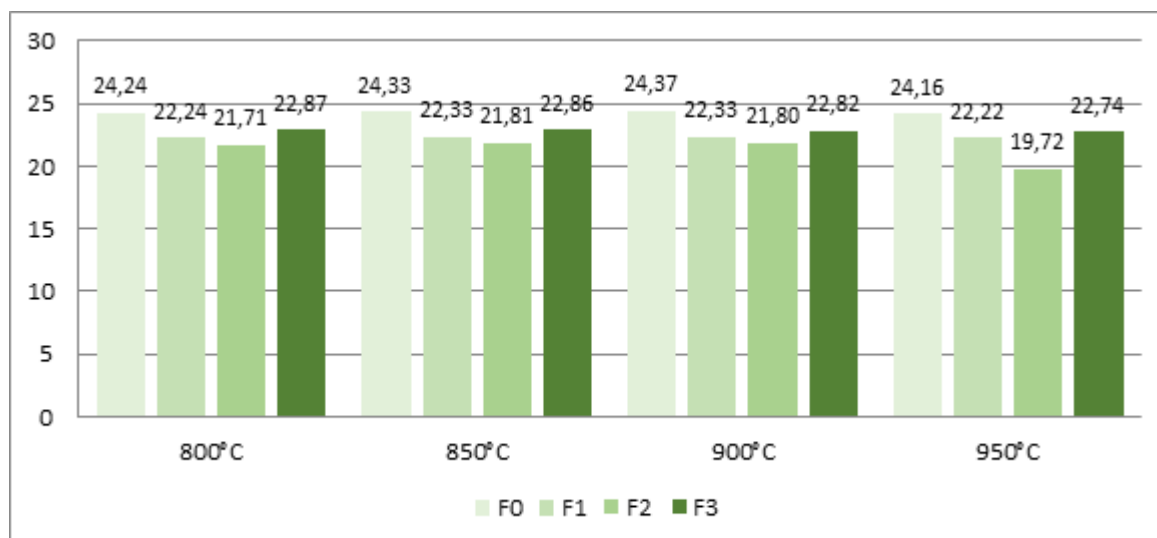
A redução da absorção de água observada nas formulações com maior teor de talco está diretamente associada à diminuição da porosidade aberta e ao aumento da densificação da estrutura cerâmica. Como a absorção de água está relacionada à quantidade e à conectividade dos poros, materiais com menor porosidade tendem a apresentar melhor desempenho nesse parâmetro.

Esse comportamento está em conformidade com Silva et al. (2021), que ressaltam que a incorporação de aditivos minerais pode reduzir a absorção de água ao promover maior compactação da matriz cerâmica. Resultados semelhantes foram observados por Valášková et al. (2021), que verificaram que a adição de materiais não plásticos contribui para a redução da porosidade e, conseqüentemente, da absorção de água em cerâmicas argilosas.

4.11 POROSIDADE APARENTE (PA)

Os resultados da porosidade aparente são apresentados na Figura 39. Os valores obtidos variaram entre 19,72% e 24,37%, em função da formulação e da temperatura de sinterização.

Figura 39 - Resultados da Porosidade Aparente (%)



Fonte: Autor (2026)

De maneira geral, verificou-se uma redução da porosidade com o aumento da temperatura de queima, comportamento típico de materiais cerâmicos submetidos à sinterização. Segundo Pinheiro (2010), o aumento da temperatura favorece o crescimento dos pescoços interpartículas e promove o fechamento progressivo dos poros abertos, reduzindo a porosidade da peça cerâmica.

A formulação sem adição de talco (F0) apresentou os maiores valores de porosidade, atingindo 24,37% a 900 °C. Esse comportamento pode estar relacionado à presença predominante de materiais argilosos na composição da massa. As argilas possuem elevada plasticidade e alta capacidade de retenção de água, devido à sua estrutura lamelar e grande área superficial específica. Durante as etapas de secagem e queima, a evaporação da água e a eliminação de substâncias voláteis favorecem a formação de vazios na matriz cerâmica, contribuindo para o aumento da porosidade final (SANTOS, 1989; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Por outro lado, todas as formulações contendo talco apresentaram redução da porosidade aparente em relação à F0, evidenciando o efeito desse aditivo na microestrutura do material. A formulação com 10% de talco (F2) destacou-se por apresentar os menores valores de porosidade em todas as temperaturas analisadas, atingindo 19,72% a 950 °C, valor próximo ao limite recomendado pela literatura para blocos cerâmicos.

De acordo com (SANTOS, 1989), os valores recomendados de porosidade aparente são em torno de 18% para telhas e 20% para blocos cerâmicos. Nesse

contexto, os resultados obtidos indicam que a adição de talco, especialmente em teores moderados, contribui para adequação do material às exigências normativas.

A redução da porosidade observada com a incorporação de talco está diretamente associada à melhoria do empacotamento das partículas e à intensificação dos mecanismos de sinterização. Materiais não plásticos, como o talco, atuam preenchendo os vazios entre partículas argilosas, promovendo uma estrutura mais compacta após a queima. Esse comportamento está em concordância com Silva et al. (2021), que destacam que a adição de materiais minerais pode favorecer a densificação da matriz cerâmica, reduzindo a porosidade e melhorando o desempenho tecnológico.

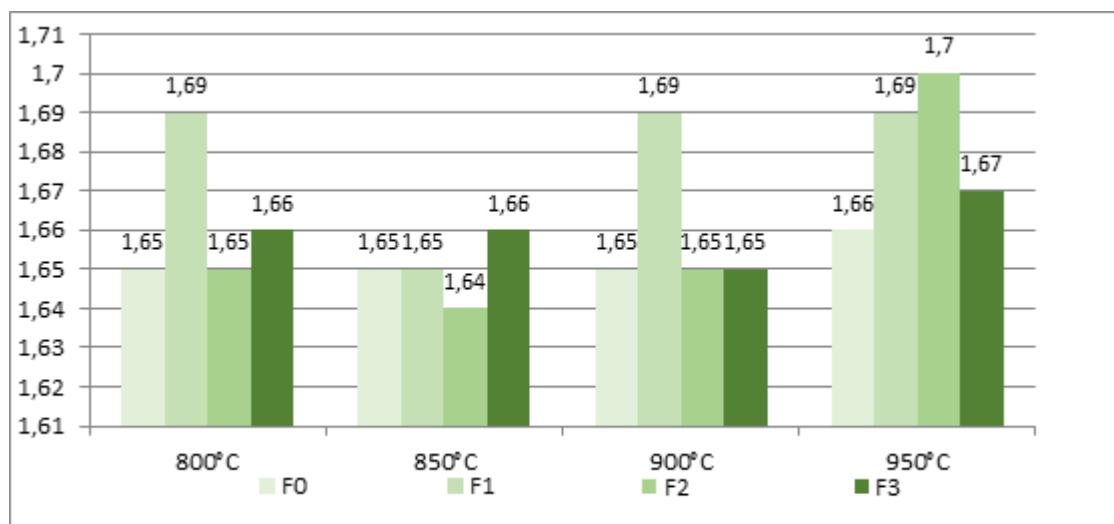
Resultados semelhantes também foram reportados por Picher et al. (2023) e Yahya et al. (2023), que observaram que a incorporação de talco em massas cerâmicas contribui para a formação de uma microestrutura mais densa, com menor volume de poros abertos. Segundo esses autores, a presença de silicatos de magnésio favorece reações durante a sinterização que resultam na redução da porosidade e no aumento da integridade estrutural.

Entretanto, observa-se que a formulação com 15% de talco (F3) apresentou um leve aumento na porosidade em relação à F2. Esse comportamento pode estar associado ao excesso de material não plástico, o que pode reduzir a coesão da massa e dificultar a compactação durante a conformação. Como consequência, ocorre menor eficiência no empacotamento das partículas, favorecendo a permanência de vazios após a queima (DONDI; RAYMUNDO; ZANELLI, 2023).

Os resultados demonstram que a incorporação de talco, em teores adequados, contribui significativamente para a densificação da estrutura cerâmica, reduzindo a quantidade de vazios internos. A diminuição da porosidade é desejável, pois está diretamente associada à melhoria das propriedades mecânicas, à redução da absorção de água e ao aumento da durabilidade do material cerâmico.

4.12 MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEA)

A Figura 40 apresenta os resultados da massa específica aparente das formulações estudadas. Os valores variaram entre 1,64 g/cm³ e 1,70 g/cm³.

Figura 40 - Resultados da Massa Específica Aparente (g/cm³)

Fonte: Autor (2026)

Verifica-se que os maiores valores foram observados para as formulações contendo 5% e 10% de talco, especialmente nas temperaturas de 900 °C e 950 °C. Esse comportamento está relacionado ao aumento da densificação promovido pela sinterização, que reduz os vazios internos e aumenta a compactação da estrutura cerâmica.

O aumento da massa específica aparente nas formulações contendo talco está diretamente relacionado à redução da porosidade e ao aumento da densificação da estrutura cerâmica. Esse comportamento confirma a relação inversa entre porosidade e densidade, amplamente descrita na literatura (REED, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

De acordo com Silva et al. (2021), a incorporação de aditivos minerais pode promover rearranjos estruturais durante a queima, favorecendo a formação de uma matriz mais compacta. Estudos recentes, como os de Luz et al. (2020), também demonstram que materiais não plásticos contribuem para o aumento da densidade aparente, especialmente quando utilizados em teores moderados, o que está em concordância com os resultados obtidos neste trabalho.

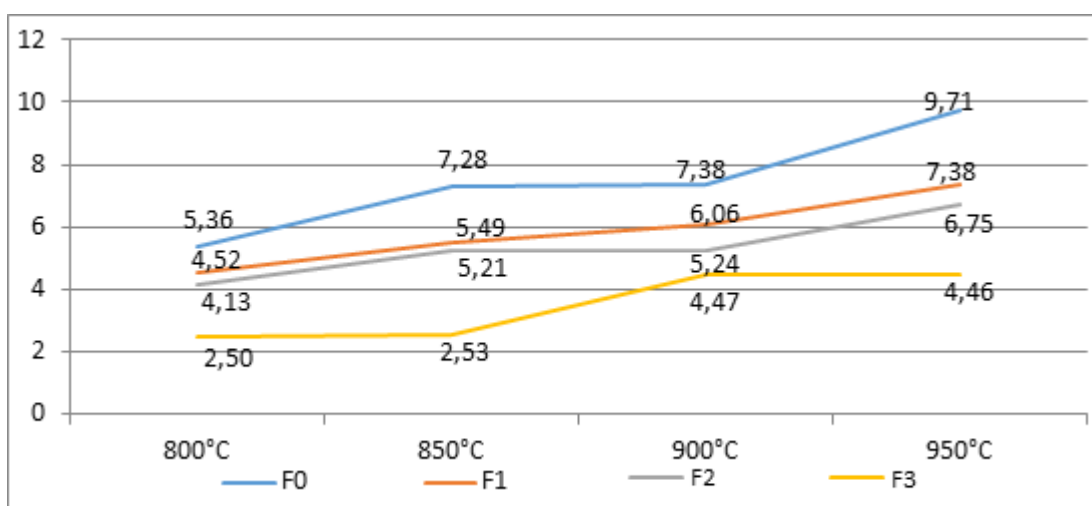
Conforme Santos (1989), valores entre 1,3 e 2,1 g/cm³ são considerados adequados para materiais destinados à produção de cerâmica vermelha. Dessa forma, todas as formulações avaliadas encontram-se dentro da faixa recomendada, demonstrando viabilidade para aplicação industrial. Além disso, os resultados

corroboram os dados de porosidade aparente, evidenciando relação inversa entre porosidade e massa específica aparente.

4.13 TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (TRF)

Os resultados da tensão de ruptura à flexão a três pontos estão apresentados na Figura 41. Os valores obtidos variaram aproximadamente entre 2,50 MPa e 9,71 MPa, em função da formulação e da temperatura de queima.

Figura 41 - Resultados da tensão de ruptura à flexão a três pontos



Fonte: Autor (2026)

De maneira geral, observa-se que todas as formulações apresentaram aumento da resistência mecânica com a elevação da temperatura de queima, comportamento típico de materiais cerâmicos. Esse incremento está diretamente associado à intensificação dos mecanismos de sinterização, que promovem maior densificação da matriz e aumento da coesão entre as partículas.

A formulação de referência (F0) apresentou os maiores valores de resistência mecânica em todas as temperaturas analisadas, atingindo 9,71 MPa a 950 °C. A incorporação de talco promoveu redução gradual da resistência mecânica em comparação à formulação de referência, porém os valores permaneceram adequados para aplicação em cerâmica vermelha. A formulação F1 alcançou 7,38 MPa a 950 °C, enquanto F2 atingiu 6,75 MPa e F3 apresentou o menor desempenho, com valor máximo de 4,46 MPa.

O aumento da temperatura de queima favorece os mecanismos de sinterização, promovendo o crescimento dos pescoços interpartículas e a consequente redução da porosidade aberta, o que resulta em melhoria da resistência mecânica das peças cerâmicas. Além disso, em temperaturas mais elevadas, ocorre a formação de fase líquida, que atua no preenchimento parcial dos poros e intensifica a densificação da matriz cerâmica após o resfriamento. Esse processo contribui para o desenvolvimento de uma microestrutura mais compacta e coesa. Entretanto, a incorporação de talco em teores mais elevados pode reduzir a resistência mecânica, uma vez que o excesso de material não plástico tende a prejudicar o empacotamento das partículas e limitar a eficiência da sinterização, resultando em maior porosidade residual e, consequentemente, menor desempenho mecânico (REED, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2016; PICHER et al., 2023; SANTOS et al., 2021).

A incorporação de talco influenciou negativamente a resistência mecânica, principalmente em maiores teores. Esse comportamento pode ser atribuído ao caráter não plástico do talco, que pode dificultar o empacotamento eficiente das partículas e reduzir a coesão da massa durante a conformação. Além disso, teores elevados desse material podem comprometer a densificação durante a sinterização, favorecendo a permanência de poros residuais e, consequentemente, reduzindo a resistência mecânica (PICHER et al., 2023; VALÁŠKOVÁ et al., 2021).

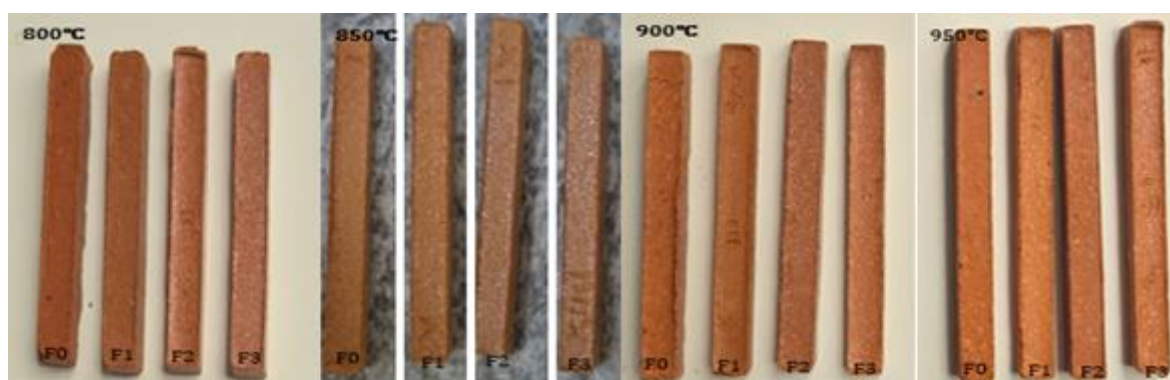
De acordo com Souza Santos (1989), valores mínimos em torno de 5,5 MPa são recomendados para aplicação em blocos cerâmicos. Nesse contexto, observa-se que as formulações F0, F1 e F3, especialmente nas temperaturas mais elevadas (≥ 850 °C), atenderam a esse requisito. Além disso, conforme a ABNT NBR 15270-1 (2023), que estabelece valores mínimos entre 1,5 MPa e 3,0 Mpa, todas as formulações apresentaram desempenho adequado para utilização na produção de cerâmica vermelha.

De modo geral, os resultados indicam que o aumento da temperatura de queima exerce influência positiva significativa na resistência mecânica das peças cerâmicas. No entanto, a adição de talco deve ser cuidadosamente controlada, uma vez que, embora contribua para a modificação microestrutural, teores elevados podem comprometer o desempenho mecânico final do material.

4.14 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A Figura 42 apresenta os resultados obtidos por meio da análise macroestrutural dos corpos de prova queimados para as formulações F0, F1, F2 e F3.

Figura 42 - Resultado da análise macroestrutural para formulações



Fonte: Autor (2026)

Os teores de óxido de ferro (Fe_2O_3), variando entre aproximadamente 5% e 6%, indicam que as argilas possuem potencial para desenvolver coloração avermelhada após o processo de queima, característica típica de materiais empregados na cerâmica vermelha. Esses valores estão em concordância com os resultados obtidos por FRX, que variaram entre 5,6% e 5,7%. A coloração observada está associada à formação de hematita (Fe_2O_3) durante o tratamento térmico, sendo que sua intensidade está diretamente relacionada à concentração desse óxido na composição da matéria-prima (SOUZA SANTOS, 1989).

De modo geral, observa-se que todas as formulações apresentaram coloração avermelhada uniforme, confirmando a influência do óxido de ferro presente nas matérias-primas. Essa característica é típica de produtos da indústria de cerâmica vermelha. Além disso, os corpos de prova apresentaram aspecto homogêneo em termos de cor e textura, não sendo observadas deformações significativas ou defeitos físicos aparentes, como fissuras ou trincas.

Durante o processo de queima, o ferro presente nas argilas sofre oxidação, formando predominantemente hematita, mineral responsável pelas tonalidades que variam do vermelho ao marrom-avermelhado nos produtos cerâmicos. Assim, quanto maior o teor de Fe_2O_3 na composição da argila, maior tende a ser a intensidade da

coloração final do material. Esse comportamento é amplamente relatado na literatura, sendo confirmado por Vieira, Monteiro e Pinatti (2019) e Rodrigues e Holanda (2020).

5 CONCLUSÕES

A caracterização das matérias-primas e a avaliação das propriedades tecnológicas das massas cerâmicas permitiram verificar a influência da incorporação de talco nas formulações destinadas à produção de cerâmica vermelha. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- As argilas ARG01 e ARG02 apresentaram composição química e fases mineralógicas semelhantes, com predominância de SiO_2 , quartzo e caulinita, diferenciando-se principalmente por pequenas variações nos teores dos óxidos determinados por FRX.
- O talco apresentou composição química característica de um silicato de magnésio, com elevados teores de SiO_2 (62,23%) e MgO (31,35%), além de apresentar comportamento não plástico e granulometria mais fina que as argilas, características que favoreceram sua atuação como material de preenchimento dos vazios da matriz cerâmica.
- A caracterização granulométrica evidenciou distribuição heterogênea das matérias-primas, com presença de frações médias e finas. O talco apresentou maior concentração de partículas nas peneiras #50 e #80, contribuindo para o empacotamento das partículas e para a redução dos vazios na massa cerâmica.
- Os Índices de Plasticidade de 14,78% para a ARG01 e 9,11% para a ARG02 classificaram ambas as argilas como medianamente plásticas segundo o critério adotado no estudo, indicando comportamento adequado para participação nas formulações cerâmicas.
- A análise TG/DTA demonstrou perda total de massa de 5,20% para a ARG01, 6,39% para a ARG02 e 4,40% para o talco. A maior perda observada para a ARG02 indica maior quantidade de componentes suscetíveis às transformações térmicas, enquanto o talco apresentou maior estabilidade nas faixas intermediárias de temperatura.
- A incorporação de talco promoveu redução dos teores de umidade das massas cerâmicas. As formulações contendo 10% e 15% de talco apresentaram os menores valores, comportamento relacionado ao caráter não plástico e à menor afinidade do talco com a água.

- A retração linear total apresentou valores entre 2,51% e 3,59%, indicando baixa variação dimensional entre as formulações e adequada estabilidade dimensional dos corpos de prova após o processamento e a queima.
- A porosidade aparente variou entre 19,72% e 24,37%, observando-se tendência de redução com o aumento da temperatura de queima e com a incorporação de talco. A formulação contendo aproximadamente 10% de talco apresentou o menor valor de porosidade, atingindo 19,72% a 950 °C.
- A massa específica aparente apresentou valores entre 1,64 e 1,70 g/cm³, com tendência de aumento para formulações contendo talco e para maiores temperaturas de queima, evidenciando a relação inversa entre porosidade e densificação da estrutura cerâmica.
- A perda ao fogo apresentou valores entre 4,66% e 10,18%, mantendo-se dentro das faixas consideradas adequadas para massas destinadas à produção de cerâmica vermelha.
- A absorção de água variou entre 11,62% e 14,74%, permanecendo dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15270-1 para blocos cerâmicos. A formulação contendo 10% de talco apresentou os menores valores nas temperaturas mais elevadas, indicando maior densificação da estrutura.
- A tensão de ruptura à flexão apresentou aumento com a elevação da temperatura de queima, variando aproximadamente entre 2,50 e 9,71 MPa. A formulação sem talco apresentou os maiores valores de resistência mecânica, atingindo 9,71 MPa a 950 °C, enquanto teores elevados de talco promoveram redução da resistência, associada ao caráter não plástico do mineral e à possível redução da coesão da massa.
- A análise macroestrutural evidenciou coloração avermelhada homogênea nos corpos de prova queimados, associada à presença de Fe₂O₃ nas argilas, além da ausência de fissuras, trincas, deformações ou outros defeitos macroscópicos significativos.
- De maneira geral, todas as formulações apresentaram propriedades compatíveis com a aplicação em cerâmica vermelha. Entretanto, considerando conjuntamente as propriedades físicas e mecânicas avaliadas, as formulações com teores moderados de talco apresentaram melhor desempenho global, destacando-se a incorporação de aproximadamente 10%.

- Portanto, a incorporação de talco nas massas cerâmicas estudadas mostrou-se tecnicamente viável, promovendo alterações favoráveis em propriedades como umidade, porosidade, massa específica aparente e absorção de água, além de apresentar potencial para utilização como aditivo mineral na indústria de cerâmica vermelha do estado do Piauí.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a viabilidade socioeconômica do uso de talco na indústria cerâmica local;
- Avaliar a condutividade térmica das formulações cerâmicas com diferentes teores de talco, especialmente aquelas contendo 10% de incorporação, comparando-as à formulação de referência sem talco.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. C. et al. **Processos de fabricação de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022.

ALMEIDA, K. S. et al. **Panorama da indústria cerâmica vermelha no Piauí**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 58., 2014, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Cerâmica, 2014, p. 1150-1162. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/03-052.pdf. Acesso em: 22 abr. 2025.

ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E. **Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0893>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/TftSvKgJjGPdwYZnXKf7LTS/?lang=pt>. Acesso em: 22 abr. 2025.

AMORIM, L. V. et al. **Estudo comparativo entre variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/HcKhCXZKRYgDznm79CNGjwd/?lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Informações técnicas – processos de fabricação**. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 01 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1: componentes cerâmicos – Parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AVELINO, Flávio Pessoa. **Estudo de formulações para produção de revestimento cerâmico a partir de matérias-primas encontradas no estado do Piauí com adição de pó de vidro**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2017. Disponível em: http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/bitstream/123456789/776/2/2017_dis_fpavelino.pdf. Acesso em: 24 out. 2024.

BARRETO, Ivan Figueiredo. **Caracterização de minério de talco e aplicação em concreto celular**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2021.

BAUER, Falcão L. A. **Materiais de construção** 2. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERGAYA, Faïza; LAGALY, Gerhard. **Handbook of clay science**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. New York: Wiley, 2016.

CAMPOS, José Egídio Gouvêa. **Potencial mineral do estado do Piauí: avaliação e perspectivas de aproveitamento econômico**. Teresina: CPRM, 2011.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume 1. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. S.; SANTOS, H. S. **Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades**. Química nova, v. 30, n. 1, p. 146-152, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100026>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/q5WkDyK8Lt4JWBMZ7dZKTVH/?lang=pt>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CORREIA, João Victor Freitas Barros. **Influência da granulometria do vidro sodalcal de embalagem nas propriedades de sinterizados produzidos a partir de argila usada na indústria cerâmica do estado de Sergipe**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/13137>. Acesso em: 01 maio 2025.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray Diffraction**. 3. ed. New York: Pearson, 2014.

DONDI, Michele; RAYMUNDO, Manuel; ZANELLI, Chiara. **Light-weighting traditional ceramics by porosity control and consequences on mechanical strength**. Ceramics International, v. 49, n. 21, p. 35239–35249, 2023.

EL OUAHABI, M.; DAZZI, N.; FAHSI, A. et al. **Effect of oxide additives on densification and technological properties of terracotta ceramics**. Applied Clay Science, v. 245, p. 107126, 2023.

EMMERICH, K.; STEUDEL, A. **Análise térmica de matérias-primas argilosas**. Cerâmica Industrial, v. 21, n. 2, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2016.009>. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/587657607f8c9d6e028b483e>. Acesso em: 24 abr. 2025.

FERNANDES, H. C. et al. **Estudo das propriedades tecnológicas de argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha**. Cerâmica Industrial, São Paulo, 1998.

FONSECA, Ana Carolina Libera. **Recursos minerais de minas gerais – Alumínio. Belo Horizonte: UFMG – Instituto de Geociências**, 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Aluminio.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GOMES, Celso de Freitas. **Argilas: o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

GREGORIO FILHO, R. et al. **Método do fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282004000500014>.

Disponível em:

<https://revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/doi/10.1590/S0104-14282004000500014>. Acesso em: 24 abr. 2025.

GUIMARÃES, T. C. F. et al. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas com a composição química de argilas vermelhas do Estado da Bahia**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1310>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rmat/a/xyrpd7WvYmdK98DWyxBCXVK/?lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

HANNA, R. A. et al. **O uso das argilas esmectíticas da região de Franca, SP como adsorventes de compostos petroquímicos**. Ciência e Engenharia, v. 14, n. 2, 2009. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/546>. Acesso em: 24 abr. 2025.

IHEKWEME, G. O. et al. **Plasticity characterization of certain Nigeria clay minerals for their application in ceramic water filters**. Science Progress, v. 104, n. 2, 2021. DOI: 10.1177/00368504211012148.

LIMA, Y. S. V.; SOARES, R. A. L.; SANTOS, L. J. C. **Estudo da potencialidade de matérias-primas, do estado do Piauí, para produção de revestimento cerâmico**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 1-33, 2025. DOI: <https://doi.org/10.61164/rmnm.v7i1.3781>. Disponível em:

<https://www.revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/3781>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MAIA, Fernanda dos Santos. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2012. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Diserta%C3%A7%C3%A3o-Fernanda-dos-Santos-Maia.pdf>. Acesso em: 01 maio 2025.

MARTINS, Miriam Gomes. **Caracterização de uma argila da região norte de Minas gerais para aplicações industriais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2965>. Acesso em 24 abr. 2025.

MENEZES, R. R. et al. **Argilas bentoníticas de Cubati, Paraíba, Brasil: caracterização física-mineralógica**. Cerâmica, v. 55, p. 163-169, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000200008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/DfGWLkC6Rj9F5r5NWdpVvqv/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

MENEZES, R. R. et al. **Caracterização de argilas plásticas do tipo “ball clay” do litoral paraibano**. *Cerâmica*, v. 49, p. 120-127, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132003000300003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/9RfSjmZM5KDGQJ4kZzVNNkP/?lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

NASCIMENTO-DIAS, B. L.; OLIVEIRA, D. F.; ANJOS, M. J. **A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios x**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 4, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0089>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/mJH5NgLXg7bTdX7TD7HWCyC/?lang=pt>. Acesso em: 22 set. 2025.

NAPOLI, Laís. **Cerâmica: a mais antiga das indústrias**. *Revista da Anicer*, Rio de Janeiro, n. 96, 2015. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/revista-anicer/revista-96/historia/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

NEUMANN, M. G. et al. **Interações entre corantes e argilas em suspensão aquosa**. *Química nova*, v. 23, n. 6, p. 818-824, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000600016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/dqXTSjBZcPYkZk4SkfjvnKQ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.

OLIVEIRA, Antonio Pedro Novaes de. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 6, nov./dez. 2000. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657097f8c9d6e028b4638/pdf/ci-5-6-587657097f8c9d6e028b4638.pdf>. Acesso em: 01 maio 2025.

PEREIRA, Marcílio Gonçalves de Farias. **Indústria cerâmica vermelha na região dos cocais piauiense: um estudo da caracterização da matéria-prima, do processo produtivo e do produto acabado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2017. Disponível em: <http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/765>. Acesso em: 01 maio 2025.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. **Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 56, p. 237-243, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/QC5QSSKd4kDs6vTVrtnQwq/?lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe**. 2011. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6126>. Acesso em: 24 abr. 2025.

PROST, René et al. **State and location of water adsorbed on clay minerals: consequences of the hydration and swelling–shrinkage phenomena**. *Clays and Clay Minerals*. DOI: 10.1346/CCMN.2024.0001.

REED, James S. **Principles of ceramics processing**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

REGO, V. R.; SOARES, R. A. L. **Avaliação do processo produtivo e das propriedades tecnológicas de blocos cerâmicos produzidos na região da grande Teresina**. *Cerâmica Industrial*, v. 20, n. 3, maio/jun. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2015.023>. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/5876575c7f8c9d6e028b4828>. Acesso em: 03 maio 2025.

REGO, Vilson Ribamar. **Avaliação da conformidade de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação produzidos na região integrada de desenvolvimento da grande Teresina**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12668>. Acesso em: 01 maio 2025.

RODRIGUES, A. M.; HOLANDA, J. N. F. **Influence of iron oxide on the color and technological properties of red ceramics**. *Cerâmica*, v. 66, n. 379, p. 403–410, 2020. DOI: 10.1590/0366-69132020663793063.

SANTOS, P. J. L. S.; SILVA, J. P. S.; SOARES, R. A. L.; GOMES, É. R. **Efeito da adição de talco dolomítico de jazidas do Piauí como fundente em formulações de massa com argila caulinítica**. *Cerâmica Industrial*, v. 26, n. 1, e022601, 2021. DOI: 10.4322/cerind.2021.002.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 2 v.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**, volume 1. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1989.

SANTOS, W. N. **O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície**. *Cerâmica*, v. 48, n. 306, abr./maio/jun. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000200007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/zvWDYRzZpgTZ83Jgy7YCvqr/?lang=pt>. Acesso em: 21 out. 2025.

SENNA, Juliano Alves. **Caracterização de argilas de utilização na indústria cerâmica por espectroscopia de reflectância**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2003.294354>. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/294354>. Acesso em: 27 abr. 2025.

SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. **Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores**

nacionais e internacionais. Revistas eletrônica de materiais e processos, v. 2, n. 2, p. 26-35, 2008. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/77>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SILVA, S. K. B. M. et al. **Parameters estimation of the drying process of industrial ceramic bricks via concentrated analysis model.** Research, Society and Development, v. 10, n. 7, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16913.

SOARES, R. A. L. **Caracterização tecnológica de argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha do estado do Piauí.** Dissertação (Mestrado) – Teresina, 2008.

SOUZA, J. V. **Matérias-primas cerâmicas.** São Paulo: Edgard Blücher, 1975.

SPOSTO, R. M. et al. **Análise da conformidade de blocos cerâmicos sinterizados em fornos intermitentes e contínuos no Distrito Federal.** Cerâmica Industrial, v. 12, n. 5, 2007. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657327f8c9d6e028b4728>. Acesso em: 02 maio 2025.

VALÁŠKOVÁ, M. et al. **Influence of mineral additives on porosity and microstructure of clay ceramics.** Applied Clay Science, 2021.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Effect of particle size distribution on the properties of red ceramics.** Applied Clay Science, v. 105–106, p. 187–193, 2015. DOI: 10.1016/j.clay.2014.12.020.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; PINATTI, D. G. **Characteristics and properties of clays used in the ceramic industry.** Applied Clay Science, v. 162, p. 457–464, 2019. DOI: 10.1016/j.clay.2018.06.019.